

土木学会関西支部
共同研究グループ

「内水圧が作用する地下貯留 トンネルの力学挙動に関する 調査・研究」

平成 30 年度報告書

序

近年、大都市では、豪雨に伴って発生する局所的な浸水被害に対処するため、地下貯留シールドトンネル（地下河川、放水路等）が建設されている。完成後の地下貯留シールドトンネルでは、その使用目的から長期にわたる高度な耐久性・機能性が要求される。

首都圏で供用中の「首都圏外郭放水路」や「神田川・環状七号線地下調節池」は、二次覆工を省略した RC セグメントによる大断面地下貯留シールドトンネルである。ところが、これらのシールドトンネルでは、RC セグメントにコンクリートの剥離、ひびわれ、漏水などの損傷発生が報告されており、その原因として、外水圧に匹敵する内水圧の繰り返し載荷に伴う覆工の軸力減少、シール材の膨張、シール溝の設置位置の影響などが指摘されている。

一方、関西では、「寝屋川地下河川」や雨水増補幹線の完成、大阪市の「淀の大放水路」等の放水路、下水道幹線、滞水池（貯留管）の完成に向けて事業が進められているが、供用後のトンネル覆工の損傷実態、損傷原因、損傷に対する対策については未解明な部分が残っているのが実情である。

そこで、本研究グループでは、内水圧が繰り返し作用する地下貯留シールドトンネルについて、損傷実態の把握、損傷原因となる力学挙動の解明、および対策手法の開発を行うことを目的として、平成 29 年度と平成 30 年度の 2 年間にわたって研究活動を実施した。

平成 29 年度は、神田川・環状七号線地下調節池、寝屋川北部地下河川古川調節池および北島調節池、北浜逢坂地下貯留管、首都圏外郭放水路の実態調査、およびセグメント工場視察を実施し、実態を把握するとともに、調査公表されている資料、管理者からの聞き取り、および現地調査等に基づいて損傷実態を分析し、応力計算や FEM 解析によるシミュレーションによって損傷原因を考察し、これらの内容を平成 29 年度報告書としてまとめた。

本報告書は、前年度の研究活動に引き続いて平成 30 年度に実施した損傷原因の分析、および内水圧トンネルの設計法の検討結果について述べ、2 年間にわたる研究の成果をベースとして損傷対策の提案ならびに浸水対策施設の管理運営方法への提言をまとめたものである。

本報告書が都市の安全にかかわる関係者の努力の一助となり、ひいては市民の安全に多少なりとも寄与できれば幸いである。

最後に、本研究グループの活動にご協力いただいた管理者の皆様、ならびに研究会活動に積極的に参加されたメンバーの皆様に深く感謝の意を表するものである。

土木学会関西支部共同研究グループ
「内水圧が作用する地下貯留トンネルの力学挙動に関する調査・研究」
代表 東田 淳

「内水圧が作用する地下貯留トンネルの力学挙動に関する調査・研究」 H30 年度報告書
目 次

頁

1. 研究グループの活動報告	1-1
1.1 活動成果	1-1
1.2 構成員	1-4
1.3 研究会・幹事会の議題	1-5
2. 損傷原因の分析	2-1
2.1 昨年度の研究状況と分析方針	2-1
2.2 フレーム解析による分析	2-5
2.3 F E Mによる継手部挙動の分析	2-13
2.4 損傷原因の評価	2-24
3. 損傷防止対策の提案	3-1
3.1 内水圧シールドトンネルにおける損傷の概要	3-1
3.2 R Cセグメントの適用可能性(本章の目的)	3-4
3.3 想定される損傷要因	3-5
3.4 止水材による損傷防止対策	3-7
3.5 セグメント構造の損傷防止対策	3-13
4. 管理運営方法の提言	4-1
4.1 管理運営方法の調査	4-1
4.2 管理運営方法に対する提案	4-6
第4章付録	4-9
5. 内水圧が作用するシールド管渠の力学挙動に関する考察	5-1
5.1 梁ばねモデルによる設計法の概要と問題点	5-1
5.2 弾性F E Mによる設計法の概要と問題点	5-2
5.3 弾性F E Mと梁ばねモデルのコラボ設計法の提案	5-3
5.4 コラボ設計法の外郭放水路への適用例	5-4
5.5 結論	5-8
第5章付録	5-25
6. 今後の課題	6-1

■ 付録

付録1：研究会・幹事会 議事録	付録 1-1
付録2：ワークショップ配布資料	付録 2-1

1. 研究グループの活動報告

1.1 活動成果

平成 30 年度は研究会を 5 回、幹事会を 6 回、ワークショップ(以下、WS と呼ぶ)を 1 回開催し、以下の成果を得た。

(1) RC セグメント継手の剥離損傷メカニズムの確認

① 土被り高 50 m で埋設された大口径と中口径の 2 通りの内水圧トンネルを対象として、「内水圧トンネル設計の手引き」¹⁾と「神田川Ⅱ期設計基準」²⁾の二つの設計法を用いて梁ばねモデルによるフレーム解析を行い、以下の結果を得た。なお、「神田川Ⅱ期設計基準」を用いたフレーム解析では、内外水圧の作用方向を管渠面に対して垂直方向とした以外は、継手の剛性やトンネル自重の扱い方を含めて「内水圧トンネル設計の手引き」に一致させた。

- ・ 口径に拘わらず、空水状態では軸力が卓越して全圧縮状態となり、内水圧が地表面+4 m の満水状態では軸力の減少に伴って曲げモーメントが支配的となる結果を得た。
- ・ 満水状態における側部内面の継手の圧縮応力は、空水状態に比べて、大口径トンネルでは増加傾向、中口径トンネルでは減少傾向を示した。
- ・ 以上の解析結果から、内水圧の作用がトンネルに及ぼす影響はトンネル径が大きい方が顕著であると結論した。

② 大口径トンネルを対象としてトンネル側部と頂部の継手部の二次元 FEM 解析を実施し、以下の結果を得た。

- ・ トンネル側部では、フレーム解析で得られた継手面の応力とシール材の膨張圧力を与えたケースで内面の剥離現象を再現する結果を得た。
- ・ トンネル頂部では、フレーム解析で得られた継手面の応力とシール材の膨張圧力を与えても内面の剥離現象を再現できず、他の要因を抽出する必要があることが分かった。

③ 頂部の損傷に影響する他の要因として考えられるシール材、シール溝、施工に関連するものについて検討を加え、以下を指摘した。

- ・ シール材については、吸水膨張した内面側シール材のシール溝からのはみだし、内面側シール材を介した軸力伝達、および膨張速度が損傷要因となり得る。
- ・ シール溝については、溝の設置位置が内面に近く、シール材の溝占有体積率が高いほど、損傷の可能性が高い。
- ・ 施工に関しては、組み立てや曲線施工に伴って生じるトンネルの初期変形状態は損傷要因とはなり難い。

(2) 損傷対策の提案

首都圏外郭放水路の損傷状況に基づいて、損傷対策について以下を提案した。

① シール材に起因するセグメントの剥離損傷の防止対策として、シール材の膨張圧とシール溝占有体積率について検討し、以下を提案した。

- ・ シール材の膨張圧は 8.5 N/mm^2 以下に抑えることが望ましい。
- ・ シール材の体積率が剥離損傷に与える影響は小さいが、体積率を 95 %未満に抑えることが望ましい。

② セグメント構造に起因する剥離損傷の防止対策として、セグメントのシール溝縁端距離と鉄筋被り厚について検討し、以下を提案した。

- ・ シール溝縁端距離は剥離損傷に与える影響が大きいことを指摘し、剥離損傷を防ぐためにはシール溝から発生する剥離面と鉄筋が交差するように、シール溝縁端距離を 60 mm 以上確保すべきである。
- ・ 鉄筋被り厚は、耐久性確保のために一定の厚さが必要となるが、剥離面と鉄筋を交差させる条件を満足させるためにシール溝縁端距離よりも小さくするべきである。

(3) 管理運営方法の提言

① 2017 年度に 4 カ所の実態調査、2018 年度に 6 カ所のアンケート調査を実施し、地下貯留シールドトンネルの損傷、および維持管理・点検の実態について、以下の調査結果を得た。

- ・ 損傷が発生しているのは 3 カ所で、これらの施設に共通する特徴は、内径 10 m 以上、二次覆工省略型のコンクリートセグメント使用、供用開始は平成 18 年以前、設計内圧は地表面またはそれ以上であった。
- ・ 内径 10 m 未満の二次覆工省略型のコンクリートセグメント使用トンネルは 2 カ所で、損傷は発生していないとの回答があった。
- ・ 定期的に点検を実施している施設は、5 カ所であった。
- ・ 堆積物除去の困難性、および安全対策や搬出入の施設整備の不十分さから、維持管理や点検が簡単に実施できないとの回答があった。
- ・ 維持管理・点検の実施やそのための施設整備に要する予算の確保が困難との回答があった。

② 調査結果を踏まえて、以下の管理運営方法を提言した。

- ・ 設計時点で地表面までの内水位負荷を考慮していても損傷を生じている施設があることから、施設運用方法として管理水位を管頂程度とすることを提案し、この運用水位による貯留機能への影響がほとんど無いことを指摘した。
- ・ 維持管理施設の整備を設計時から考慮すべきこと、特に大口径トンネルでは頂部や側部の点検を可能とする施設整備の必要性を指摘した。
- ・ 高内水圧が作用する貯留管では、剥離・剥落などの損傷発生の可能性が高くなるため、通常の施設点検よりも点検頻度や損傷を対象とする調査項目を増やし、早期発見により致命的な損傷を防ぐべきことを指摘した。

(4) 内水圧が作用するシールド管渠の力学挙動に関する考察

① 梁ばねモデルを用いる 3 通りの現行設計法(「内水圧トンネル設計の手引き」、「鉄道総研法」^{3)~5)}、「神田川Ⅱ期設計基準」)について検討を加え、以下を指摘した。

- ・ 「神田川Ⅱ期設計基準」は、内外水圧の作用方向を管渠面に対して垂直方向で与え、さらに内水圧载荷に伴うセグメントの回転ばねの変化を考慮できることなどから、他の 2 つの設計法よ

りも矛盾が少ないと考えられる。

② 土と構造物の相互作用を考慮した弾性 FEM 解析(管面は滑動条件)と梁ばね解析(「神田川Ⅱ期設計基準」)を組み合わせる解析手法を提案し、外郭放水路第 2 工区のシールド管渠をモデルケースとした解析を実施して以下の結果を得た。

- ・ 弾性 FEM 解析によってセグメントの曲げ剛性を変化させた時の外力(土圧と水圧)と鉛直たわみ量 δ_v を求め、同じ外力を与えた梁ばね解析(地盤ばね無し)によって算定した δ_v が FEM 解析で求めた δ_v と一致する時の外力と断面力を決定する手法を提案した。
- ・ δ_v が一致した時点で得られた継手の発生応力は、内水圧無しでは頂部・底部・側部の各継手が、また内水圧有りでは側部の継手がそれぞれ損傷する可能性を示唆する結果となった。この結果から、頂部では内水圧により継手内側が開いて内側シール材が膨張し、内水圧無しで膨張したシール材を挟むことにより、また側部では内水圧によって継手内側が閉じてシール材を挟むことにより、それぞれ内面剥離が生じる可能性があることが分かった。
- ・ ただし、この解析で得られた鉛直たわみ量 δ_v は、実際の計測結果や施工経験から見て大きすぎると推定されるので、この点に検討の余地が残る結果となった。

1.2 構成員

表-1.2.1 に構成員名簿を示す。

表 1.2.1 構成員名簿

	氏名	所属
代表	東田 淳	大阪市立大学客員教授 Buried Pipe Research Center
幹事長	山本 和広	中央復建コンサルタンツ(株) 道路系部門
幹事	井上 裕司	中央復建コンサルタンツ(株) 総合技術本部 社会インフラマネジメントセンター
〃	今井 一彦	(株) 建設技術研究所 大阪本社 水システム部
〃	團 昭博	中央復建コンサルタンツ(株) 道路系部門
委員	岩田 和実	ジオスター (株) 技術統括本部
〃	大杉 朗隆	クリアウォーターOSAKA (株) (大阪市より出向中)
〃	神谷 拓生	西松建設 (株) 社長室人財戦略部
〃	島津 多賀夫	(株) アサノ大成基礎エンジニアリング
〃	寺田 武彦	中央復建コンサルタンツ(株) 道路系部門
〃	松本 貴士	中央復建コンサルタンツ(株) 道路系部門
〃	三品 文雄	エースコンサルタント株式会社 本社
〃	村上 秀作	ジオスター株式会社 大阪支店
〃	安岡 政光	大阪府 茨木土木事務所
〃	矢野 博彦	積水化学工業株式会社 環境・ライフラインカンパニー 官需事業企画開発室
〃	楊 雪松	(株) 建設技術研究所 東京本社 水工部
〃	吉田 公宏	(株) 大林組 土木本部生産技術本部
〃	吉村 洋	(独) 国立高等専門学校機構 阿南工業高等専門学校 創造技術工学科

所属は 2019 年 3 月末時点

1.3 研究会・幹事会の議題（議事録、ワークショップ資料は付録参照）

(1) 研究会、幹事会、ワークショップの開催一覧

年度	研究会・幹事会	開催日	年度	研究会・幹事会	開催日
2017 年度	第 1 回幹事会	2017. 3. 17	2018 年度	第 4 回幹事会	2018. 4. 26
	第 1 回研究会	2017. 4. 26		第 6 回研究会	2018. 5. 31
	第 2 回幹事会	2017. 5. 10		第 7 回研究会	2018. 7. 11
	第 2 回研究会	2017. 7. 19		第 5 回幹事会	2018. 8. 22
	第 3 回研究会	2017. 9. 7		第 8 回研究会	2018. 9. 5
	第 3 回幹事会	2017. 10. 10		第 6 回幹事会	2018. 10. 10
	第 4 回研究会	2017. 12. 6		第 9 回研究会	2018. 10. 31
	第 5 回研究会	2018. 2. 21		第 7 回幹事会	2018. 11. 30
	ワークショップ	2018. 6. 16		第 10 回研究会	2018. 12. 19
				第 8 回幹事会	2019. 2. 6
				第 9 回幹事会	2019. 3. 11
				ワークショップ	2019. 5. 25

以下より 2018 年度の研究会・幹事会の日時、場所、議題を示す。

2017 年度開催分は平成 29 年度報告書を参照。

(2) 第 4 回幹事会

日 時：2018 年 4 月 26 日（木）15:00～17:30

場 所：中央復建コンサルタンツ株式会社大阪本社

議 題：

1. 第 5 回研究会議事録の確認（山本幹事長）
2. WS チラシの説明（ 〃 ）
3. 2018 年度の研究会活動方針案の説明（ 〃 ）
4. 解析計画案の説明と討議（團幹事他）

(3) 第 6 回研究会

日 時：2018 年 5 月 31 日（木）14:00～17:00

場 所：土木学会関西支部

議 題：

1. 第 5 回研究会・第 4 回幹事会議事録の確認（山本幹事長）
2. 2018 年度の研究会活動方針案の説明（ 〃 ）
3. WG 1 のWSにおける発表内容について（井上幹事・山本幹事長）
4. WG 2 のWSにおける発表内容について（團幹事）

(4) 第 7 回研究会

日 時：2018 年 7 月 11 日（水）14:00～17:30

場 所：中央復建コンサルタンツ株式会社大阪本社

議 題：

1. 第 6 回研究会議事録の確認（山本幹事長）
2. 2017 年度報告書について（代表、各幹事）
3. 2018 年度の研究会活動方針案について（山本幹事長）

(5) 第5回幹事会

日 時：2018年8月22日（火）14:00～17:00

場 所：土木学会関西支部

議 題：

1. WG組織計画について（山本幹事長）
2. 追加調査計画（ ” ）
3. Mu i r 解について（東田代表）
4. 各計算法によるセグメント計算結果について（團幹事）
5. フレーム解析・F E M解析の解析ケースについて（團幹事）
6. 曲げ剛性有効率を変化させたF E M解析について（島津委員）

(6) 第8回研究会

日 時：2018年9月5日（水）14:00～17:30

場 所：中央復建コンサルタンツ株式会社大阪本社

議 題：

1. 第7回研究会・第5回幹事会議事録、WG組織構成、会員名簿の確認（團幹事）
2. WG 3でのフレーム解析およびF E M解析方針の説明（團幹事）
3. WG 4, 5での調査計画について（山本幹事長）
4. 各計算法によるセグメント計算結果について（團幹事）
5. 曲げ剛性有効率を変化させたF E M解析について（島津委員）

(7) 第6回幹事会

日 時：2018年10月10日（水）14:00～17:30

場 所：中央復建コンサルタンツ株式会社大阪本社

議 題：

1. 第8回研究会・WG主査打合せ議事録の確認（山本幹事長）
2. WG 3の研究状況の説明と討議（團幹事他）
3. WG 4、5の調査計画の説明（山本幹事長）
4. F E M解析による内圧有無の影響検討について（島津委員）

(8) 第9回研究会

日 時：2018年10月31日（水）14:00～17:00

場 所：土木学会関西支部

議 題：

1. 第8回研究会・第6回幹事会議事録の確認（山本幹事長）
2. WG 4、5の調査計画の説明（山本幹事長）
3. WG 3の研究状況の説明（團幹事）

(9) 第7回幹事会

日 時：2018年11月30日（金）14:00～17:00

場 所：中央復建コンサルタンツ株式会社大阪本社

議 題：

1. 第9回研究会議事録の確認（山本幹事長）

2. WG 3の研究状況の報告（團幹事）
3. 実規模シールドの載荷試験結果の考察（東田代表）
4. WG 4, 5のアンケート調査状況の説明（山本幹事長）
5. 損傷対策WG 4の活動計画について（井上幹事他）

(10) 第10回研究会

日 時：2018年12月19日（水）14:00～17:30

場 所：中央復建コンサルタンツ株式会社大阪本社

議 題：

1. 第9回研究会・第7回幹事会議事録の確認（山本幹事長）
2. WG 3の研究状況の説明（東田代表、團幹事）
3. WG 4, 5のアンケート調査結果の説明（山本幹事長）

(11) 第8回幹事会

日 時：2019年2月6日（水）14:00～17:00

場 所：中央復建コンサルタンツ株式会社大阪本社

議 題：

1. 第10回研究会議事録の確認
2. WG 4, 5の調査結果集計と今後の調査計画の説明（山本幹事長）
3. WG 5の研究項目案について（山本幹事長）
4. WG 3の研究内容について（東田代表、島津委員）

(12) 第9回幹事会

日 時：2019年3月11日（月）14:00～17:30

場 所：中央復建コンサルタンツ株式会社大阪本社

議 題：

1. 第8回幹事会議事録の確認
2. WG 4, 5の今後の調査について（山本幹事長）
3. 報告書目次、WS発表プログラムについて（山本幹事長）
4. WG 3の研究内容について（團幹事、東田代表、島津委員）

(13) ワークショップ

日 時：2019年5月25日（土）14:30～16:30

場 所：大阪大学 吹田キャンパス 工学部

プログラム：

1. 開会挨拶・活動報告（東田代表）
2. 損傷原因の分析（團幹事）
3. 損傷対策の提案（井上幹事）
4. 管理運営方法の提言（山本幹事）
5. 内水圧が作用するシールド管渠の力学挙動に関する考察（東田代表、島津委員）
6. ディスカッション（参加者全員）
7. 閉会挨拶（山本幹事長）

[第1章 参考文献]

- 1) 先端建設技術センター (1999): 内水圧が作用するトンネル覆工構造設計の手引き.
- 2) 小林寛治、肥沼昭 (2000): 東京都の河川事業における建設コスト縮減の取り組み—神田川・環状七号線地下調節地シールド工事—、pp.11-16、土木施工 41 巻 6 号.
- 3) 鉄道総合技術研究所 (1999): 鉄道構造物等設計標準・同解説 (シールドトンネル).
- 4) 鉄道総合技術研究所 (2001): シールドトンネル設計標準に関する手引き.
- 5) 鉄道総合技術研究所 (2002): 鉄道構造物等設計標準・同解説 (シールドトンネル) SI 単位版.

2. 損傷原因の分析

2.1 昨年度の研究状況と分析方針

2.1.1 昨年度の研究状況

(1) 現地調査

本研究会では、内水圧が作用する貯留管シールドトンネルの損傷状況の実態を把握することを目的として、2017 年度に現地調査を実施した¹⁾（表-2.1.1）。その結果、内径 10m 以上の RC セグメントにおいて損傷が確認されたことから、その損傷の状況と想定される要因を表-2.1.2 のとおり整理した。

本研究会は、地下貯留トンネルの力学挙動をターゲットとしていることから、現地調査において確認された損傷のうち「セグメント継手部に発生した剥離損傷」を対象として、損傷原因の分析を実施することとした。

表-2.1.1 昨年度の現地調査箇所および損傷状況

施設	神田川・環状七号線地下調節池		首都圏外郭放水路		寝屋川北部地下河川		北浜逢阪 貯留管
	I 期	II 期	1～3 工区	4 工区	古川	北島	
内径	12.5m	12.5m	10.6m	10.6m	7.5m	5.4m	6.0m
種類	RC	合成	RC	DRC	合成	合成	RC
剥離	有	無	有	無	無	無	不明



■実態調査により確認された損傷の状態

- ①内径 10m 以上の RC セグメントで剥離損傷が発生。
- ②セグメントの鉄筋やシール材が露出する深い剥離が多い。
- ③シール材の深さに達していない浅い剥離も比較的多い。

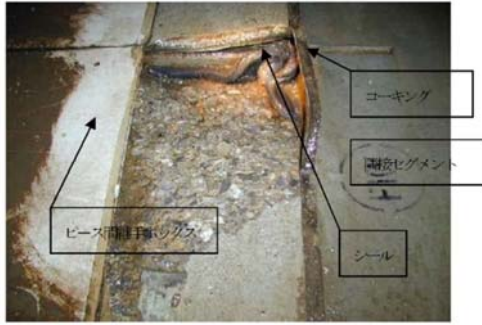


シール材が露出する剥離



比較的浅い軽微な剥離

表-2.1.2 内圧トンネルで確認された損傷状況と想定される要因 1)

No	損傷の状況		想定される損傷の要因	対象
1	リング継手面に発生した剥離		トンネル施工中にジャッキ推力やシール材の反発力等の作用により発生した潜在的なひび割れが、供用（貯留）に伴い進展し剥離に至った	×
2	セグメント継手面に発生した剥離		トンネル内への一時貯留に伴う内水圧の繰り返し作用（載荷・除荷の繰り返し）により継手面が変形し、局所的な剥離に至った	●
3	亀甲状のひび割れがトンネル内面の広範囲に発生		・貯留と排水の繰り返しに伴うセグメント内面の乾燥収縮 ・連結管からの流入水の衝撃力がセグメント内面に繰り返し作用	×
4	継手ボックス等からの漏水	—	シール材の設置不良、継手金物周りの水みちからの漏水	×

(2) 損傷原因の分析方針

2017 年度の研究会¹⁾では、「セグメント継手部に発生した剥離損傷」の原因を分析するために、以下に示す方針で数値解析を実施することとしていた。

【損傷原因の分析方針】

解析は、以下に示す 2 つを確認するために実施する。

①トンネル規模がトンネル断面の変形に与える影響

②セグメントが剥離損傷を起こすために必要な力とその作用位置および方向

①について

首都圏外郭放水路や神田川・環七地下調節池のように内径が 10m を超える貯留管において RC セグメントに剥離損傷の発生が報告されているが、内径が 6m 程度の貯留管ではこのような損傷の発生は報告されていない。シールドトンネルの内径が大きくなればトンネル断面に対する部材断面が小さくなるため、外力の変化に伴う断面方向の変形の違いがセグメントの剥離に影響を与えている可能性が想定される。そのため、はりばねモデルによるフレーム解析によってトンネル規模の違いがトンネルの断面方向変形に与える影響を確認する。

②について

RC セグメントの剥離損傷の形態は、シール溝に至らない浅く軽微なものからシール溝に至る比較的深いものまである。また、首都圏外郭放水路の損傷メカニズムの説明図では、剥離面（せん断面）の角度がセグメント内面に対して 45 度程度で図示されているが、実際の剥離は 10 度程度の浅い角度で剥離面（せん断面）が生じている。これは、局所的な外力の作用位置と作用方向の違いによるものと想定される。そのため、二次元 FEM 解析により、シール材の膨張圧とセグメントの局部接触をした場合に想定される外力の作用ケース設定し、せん断破壊に必要なとなる外力の大きさを確認する。

（平成 29 年度報告書より）

2.1.2 損傷原因の分析方針

「2.1.1 昨年度の研究状況」を踏まえ、本研究会では、「セグメント継手部に発生した剥離損傷」のうち、トンネル構造への影響を及ぼす可能性の高い「深い剥離」を対象として、数値解析によりRCセグメントの剥離損傷メカニズムを検証することとした。

剥離損傷メカニズムの分析は、以下に示す2種類の数値解析を適用することとし、図-2.1.1に示す手順にて実施した。

①【解析Ⅰ】トンネル規模がトンネル断面の変形に与える影響の評価

作用外力の履歴に対し、フレーム解析によりトンネル規模の違いがトンネル横断面方向の変形ならびに断面力に与える影響を確認する。

②【解析Ⅱ】セグメントの剥離損傷に必要な作用荷重形態の評価

作用外力の過程で発生するセグメント継手面の応力分布やシール材の膨張圧力等を用いて、二次元FEM解析により継手部に発生した剥離損傷の再現を試みる。

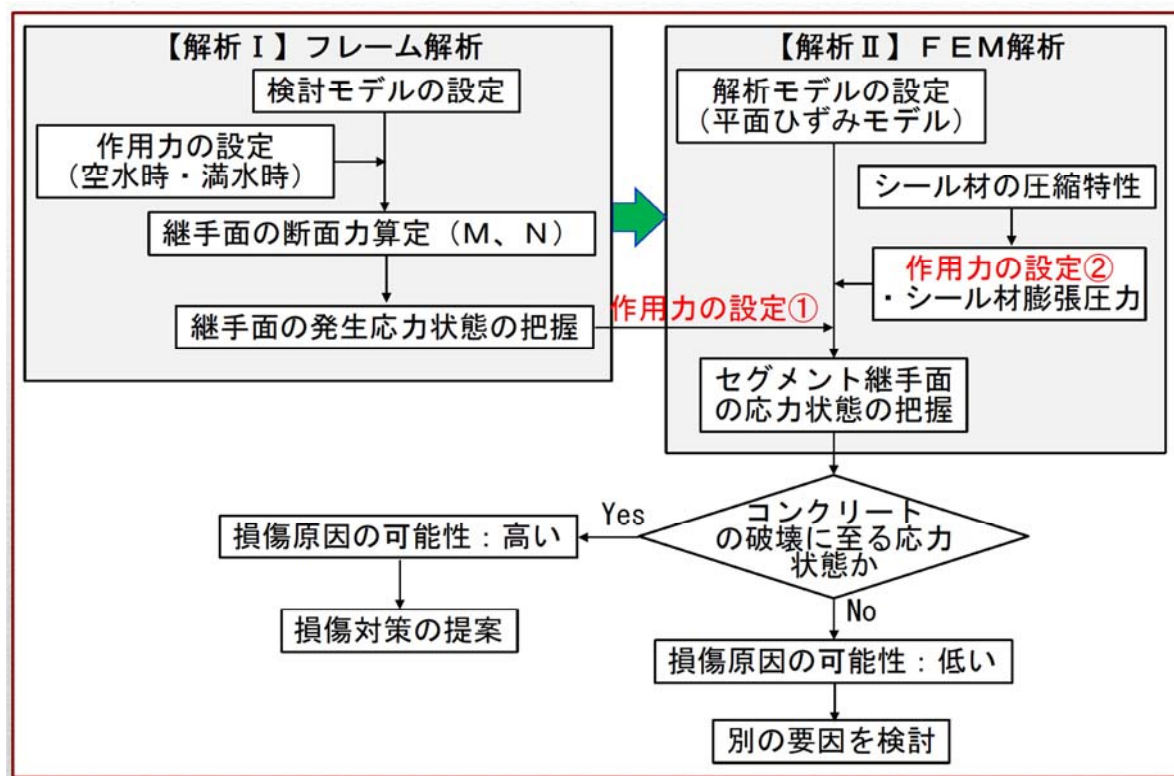


図-2.1.1 剥離損傷メカニズムの分析フロー

2.2 フレーム解析による分析

ここでは、トンネル規模が断面変形に与える影響を把握するとともに、別途実施する FEM 解析に用いる作用外力（応力）を算出することを目的として、フレーム解析を実施する。

2.2.1 解析条件

トンネル規模の違いがトンネル横断面の変形ならびに断面力に与える影響を把握することを目的とするフレーム解析では、トンネル規模ならびに荷重条件をパラメータとして解析ケースを設定する。

(1) トンネル規模

トンネルの規模は、RC セグメントの剥離損傷が生じているシールドトンネルの内径は 10m クラスの大口径であること、関西地区では内径 6m 程度の中口径トンネルの施工実績が多いこと等を踏まえ、これらの 2 種類を対象とした。

①case1：大口径トンネル（内径 10m 程度）

②case2：中口径トンネル（内径 6m 程度）

(2) 地盤条件

これまで構築された内水圧の作用する地下貯留管トンネルは、洪積地盤中に構築されることが多い。このことを踏まえ、地盤条件は、トンネル規模によらず土被り 50m の硬質地盤中に構築されるトンネルを対象とし、図-2.2.1 に示す土質構成とした。

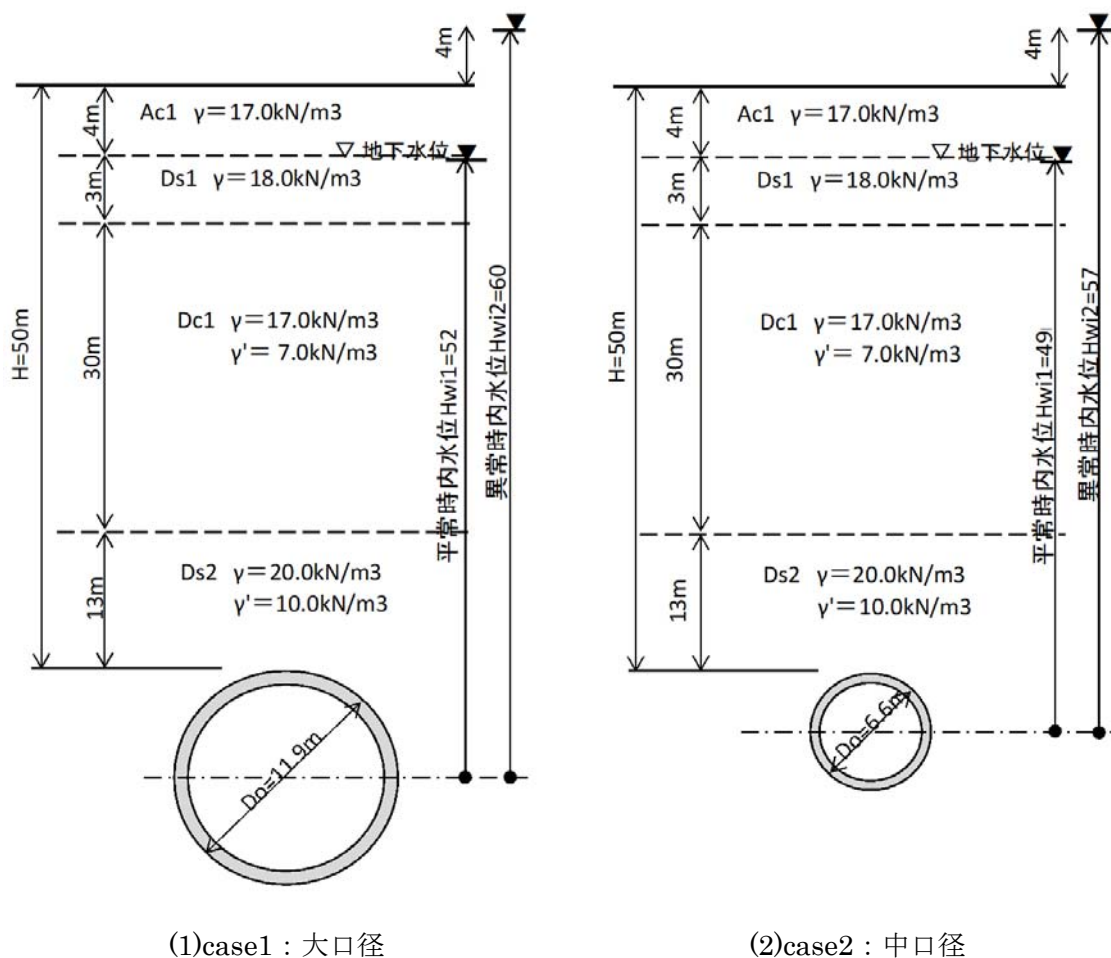


図-2.2.1 検討断面

(3) 地下水位

地下水位は、GL-4m とした。

(4) 内水位

内水位は、「内水圧トンネル設計の手引き」²⁾に定められる内水位のうち、トンネルへの影響が最も大きい異常時内水位を想定した。その大きさは、内水圧作用の有無によるセグメント継手部の挙動が顕著になるように、地下水位以上となる GL+4m に設定した。

(5) 荷重条件

シールドトンネルでは、施工中にセグメントの搬入・組立て時の衝撃、セグメント自重、掘進中のジャッキ推力や裏込め注入が作用する。その後、土圧及び外水圧が作用し、供用時には内水圧が繰り返し作用する状況になる。

本解析では、シールドトンネルへの作用力の変化が断面変形に与える影響を把握することを目的としていることから、「内水圧トンネル設計の手引き」において考慮されている 3 種類の荷重に対して、構造解析を実施することとした。

- ①セグメント自重
- ②外荷重（土圧および地下水圧）
- ③内水圧

(6) 地下水圧および内水圧の作用形状

「内水圧トンネル設計の手引き」では、地下水圧および内水圧の作用形状を鉛直方向（等分布作用）または水平方向（等辺分布）に作用する形状を定めている（図-2.2.2）。これに対し、神田川・環状七号地下調節池Ⅱ期トンネル³⁾をはじめ最近のシールドトンネルの設計基準類では、地下水の作用形状をトンネル法線方向（セグメントリング図心軸に対し直交方向）に作用する形状を採用することが多い。

本解析では、水圧の作用形状の違いによる影響を確認するために、2 種類の作用形状を適用することとした（図-2.2.3）。

- ①「内水圧トンネル設計の手引き」に準拠した作用形状
- ②「神田川Ⅱ期設計基準」に準拠した作用形状

荷重作用 段 階	内 水 圧 作 用 時		
	自 重	外 荷 重	内 水 圧
荷重分布 お よ び 地盤反力 分布	(注) 隣接セグメントを介して周辺地盤の地盤反力を考慮することがある場合もある	①鉛直荷重に対する地盤反力を等分布反力とする場合。 ②底部鉛直荷重として水圧のみを考慮する場合。 (注) 底部鉛直地下水圧が上部鉛直荷重とセグメント自重との和より大きい場合には、上部に鉛直方向の地盤反力を設定する。	

* Winklerの仮定に基づく地盤反力を考慮

荷重分布・地盤反力分布図

(剛性一様リングー地盤ばねモデル計算法およびはりーばねモデル計算法)

図-2.2.2 「内水圧トンネル設計の手引き」の荷重分布²⁾

		①内水圧トンネル設計の手引き	②神田川Ⅱ期設計基準
セグメント自重 (2ケースに共通) 	空水状態 (土圧・水圧)		
	満水状態 (内水圧)		

図-2.2.3 フレーム解析に用いる荷重条件

(7) セグメント構造条件

セグメントの構造は、大口径トンネルおよび中口径トンネルそれぞれに対して供用中の貯留管トンネルを参考に下表に示すとおり設定した。

表-2.2.1 セグメント構造条件

項 目		ケース		case1 大口径	case2 中口径
トンネル諸元	トンネル内径	Di	(m)	10.6	6.0
	トンネル外径	Do	(m)	11.9	6.6
	セグメント厚さ	h	(m)	0.65	0.3
	幅	B	(m)	1.2	1.5
	分割数	n		等9	6(5+K)
	分割角度	θA	(deg)	40	68.571
		θB	(deg)	40	68.571
		θK	(deg)	40	17.143
	セグメント種別			RC	RC
	継手形式			高剛性継手	コーンコネクター
材料諸元	ボルト本数(継手角度)	α		36(10°)	21(11.5°)
	コンクリート設計基準強度	f _{ck}	(N/mm ²)	48	←
	許容圧縮応力度	σ_{ca}	(N/mm ²)	18	←
	鉄筋材質			SD345	←
	許容引張応力度		(N/mm ²)	200	←
解析モデル	リング数	R	ring	3(0.5-1-0.5)	←
	要素分割数	n		288	126
	要素長		(m)	0.123	0.157
	セグメント継手回転ばね定数	K θ	(kN・m/rad)	400,000	35,000
	リング継手せん断ばね定数	K _s	(kN/m)	100,000	100,000

(8) 構造解析モデル

構造解析モデルは、セグメント継手を回転ばねに、リング継手をせん断ばねにモデル化する「はりばねモデル」を適用する。

本解析では、「内水圧トンネル設計の手引き」（下記の表 4.2）を用いて、セグメント継手およびリング継手ともに線形ばねでモデル化した。トンネルの規模毎に設定した継手ばね定数は、表-2.2.1 に示したとおりである。

表 4.2 継手部のばね定数の例

構造案	継手部の ばね定数	本体構造	無次元化した 継手曲げ剛性 k_{θ}^*	せん断ばね 定数 K_s (tf/m)	
①	メタル構造方式	メタル構造	3.0	1.0×10^3	
②	長ボルト方式	鉄筋コンクリート構造	1.0	1.5×10^3	
		合成構造			
③	金具継手方式	鉄筋コンクリート構造	2.1	1.0×10^4	←case1 : 大口径
		合成構造			
④	コッター方式	鉄筋コンクリート構造	1.0	1.0×10^4	←case2 : 中口径
		合成構造			
⑤	嵌合方式	合成構造	1.0	$G \cdot \frac{b \cdot h}{L}^*$	

無次元化した継手曲げ剛性(回転ばね定数)

$$K_{\theta}^* = K_{\theta} \cdot r / E I$$

ここに、 K_{θ} : 回転ばね定数 (tf・m/rad)

r : セグメントリングの図心半径 (m)

$E I$: セグメント単体の曲げ剛性 (tf・m²)

$$* K_s = G \cdot \frac{b \cdot h}{L}$$

K_s : リング間せん断ばね定数

G : せん断弾性係数

b : 解析モデルの梁の長さ

h : 桁高

L : リング間継手をはさむ 2 リングの中心間距離

(9) 解析結果の評価

フレーム解析によりセグメント接手部の断面力を算出し、セグメント継手部の発生断面力から FEM 解析に用いる作用外力（応力）を算出することとした。

2.2.2 解析結果

(1) 大口径トンネル

大口径トンネルのフレーム解析結果として、セグメント継手の発生断面力ならびに応力度の一覧を表-2.2.2に示す。これよりわかることを以下に列挙する。

- ・土圧および地下水圧が作用する空水状態では軸圧縮力が卓越し、すべてのセグメント継手が全圧縮状態となっている。
- ・トンネルに内水圧が作用する（満水状態になる）と、セグメントの継手面の多くで引張力が作用する状態に移行している。これは、軸圧縮力の減少により曲げモーメントが支配的となってセグメント継手に回転変形が生じやすくなるためと考えられる。
- ・内水圧の作用により鉛直変形量は僅かに減少する一方、水平変形量は2mm弱ほど増加し、スプリングライン付近（節点番号：57、89、217）のセグメント継手において空水時よりも高い圧縮応力が発生している。
- ・スプリングライン付近にあるセグメント継手のコンクリート圧縮応力 σ_c は、水圧の作用形状によらず内水圧の作用により増加する傾向を示す。
- ・セグメント継手のコンクリート圧縮応力ならびに引張応力は、空水状態および満水状態ともに設計で扱う許容応力度を満足する水準にある。

(2) 中口径トンネル

中口径トンネルのフレーム解析結果として、セグメント継手の発生断面力ならびに応力度の一覧を表-2.2.3に示す。これよりわかることを以下に列挙する。

- ・土圧および地下水圧が作用する空水状態では軸圧縮力が卓越し、すべてのセグメント継手が全圧縮状態となっている。
- ・トンネルが満水状態になると、トンネルの鉛直変形量は減少する一方、水平変形量は増加しているが、大口径トンネルのようにコンクリート圧縮応力が増加するセグメント継手は認められず、すべての継手で減少傾向を示す。
- ・セグメント継手のコンクリート圧縮応力ならびに引張応力は、空水状態および満水状態ともに設計で扱う許容応力度を満足する水準にある。

(3) トンネル規模の違いによる評価

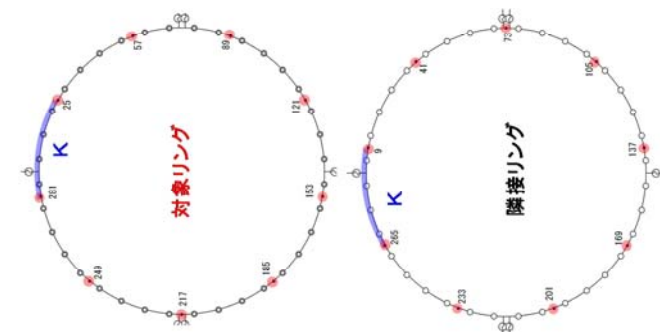
トンネルに内水圧が作用した場合、大口径トンネルのほうがトンネルの頂部と底部の水頭差が大きく、その影響を受けてセグメント継手部のコンクリート圧縮応力の変化も顕著になったものと考えられる。

以上より、トンネル規模が大きいほど、内水圧の影響を受けてトンネルが変形しやすいものと考えられる。

表-2.2.2.2 大口径トンネルにおけるセグメント継手の発生断面積および応力一覧

節点番号	【地下水圧・内水圧の作用：内水圧を引く】						【地下水圧・内水圧の作用：鉄道総研】					
	空水状態			満水状態(異常時内水圧作用時)			空水状態			満水状態(異常時内水圧作用時)		
	曲げモーメント kN・m	軸力 kN	せん断力 kN	σ _c N/mm ²	σ _t N/mm ²	σ _c N/mm ²	曲げモーメント kN・m	軸力 kN	せん断力 kN	σ _c N/mm ²	σ _t N/mm ²	σ _c N/mm ²
25	151.7	4089.6	-21.1	8.6	全圧縮	169.5	352.7	-245.0	4.2	82.8	全圧縮	10.2
57	-302.3	4370.5	-39.4	10.1	全圧縮	-350.0	706.5	-29.0	13.7	217.8	全圧縮	9.7
89	-186.3	4423.5	102.5	8.6	全圧縮	-189.1	787.2	110.0	4.8	5.6	全圧縮	13.4
121	155.6	4352.1	97.5	9.1	全圧縮	167.6	755.9	104.0	4.0	30.8	全圧縮	10.8
153	258.0	4338.3	-34.9	10.3	全圧縮	275.6	744.1	-39.0	6.7	110.2	全圧縮	14.3
185	-14.3	4383.9	-125.2	7.0	全圧縮	9.4	773.4	-127.7	1.4	全圧縮	9.8	12.8
217	-298.4	4427.4	-49.3	10.2	全圧縮	-322.6	776.9	-71.4	11.8	157.2	全圧縮	8.1
249	-140.7	4238.1	176.5	7.7	全圧縮	-172.5	543.2	208.4	5.4	43.7	全圧縮	14.0
281	380.4	3945.9	92.5	11.3	全圧縮	433.5	220.2	105.1	10.6	318.2	全圧縮	11.5
頂部鉛直変位 σ _{v1}	11.12					13.54	531					6.74
底部鉛直変位 σ _{v2}	1.98					-0.59	1223					10.17
鉛直変形量 σ _v =σ _{v1} +σ _{v2}	13.10					12.94	1754					16.91
左側水平変位 σ _{h1}	5.09					6.35	7.13					8.14
右側水平変位 σ _{h2}	4.69					5.83	6.77					7.69
水平変位量 σ _h =σ _{h1} +σ _{h2}	9.79					12.18	1390					15.83

※トンネル変形量の符号
・鉛直方向 縮む方向を正
・水平方向 拡がる方向を正



【凡例】
・曲げモーメント
黒字：正曲げ(外面側圧縮)
赤字：負曲げ(内面側圧縮)
赤字：空水時から圧縮応力が増加

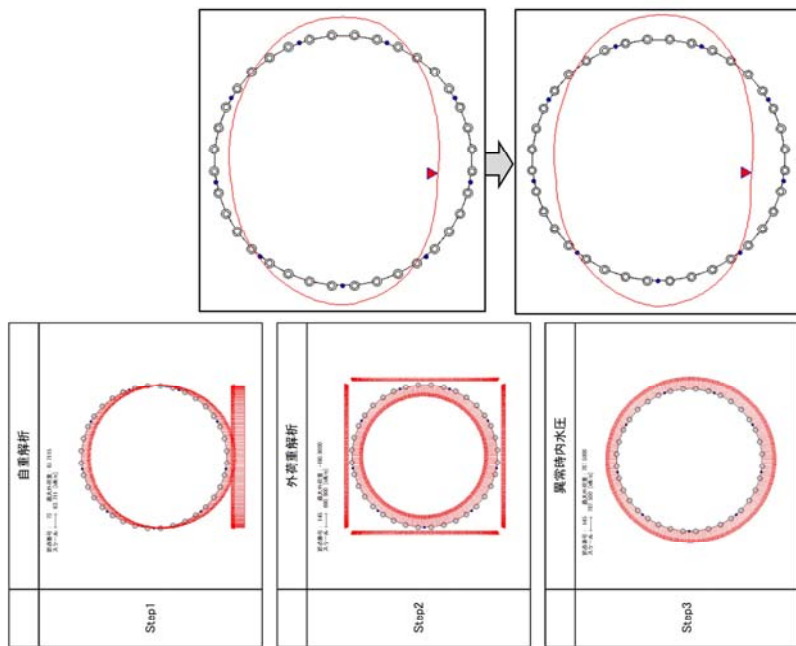
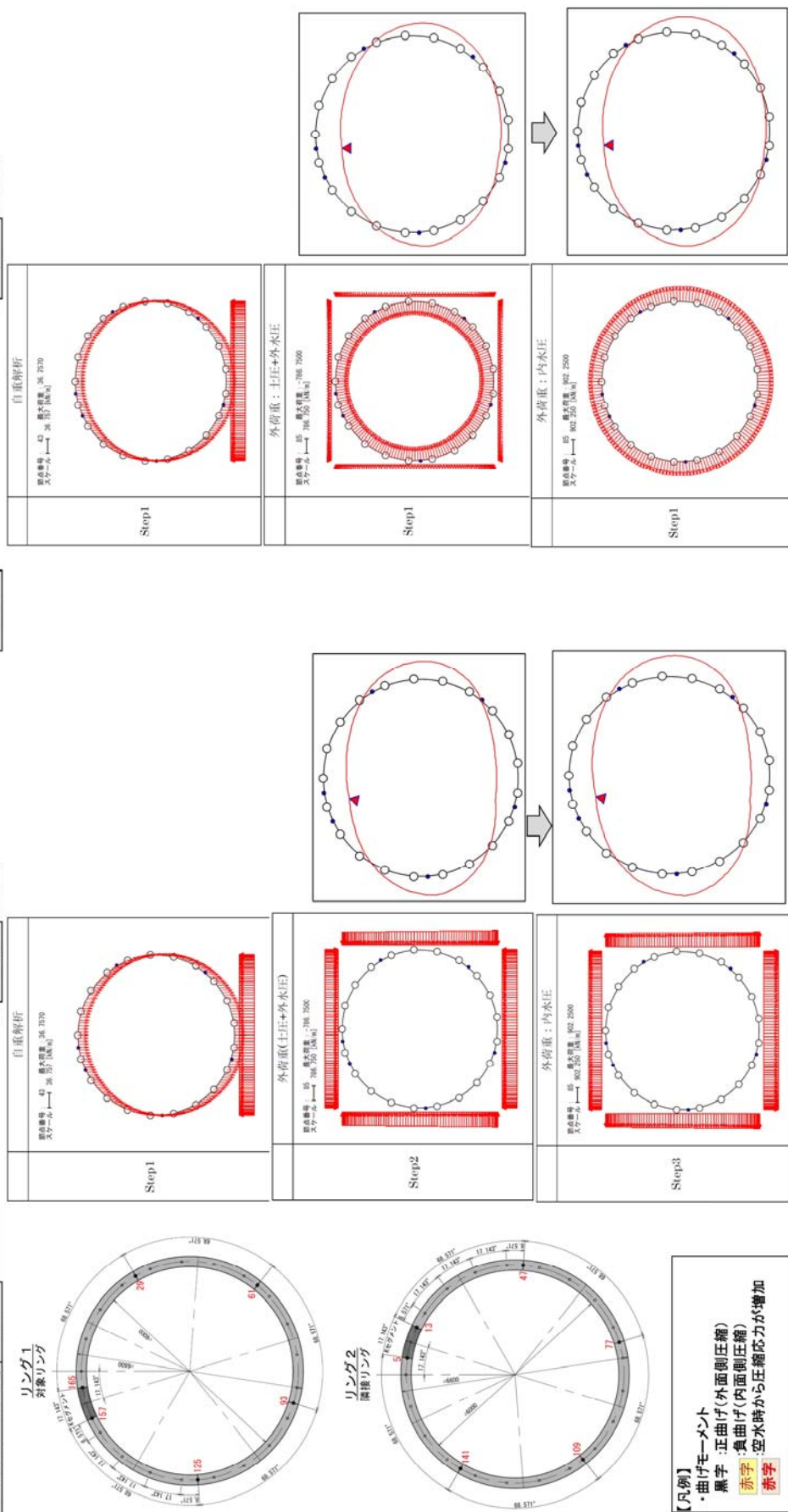


表-2.2.2.3 中口径トンネルにおけるセグメント継手の発生断面力および応力一覽

	【水圧:全体系						【水圧:要素系】						【水圧:要素系						【水圧:要素系】							
	空水時			異常時内水圧作用時			空水時			異常時内水圧作用時			空水時			異常時内水圧作用時			空水時			異常時内水圧作用時				
節点番号	曲げモーメント kN・m	軸力 kN	せん断力 kN	σ_{σ} N/mm ²	σ_t N/mm ²	σ_c N/mm ²	曲げモーメント kN・m	軸力 kN	せん断力 kN	σ_{σ} N/mm ²	σ_t N/mm ²	σ_c N/mm ²	曲げモーメント kN・m	軸力 kN	せん断力 kN	σ_{σ} N/mm ²	σ_t N/mm ²	σ_c N/mm ²	曲げモーメント kN・m	軸力 kN	せん断力 kN	σ_{σ} N/mm ²	σ_t N/mm ²	σ_c N/mm ²		
断面力	29	-16.8	2886.2	-45.2	6.9	全圧縮	-16.3	2896.2	-48.7	1.4	全圧縮	-16.3	2859.6	-34.6	6.4	全圧縮	-16.3	2859.6	-34.6	6.4	全圧縮	53.9	-37.1	2.8	62.6	N/mm ²
	61	-22.1	2904.7	70.0	7.2	全圧縮	-22.7	285.2	63.7	1.8	全圧縮	-22.7	2858.5	44.0	6.6	全圧縮	-11.0	252.8	38.2	1.0	全圧縮	252.8	38.2	1.0	全圧縮	
	93	48.9	2865.1	-44.9	8.3	全圧縮	49.4	238.7	-53.1	7.5	131.2	32.6	2893.0	-28.3	7.6	全圧縮	32.7	287.3	-35.1	3.3	10.7					
	125	-48.5	2936.9	12.2	8.4	全圧縮	-48.4	328.8	7.9	6.1	63.6	-36.7	2732.0	-0.9	7.5	全圧縮	-36.6	126.3	-5.1	6.2	136.2					
	157	15.1	2799.4	18.2	6.7	全圧縮	15.4	212.9	15.4	1.2	全圧縮	11.9	2747.8	16.7	6.4	全圧縮	11.9	142.1	15.3	1.0	全圧縮	142.1	15.3	1.0	全圧縮	
	165	39.3	2762.8	28.9	7.7	全圧縮	38.4	179.7	26.4	5.9	106.6	31.4	2773.3	22.1	7.3	全圧縮	31.9	167.6	21.0	4.6	71.9					
	頂部鉛直変位 σ_{v1}	5.67					5.46						6.27				6.11									
底部鉛直変位 σ_{v2}	5.39					4.44						2.10				1.10										
鉛直変形量 $\sigma_v = \sigma_{v1} + \sigma_{v2}$	11.06					9.90						8.37				7.22										
左側水平変位 σ_{h1}	3.99					4.57						2.78				3.36										
右側水平変位 σ_{h2}	4.39					4.97						3.13				3.71										
水平変形量 $\sigma_h = \sigma_{h1} + \sigma_{h2}$	8.38					9.54						5.91				7.07										



2.3 FEMによる継手部挙動の分析

ここでは、過去に実施した貯留管トンネルの現地調査において確認された、セグメント継手付近の剥離損傷のメカニズムを推定することを目的として、二次元 FEM 解析により剥離損傷の再現を試みた。

2.3.1 解析条件

(1) 解析対象

先述のフレーム解析結果を踏まえ、本解析は内水圧の影響を受けやすい大口径トンネルを対象とし、2017 年度に実施した現地調査においてセグメントの損傷が確認された、トンネル側部付近ならびに頂部付近の 2 箇所のセグメント継手に着目することとした。

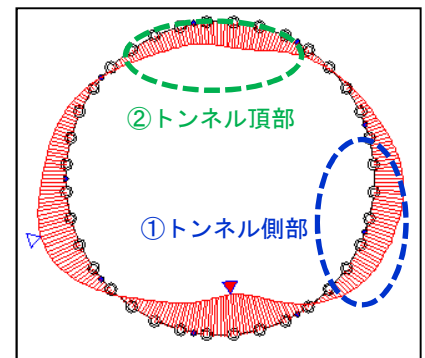


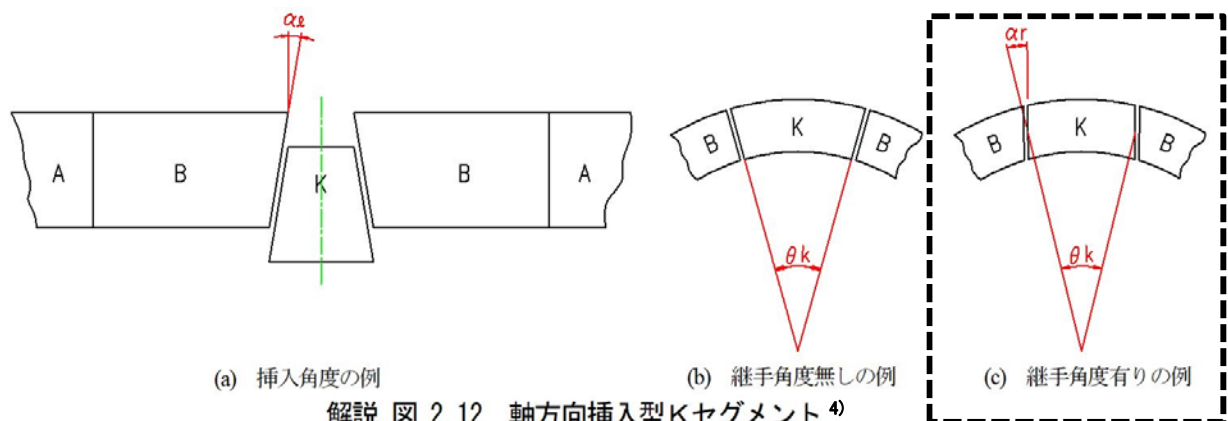
図-2.3.1 解析対象とした継手位置

(2) 継手部の形状

セグメントの継手面は、トンネル内面に対して直角をなす形状が基本となるが、K セグメントについては組立て性を考慮して斜角 α_r を有する形状としていることが多い⁴⁾ (図-2.3.2 参照)。そこで本解析では、継手面の形状を次の 2 種類に対してモデルに反映することとした。

①直角形状：標準的な形状 (A セグメント同士、A・B セグメントの継手面)

②斜角形状：K セグメントの継手角度を考慮したケースとし、継手角度 α_r は 9° とする。



解説 図 2.12 軸方向挿入型 K セグメント⁴⁾

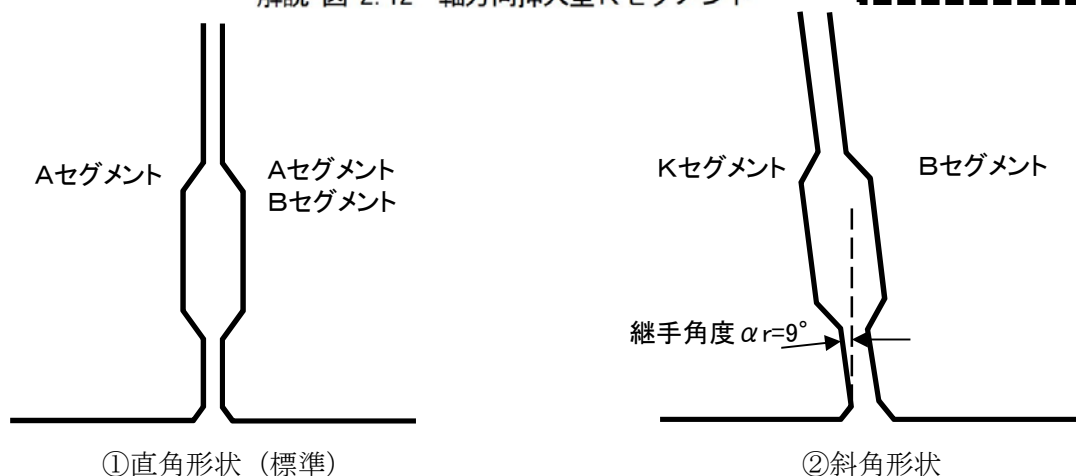
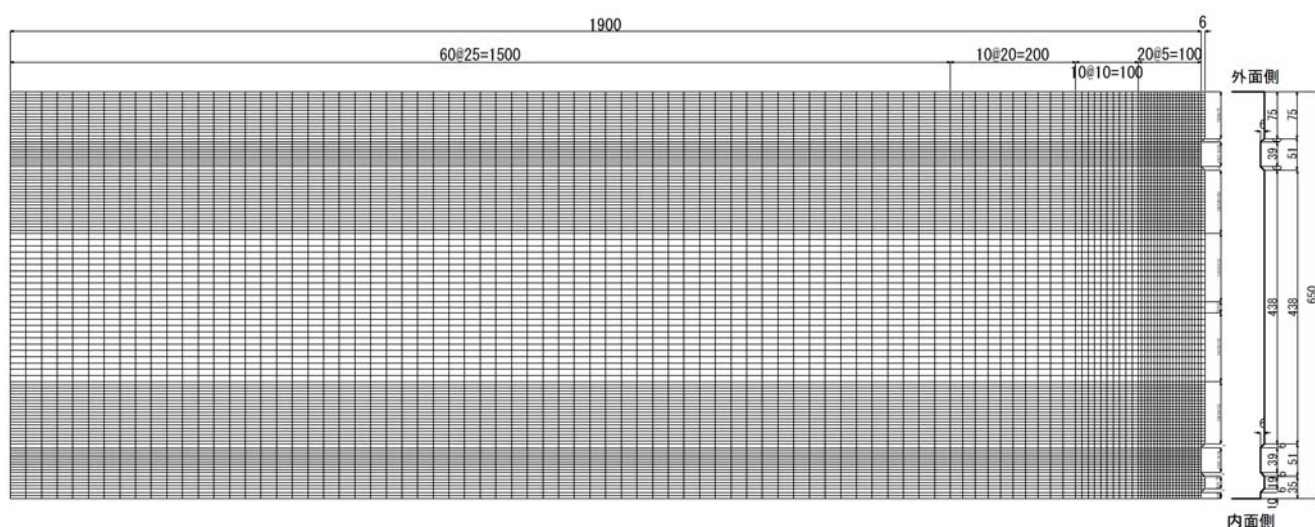


図-2.3.2 セグメント継手面の形状

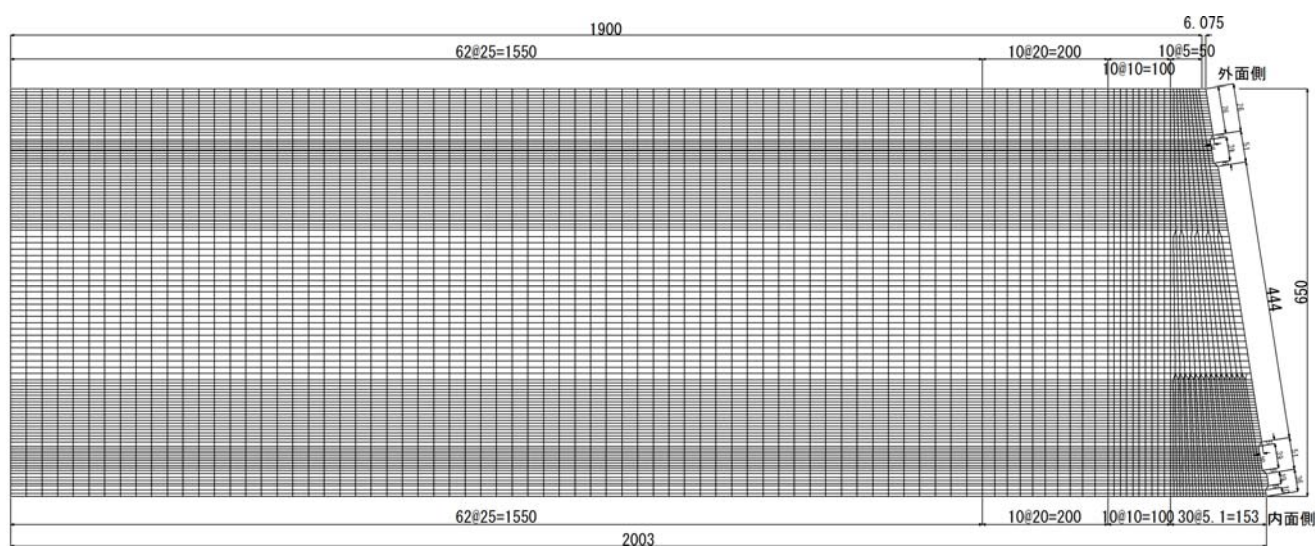
(3) 解析モデル

本解析では、セグメント継手部付近で発生した剥離現象の再現を目的としていることから、セグメント継手面と一定の範囲をモデル化する。ここで、セグメントリングは円弧形状を有しているが、円弧形状のモデルを採用した場合、セグメント継手面に等分布荷重を与えてもセグメント本体には偏心力の影響を受けた内部応力が発生することから、本解析ではモデルを単純化し直線形状を採用することとした。

解析モデルの領域は、鉛直方向が大口径トンネルのセグメント厚さに相当する **65cm** に、水平方向はセグメント厚さの約 3 倍に設定した。また、モデルの境界条件は、セグメントの内外面に相当する上下面やセグメント継手面に相当する右側面を鉛直・水平方向ともにフリーとし、左側面のみ鉛直・水平方向を固定とした。なお、セグメント継手面（左側面）にはシール材の接面応力も作用力として与えられるように、シール溝をモデル化している。図-2.3.3 に解析モデル図を示す。



①直角形状（標準形状）



②斜角形状（Kセグメント、斜角 $\alpha_r = 9^\circ$ ）

図-2.3.3 FEM解析モデル図

(4) セグメントの材料特性

RCセグメントのコンクリートは、表-2.3.1に示す材料を設定した。

表-2.3.1 RCセグメントコンクリートの強度特性

項 目	設定値
設計基準強度 f'_{ck}	48N/mm ²
引張強度 f_{tk}	$0.23f_{ck}^{2/3}=3.0$ N/mm ²
付着強度 f_{bok}	3.6 N/mm ²
せん断強度 τ_{sk}	$0.58f_{ck}^{2/3}=7.7$ N/mm ² 5)
弾性係数 E_c	3.9×10^7 kN/m ²
ポアソン比 ν	0.17

(5) 作用力

セグメント継手面に作用する外力は、セグメントの自重、土圧、地下水圧ならびに内水圧が単独または同時に作用する過程で、継手面に伝達される。また、セグメント継手面には、止水を目的としてシーリング材を設置しているが、これを封入するための反発力や吸水膨張圧力がシーリング溝を介してセグメントに作用することになる。ここでは、既往の研究 6) を参考に、図-2.3.4 に示すシーリング材の体積率と膨張圧力との関係のうち、第二工区の膨張特性を適用した。

これらを踏まえ本解析では、セグメント継手面に伝達される軸力（軸応力）、シーリング材からの膨張圧力を作用力として設定する。

なお、セグメント継手面に伝達される軸応力については、「2.2 フレーム解析による分析」において実施した大口径トンネルの解析結果より、空水状態ならびに満水状態におけるセグメント継手部の発生断面力（曲げモーメント、軸力）を用いて継手面全体の応力分布を算定し、これを作用力とした（表-2.3.2）。

これらの作用力を用いて表-2.3.3に示す解析ケースにて FEM 解析を実施し、継手面の発生応力状態から実態調査にて確認されたセグメントの剥離損傷の再現性を評価することとした。

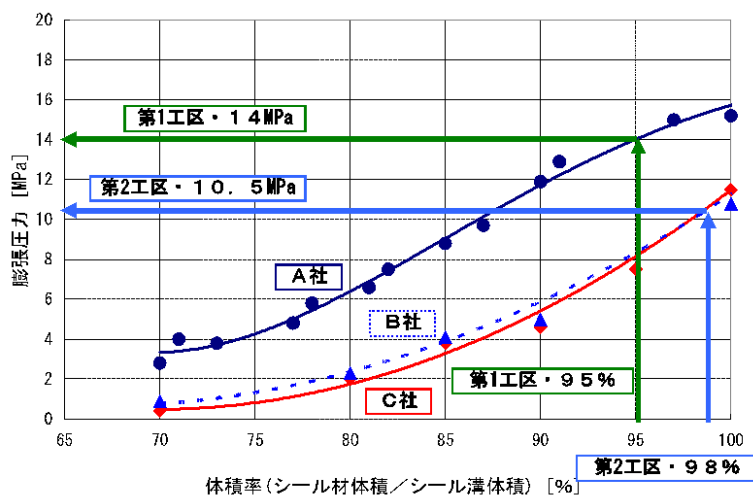


図-2.3.4 シーリング材の膨張特性 6)

表-2.3.2 セグメント接手面の作用力

節点番号	空水状態					満水状態(異常時内水圧作用時)					FEM解析 への適用
	曲げモーメント kN・m	軸力 kN	せん断力 kN	σ_c N/mm ²	σ_t N/mm ²	曲げモーメント kN・m	軸力 kN	せん断力 kN	σ_c N/mm ²	σ_t N/mm ²	
25	204.5	4675.6	-107.6	10.2	全圧縮	211.5	945.5	-139.0	5.1	39.6	
57	-209.2	5012.2	-151.4	9.7	全圧縮	-238.9	1287.8	-138.7	5.5	全圧縮	
89	-463.8	5110.7	35.7	13.4	全圧縮	-461.3	1381.4	41.2	15.0	137.7	トンネル側部
121	219.3	4795.6	307.8	10.6	全圧縮	226.3	1065.3	306.9	5.4	37.4	
153	549.2	4668.1	-128.8	14.8	全圧縮	555.2	937.9	-128.3	13.6	304.1	
185	-222.0	4974.9	-278.8	9.8	全圧縮	-214.8	1244.6	-279.3	4.9	全圧縮	
217	-405.6	5115.6	116.0	12.6	全圧縮	-416.8	1388.3	102.8	12.6	84.7	
249	14.0	4845.4	144.2	8.1	全圧縮	-15.3	1120.2	160.1	1.7	全圧縮	
281	316.1	4567.0	40.4	11.5	全圧縮	357.1	831.8	54.9	8.7	161.5	トンネル頂部

セグメント継手面の作用力

位置	空水状態			満水状態		
	L mm	σ_c N/mm ²	模式図	L mm	σ_c N/mm ²	模式図
トンネル 側部 (負曲げ)	0	2.4	外面	0		外面
				417	0.0	
	650	13.4	内面	650	15.0	内面
トンネル 頂部 (正曲げ)	0	11.5	外面	0	8.7	外面
				240	0.0	
	650	1.7	内面	650		内面

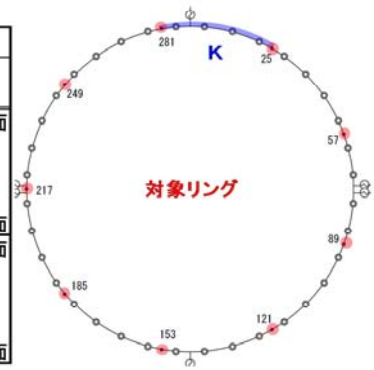


表-2.3.3 解析ケース一覧

CASE	対象位置		継手面の形状		継手面の応力状態		シーリング材膨張圧力	
	トンネル側部 (負曲げ)	トンネル頂部 (正曲げ)	直角	斜角	空水状態	満水状態	無	有
1-1	●		●		●		●	
1-2	●		●		●			●
1-3	●		●		●			●
2-1	●		●			●	●	
2-2	●		●			●		●
3-1		●	●		●			●
3-2		●	●			●		●
4-1		●		●	●		●	
4-2		●		●	●			●
4-3		●		●		●		●

2.3.2 解析結果

ここでは、「2.3.1 解析条件」にしたがって実施した FEM 解析結果を示すとともに、それらの結果から継手部の剥離損傷の可能性を評価した。なお、本節で示す応力度コンター図については、剥離損傷の可否を容易に判定しやすくするために、せん断強度 $\tau_{sk}=7.7 \text{ N/mm}^2$ を閾値とし、それ未満の発生応力については剥離損傷の可能性が低いものとして青色で表示している。

(1) トンネル側部

トンネル側部における FEM 解析結果を表-2.3.4 ならびに表-2.3.5 に示す。これらより得られた知見を以下に列挙する。

- ・現行の設計を再現したフレーム解析により得られた継手面の応力分布を継手面の作用力として与えたケースでは、空水状態ならびに満水状態ともに剥離に至る応力状態は確認されない。
- ・継手面の応力分布に加えてシール材の体積率 98% に相当する膨張圧力を作用力として考慮した場合、空水状態ならびに満水状態ともにセグメント内面側においてせん断強度を超過する応力が確認された。
- ・せん断破壊面（剥離面）の角度は、空水状態が 12° と浅く、満水状態では 30° となった。これは大口径トンネルの実態調査において確認された剥離損傷の角度と同程度である。
- ・シール材の体積率 98% に相当する 10.5 MPa の膨張圧力が作用するとセグメント内面側において剥離損傷に至る可能性が確認されたが、この膨張圧力が 50% 程度の水準（体積率 88% 程度）であれば、剥離損傷に至る応力は確認されない（表-2.3.5）。

以上のことから、現行の設計において想定する設計荷重に加えてシール材から高い膨張圧力が作用すると、トンネル側部において剥離損傷に至る可能性が高いと考えられる。

(2) トンネル頂部

トンネル頂部における FEM 解析結果を表-2.3.6～表-2.3.8 に示す。これらより得られた知見を以下に列挙する。

- ・表-2.3.6 に示す継手面の形状の違い（直角 vs 斜角）による発生応力を比較すると、空水状態ならびに満水状態ともに斜角形状のほうが大きいものの、その差は最大で 9% 程度と小さい水準である。
- ・表-2.3.7 より、空水状態では、シール材の反発力を考慮するとセグメント外面側のシール位置でせん断強度を超過する応力状態が確認されるものの、その範囲はセグメント外面にまで達していないことから、剥離損傷には至らないと考えられる。
- ・満水状態では、シール材の膨張圧力を考慮しても、セグメント内外面ともにせん断強度を超過する応力状態は確認されない。
- ・セグメント内面側の剥離損傷を再現するためには、シール材の膨張圧力に加えてセグメント内面側の端部に 28 MPa 程度の作用力を考慮する必要がある。ただし、破壊面の角度は 40° となり、大口径トンネルの実態調査において確認された剥離の角度とは異なっている（表-2.3.8）。

以上のことから、トンネル頂部においては、現行の設計で想定する継手面の作用力に加えてシール材の膨張圧力を考慮しても、セグメント内面側の剥離現象を再現できず、これを再現するためには、継手面同士の接触による局所的な荷重の作用や別の要因による推察が必要である。

(3) まとめ

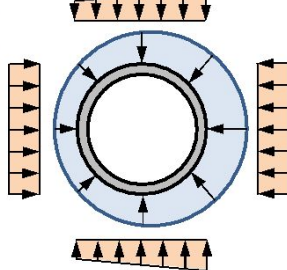
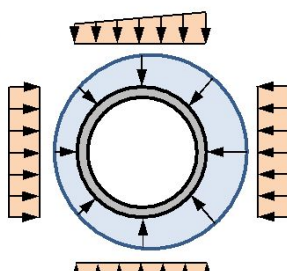
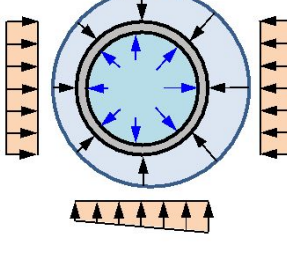
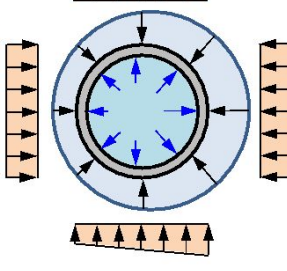
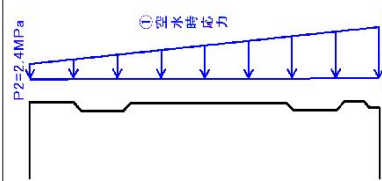
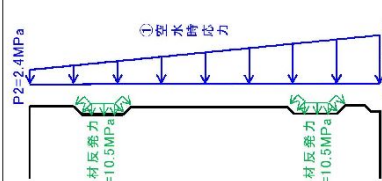
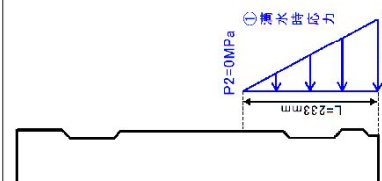
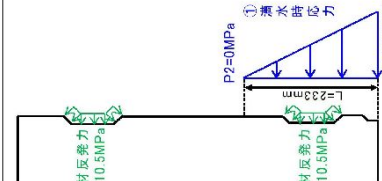
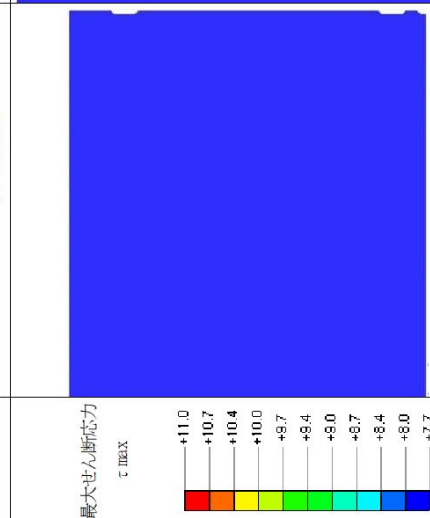
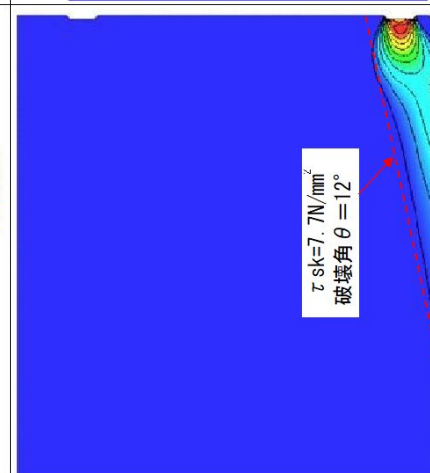
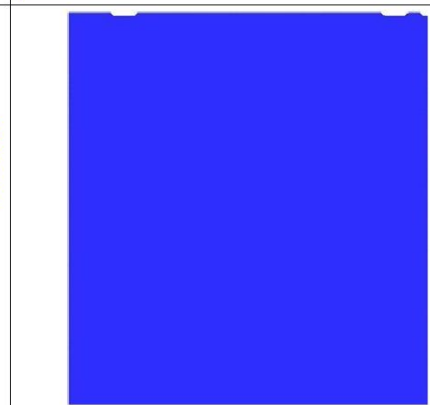
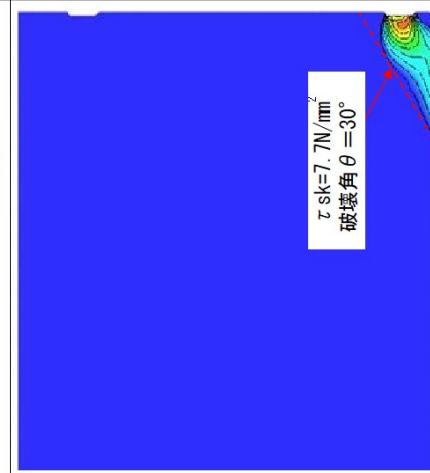
以上より、FEM 解析による損傷原因の分析結果をまとめると、以下のとおりである。

- ・トンネル側部においては、土水圧や内水圧の作用に加えてシール材の高い膨張圧力を考慮することにより、セグメント内面の剥離損傷を再現できる。貯留管トンネルの場合、貯水時にシール材が吸水膨張し、排水後（空水状態）に継手面の封入によってシール材の反発力が増加することで、セグメ

ント内面の発生応力が増加し剥離損傷に至るリスクが高まることから、シール材の材料特性に留意する必要がある。

- ・トンネル頂部においてはフレーム解析において正曲げの応力状態にあるため、設計で想定される荷重条件下にシール材の膨張圧力を考慮してもセグメント内面側の剥離現象を再現できない。このため、別の要因による推察が必要である。

表-2.3.4 トンネル側部の FEM 解析結果(1) (直角モデル)

	①空水状態 (CASE1-1)	②空水状態+シール材膨張圧 (CASE1-3)	③潜水状態 (CASE2-1)	④潜水状態+シール材膨張圧 (CASE2-2)
作用状態				
継手面 作用力				
最大せん断応力 τ_{max}				

※) 応力度の単位は N/mm^2 、応力の符号は引張応力を正、圧縮応力を負とする。コンター図は、せん断強度 $\tau_{sk}=7.7 \text{ N/mm}^2$ を閾値として表示。

表-2.3.5 トンネル側部の FEM 解析結果(2) (直角モデル)

	①空水状態 (CASE1-1)	②空水状態 + シール材膨張圧 (CASE1-3)	③満水状態 (CASE2-1)	④満水状態 + シール材膨張圧 (CASE2-2)
作用状態				
継手面 作用力				
最大せん断応力 τ MAX				

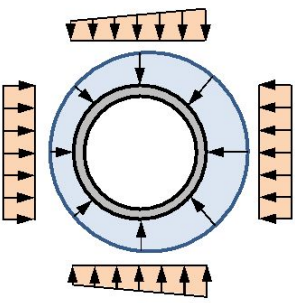
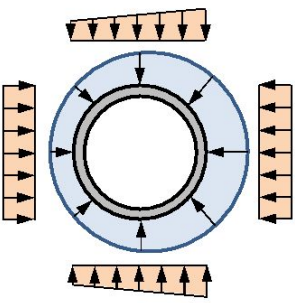
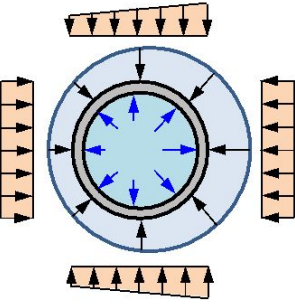
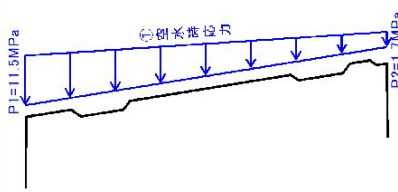
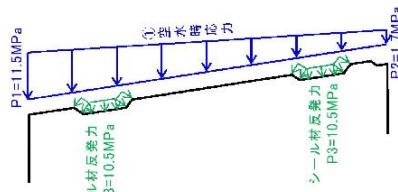
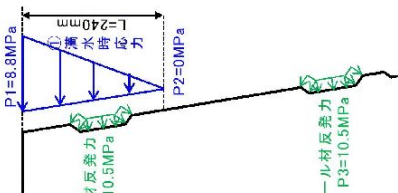
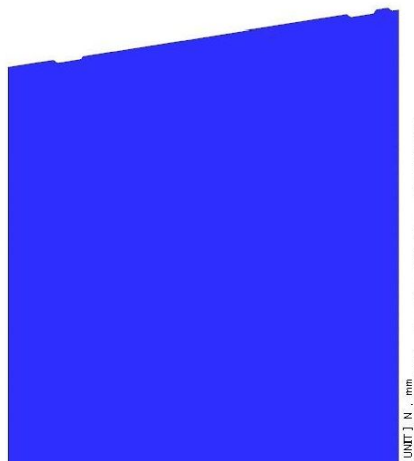
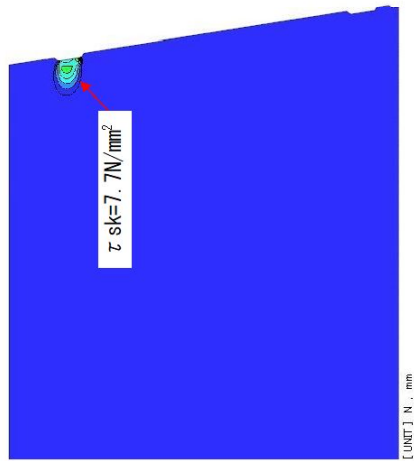
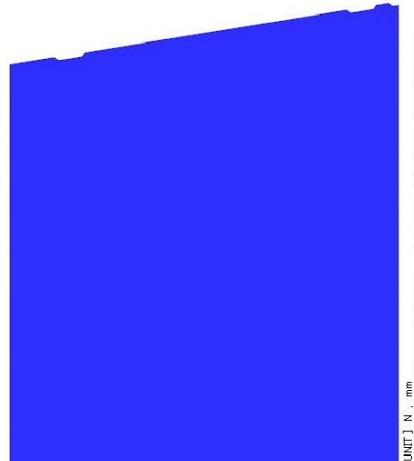
※) 応力度の単位は N/mm²、応力の符号は引張応力を正、圧縮応力を負とする。コンター図は、せん断強度 $\tau_{sk}=7.7 \text{ N/mm}^2$ を閾値として表示。

表-2.3.6 継手形状の違いによる発生応力の比較（トンネル頂部）

	空水状態＋シール材膨張圧		満水状態＋シール材膨張圧	
	直角モデル (CASE3-1)	斜角モデル (CASE4-2)	直角モデル (CASE3-2)	斜角モデル (CASE4-3)
作用状態				
継手面 作用力				
最大せん断応力 τ_{max}				

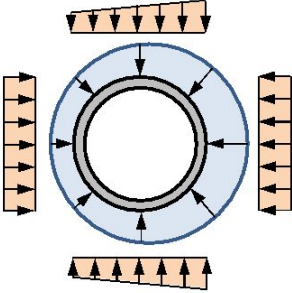
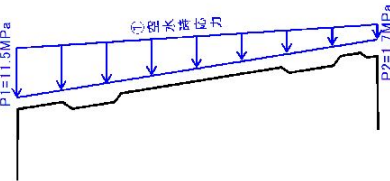
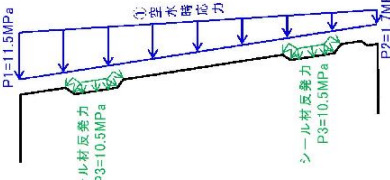
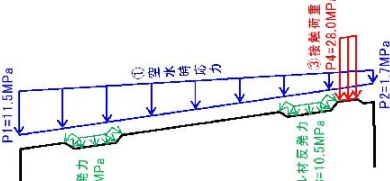
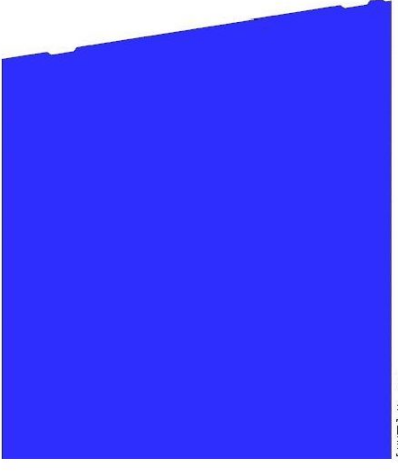
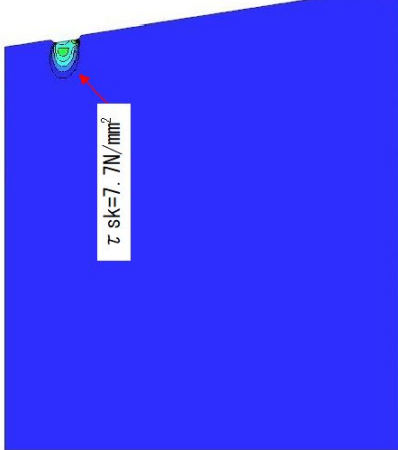
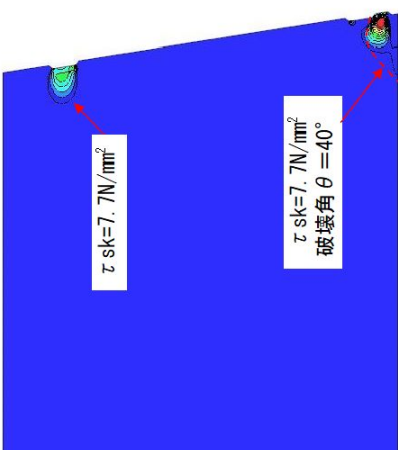
※赤字：コンクリート強度超過

表-2.3.7 トンネル頂部の FEM 解析結果(1) (斜角モデル)

	①空水状態 (CASE4-1)	②空水状態+シール材膨張圧 (CASE4-2)	③溜水状態+シール材膨張圧 (CASE4-3)
作用状態			
継手面 作用力			
最大せん断応力 τ_{max}	 [UNIT] N/mm² [DATA] 4-1 空水状態 , Plane Stress-SMaxShear , STAGE1 STEP1	 [UNIT] N/mm²	 [UNIT] N/mm² [DATA] 4-3 溜水状態+10.5MPa膨張力 , Plane Stress-SMaxShear , STAGE1 STEP1

※) 応力度の単位はN/mm²、応力の符号は引張応力を正、圧縮応力を負とする。コンター図は、せん断強度 $\tau_{sk}=7.7 \text{ N/mm}^2$ を閾値として表示。

表-2.3.8 トンネル頂部の FEM 解析結果(2) (斜角モデル)

	①シール材膨張圧：0 (CASE4-1)	②シール材膨張圧作用 (CASE4-2)	(参考) シール材膨張圧+接触荷重作用
作用状態			
継手面 作用力			
最大せん断応力 τ_{max}	 【UNIT】N/mm 【DATA】4-1 空水状態 . Plane Stress-SMaxShear . STAGE1 STEP1	 【UNIT】N/mm	 【UNIT】N/mm

※) 応力度の単位は N/mm^2 、応力の符号は引張応力を正、圧縮応力を負とする。コンター図は、せん断強度 $\tau_{sk}=7.7 \text{ N/mm}^2$ を閾値として表示

2.4 損傷原因の評価

前節では、トンネル内面の剥離損傷の原因を推定すべく、トンネルの作用外力やシール材の反発力に着目した数値解析によるアプローチを行ったが、トンネル頂部付近の継手面に発生した損傷を定量的に説明するには至らなかった。

一方、本研究会では、これまでに供用中の地下河川トンネルの現地視察や文献調査を実施し、損傷実態について以下の知見を得ている。

- ・継手面付近で確認された損傷は、 $\phi 10\text{m}$ 級の大口径トンネルのみで確認されている。
- ・損傷事例 1 として、損傷の位置は K セグメントに集中し、その規模は深く大きい。損傷個所に使用されたシール材は、いずれも膨張率が高く膨張速度の速いウレタン系のシールに限定される。
- ・損傷事例 2 として、損傷の位置はリング全周に生じ、その規模は浅く小さい。当該箇所のシール溝の位置は内面側に近く、また、シール充填率が大となっている。シール材の種類は複数使用されているが、損傷の発生状況は大差ない。
- ・損傷事例 3 として、損傷の位置はランダムに発生し、延長に対して被害の箇所や程度が異なる。

表-2.4.1 にはトンネル頂部付近の内面側に発生する剥離損傷の要因を示す。以上の知見を踏まえると、大口径シールドトンネルで確認されたセグメント継手部付近の剥離損傷は、セグメントシール材による影響が主要因である可能性が高いと考えられるので、本節ではシール材の反発力や吸水による膨張に着目して損傷との関連性を考察する。さらに、剥離損傷の主要な要因とはなり得ないが、施工時の影響にも着目し、既往の研究を踏まえてその関連性を整理する。

表-2.4.1 トンネル頂部の内面側に発生する剥離現象の要因

分 類		損傷要因の可能性
シール材の影響	シール材膨張の影響	シール材が吸水膨張等によりシール溝からはみ出し、それを支点とする局所応力が作用し損傷に至った可能性がある。
	シール材の膨張速度	貯留時の内水供給によるシール材の膨張スピードが速いほど、損傷が早期に現われる傾向が認められる。
	変動軸力がシール材を介して作用する場合の影響	満水・空水の過程で発生する変動軸力が継手面全体ではなく内面側のシール材を介して局所的に作用し、端部の破壊（剥離）に至る可能性あり。
シール溝の影響	シール溝の設置位置と形状	シール溝の設置位置がセグメント内面に近く、シール材体積率（＝シール材体積/シール溝体積）が大きいシール材の使用により損傷に至る可能性あり。
施工時の影響	セグメント組立ての影響	負の曲げモーメントが発生した状態でトンネル内に貯留・排水が繰り返されると、頂部付近のセグメント継手面では内面側が接触し、剥離損傷に至る可能性がある。
	曲線施工の影響	曲線施工の際、縦に変形した状態でトンネル内に貯留・排水が繰り返されると、頂部付近のセグメント継手面で内面側が接触し、剥離損傷に至る可能性がある。ただし、損傷が確認された曲線部では縦型変形や横型変形の有無に拘わらず、損傷が発生している例があることから、縦型変形が損傷の主要要因とは考えられない。

2.4.1 シール材の影響について

(1) シール材の設計思想に基づく一般的な考え方

セグメントシール材の設計は、一般に、シール材の接面応力が長期的に緩和（減少）されるものとして、その緩和の程度を安全率として設定し、設計を行っている^{7),8)}。

これは、止水設計法の提案に際し、様々なメーカーのシール材を用いて止水試験や応力緩和試験を実施しており、各試験において接面応力はメーカーによって増加するものや減少するものなど様々な特性が確認されたことから、これらを踏襲できるよう安全側に設定したものと考えられる。

応力緩和試験結果をみると、水浸漬によりシール材の接面応力が増加し、3年経過時においてもその値が維持されるケースが確認される。このことから、シール材の種類によっては、吸水膨張による影響が長期間に及ぶ可能性があるといえる。

(2) シール材反発力の長期観測事例

既往の研究によると、シール材の幅方向の位置が異なる3点に対してシール材圧縮応力を計測した結果、圧縮応力は水に触れている箇所に近い内側が最も高く、接触面から離れるにしたがって減少する傾向を示すことが確認された⁹⁾。

また、長期試験より予測される100年後の膨張応力は 4.846N/mm^2 、緩和応力は 1.166N/mm^2 に収束し、さらに形状や特徴の異なる3種類のシール材を用いて90日間膨張応力試験および緩和応力試験より、100年後の接面応力は、シール材の形状によって異なるものの初期応力に対し2倍以上と予測されるケースもあったことが報告されている¹⁰⁾。

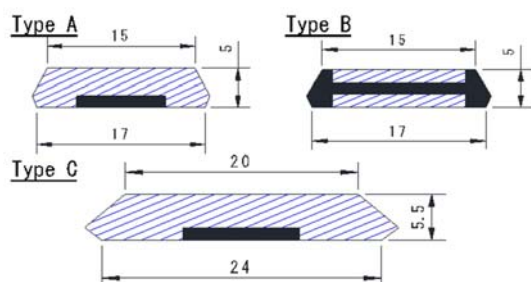


図-4. 各種シール材の形状

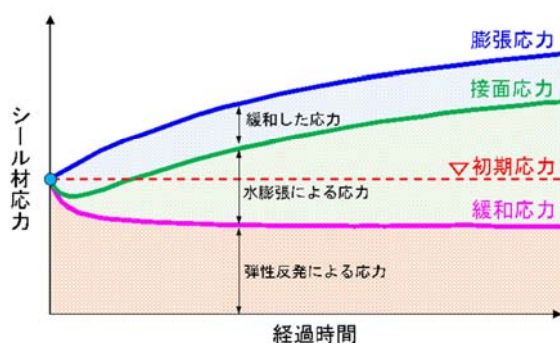


図-1 シール材に作用する応力の関係

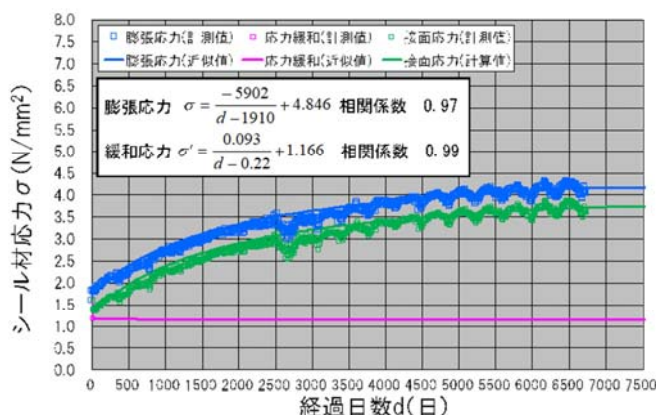


図-3 シール材の応力（長期試験）

図-2.4.1 水膨張シール材の長期試験の例¹⁰⁾

(3) シール材膨張の影響

シール材の接面応力は、先述のとおり時間経過とともに緩やかに上昇し、その応力は水に触れる時間が長いトンネル内面側が最も高くなることが確認されている。

トンネル内に貯水する過程において、トンネル内が満水状態になるとトンネル頂部付近の継手部ではトンネル内面が開き、シール材は吸水膨張作用を受ける。その後、空水状態となり継手面が閉じようとしても、吸水膨張したシール材はすぐには収縮できず体積増加分に相当する接面応力が増加しシール溝に作用する。この状態から次の貯留（満水）状態となるとシール材の吸水膨張による接面応力はさらに増加し、この状況が繰り返されると、シール材は継手面のクリアランスから内面側へ膨張し、空水時にはシール溝からはみ出したシール材が支点となって軸力が伝達され局所的な応力の発生に至る可能性があると考えられる。

ここで、本研究会にて実施した実態調査において、剥離損傷が確認された大口径シールドトンネルは供用直後から剥離損傷が確認され、数年程度の期間で損傷の範囲が拡大していることを考えると、シール材の接面応力の増加は小さいレベルにあると考えられる。このため、シール材の膨張圧力のみの影響とは考え難く、損傷要因がシール材の影響だとすれば、シール溝からはみ出したシール材を支点として局所的な応力の増加に至ったものとする。

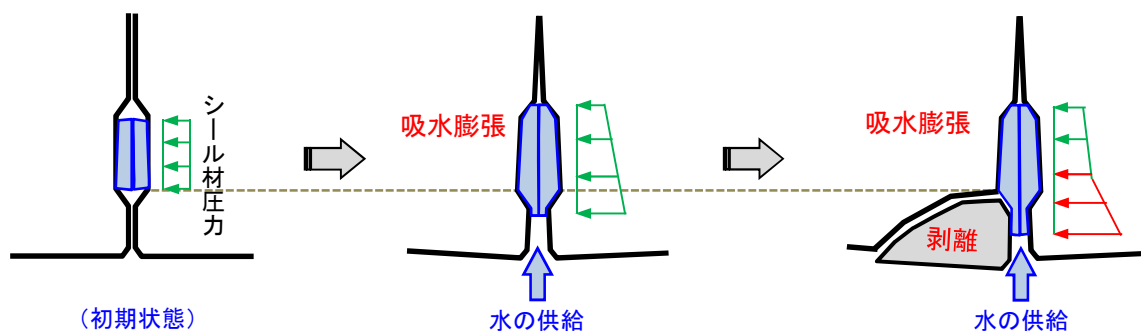


図-2.4.2 貯水の繰り返しによるシール材の膨張履歴の概念

(4) 変動軸力がシール材を介して作用する場合の影響

大口径トンネルの場合、トンネル内が満水状態から空水状態となる過程で発生する軸圧縮力の変動（増分）は、3,000～4,000kNに達する場合がある。この軸力変動が吸水膨張したシール材を支点として継手面に伝達されると仮定した場合、その接面応力の増分は30MPa程度に達する。この値は、前節で報告したように、セグメント継手の端部がせん断破壊に至る際のシール材応力の算定を目的としたFEM解析により確認された接面応力を上回ることから、シール材が支点となって作用した場合には、剥離損傷する可能性が高いと考えられる。ただし、この現象はトンネルの頂部に限らず、すべての継手位置に生じる可能性がある。

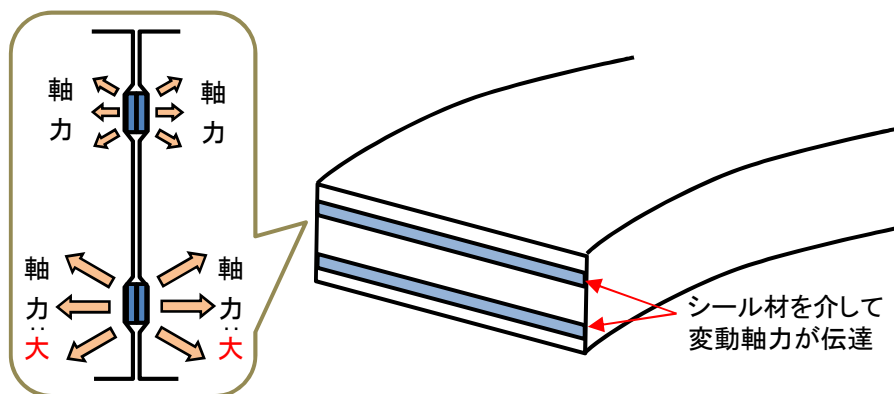


図-2.4.3 セグメント継手面の軸力伝達の概念

2.4.2 施工時の影響について

トンネル頂部の損傷要因として、施工時荷重の影響が考えられる。ここでは、既往の文献より、その可能性について整理する。

(1) セグメント組立ての影響

既往の研究によると、セグメント組立時の断面力は、トンネル頂部付近において負の曲げモーメントが発生する場合があることが確認されている。また、後続セグメントを組立てる際のジャッキ操作とセグメントを1ピース組み立て毎に曲げモーメントの極性が異なり、大きく変動していることが確認されている。さらに、断面力変動はピースの取り付けのみによる影響ではなく、組立時のジャッキ操作およびジャッキ圧の開放や掘進時のジャッキ推力がセグメントに偏荷重を与えていたりするなどの施工時荷重が大きく影響しているためと推察されている¹¹⁾。

以上より、セグメント組立て時の断面力の変化はランダムであり、負の曲げモーメントが発生するのは必ずしも頂部とは限らないが、セグメントの組立て時に負の曲げモーメントが発生した継手位置では、トンネル内水位の変動に伴ってトンネル内面が接触する可能性がある。ただし、その根拠を明確に示すデータが乏しく、セグメント組立ての影響が損傷の主要要因とは考えられない。

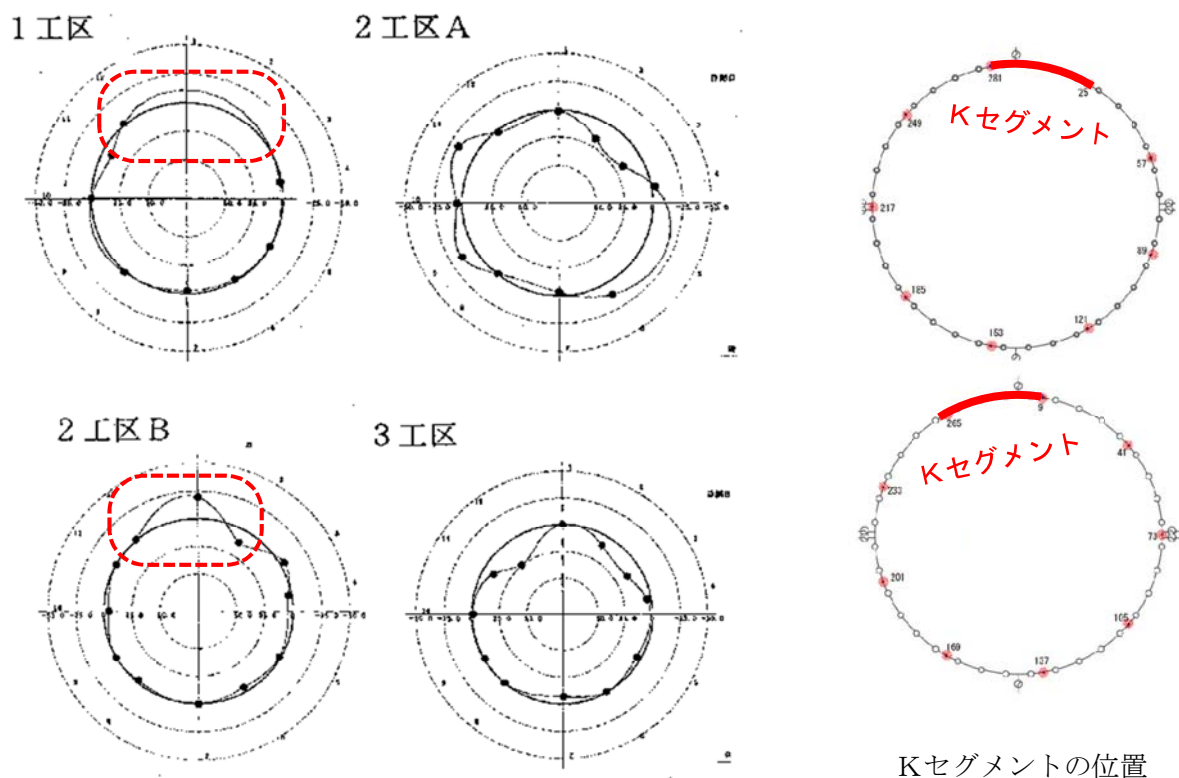


図-2.4.4 セグメント組立直後の曲げモーメント分布¹¹⁾とKセグメントの位置

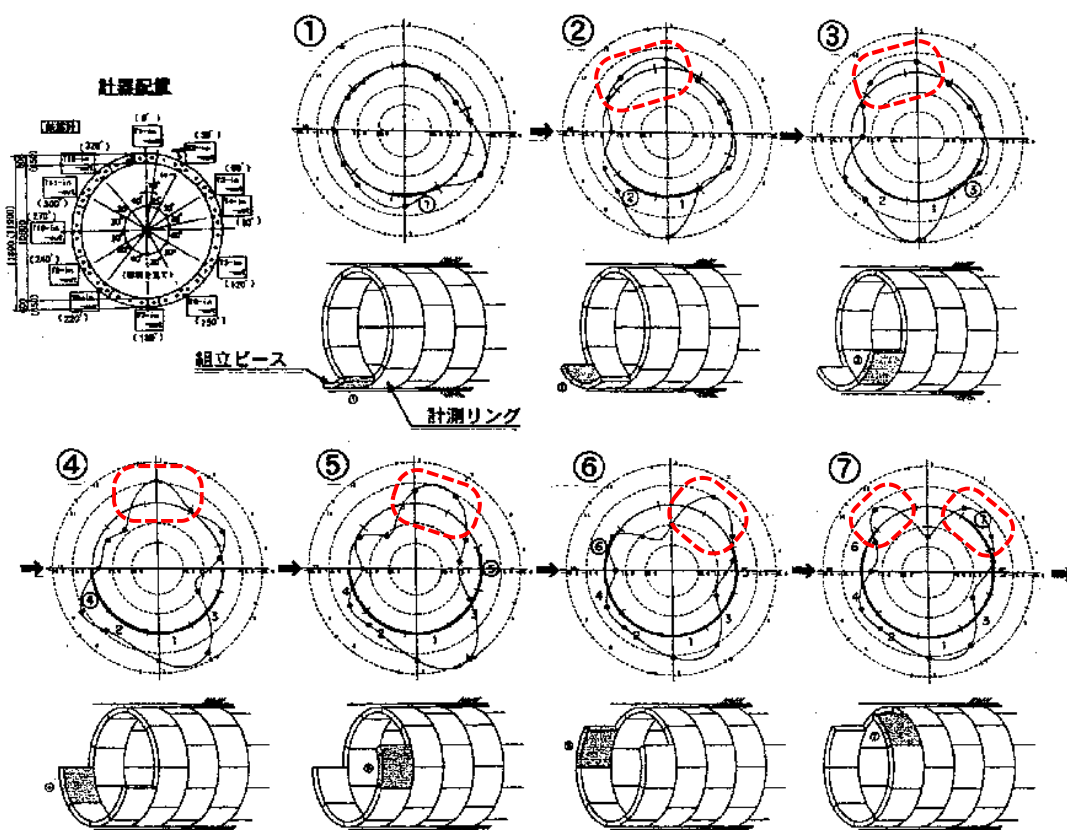


図-2.4.5 セグメント組立時の曲げモーメントの変動 ¹¹⁾

(2) 曲線施工の影響

シールドトンネルの真円度の測定事例より、曲線部区間ではトンネルの断面形状が縦型に変形した事例が報告されている¹²⁾、¹³⁾。この場合、トンネルの頂部付近ではトンネル内面側が圧縮応力（負の曲げモーメント）の状態となりやすく、縦型に変形した状態でトンネル内に貯留・排水が繰り返されると頂部付近のセグメント継手面では内面側が接触し、剥離損傷に至る可能性が考えられるが、その根拠を明確に示すデータが乏しい。また、損傷が確認された曲線部では縦型変形や横型変形の有無に拘わらず、損傷が発生している例があることから、縦型変形が損傷の主要要因とは考えられない。

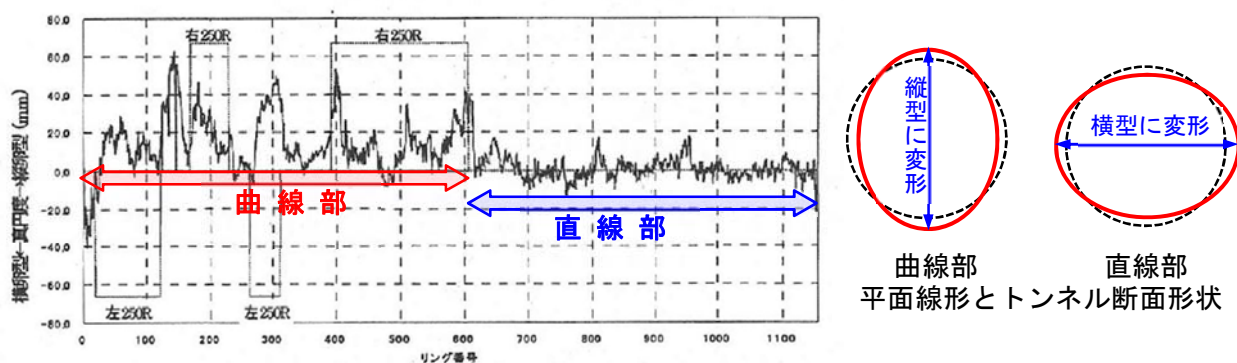
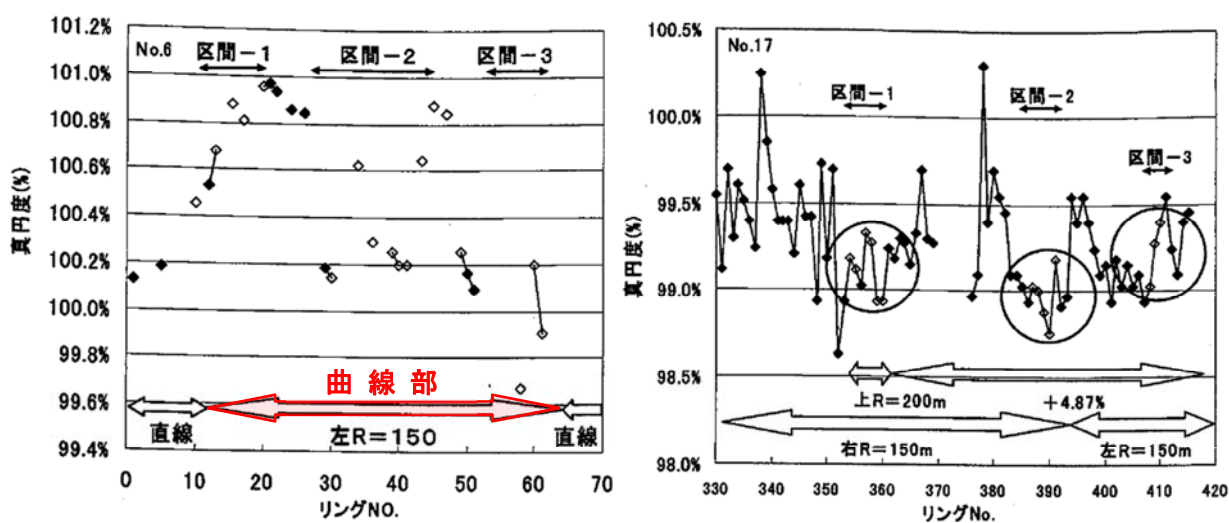


図-2.4.6 セグメントリングの真円度と平面線形の測定事例¹²⁾



【縦型つぶれの例：セグメント内径 5.45m】

【横型つぶれの例：セグメント内径 3.30m】

注記) プロット記号の白抜きは、ひび割れ発生リングを示す。

図-2.4.7 セグメントリングの真円度と平面線形の測定事例¹³⁾

[第2章 参考文献]

- 1) 土木学会関西支部共同研究グループ:「内水圧が作用する地下貯留トンネルの力学挙動に関する調査・研究」 H29 年度報告書, 2018.
- 2) 財団法人先端建設技術センター:「地下河川(シールドトンネル)ー内水圧が作用するトンネル覆工構造設計の手引き, 1999.3.
- 3) 小林寛治、肥沼昭: 東京都の河川事業における建設コスト縮減の取り組みー神田川・環状七号線地下調節地シールド工事ー, pp.11-16, 土木施工 41 巻 6 号.
- 4) 土木学会: 2006 年制定 トンネル標準示方書(シールド工法)・同解説, p.72, 2006.
- 5) 高野、木田、加藤、阿部、加藤: コンクリートの実用せん断強度の定式化と R C はりのせん断圧縮破壊強度算定への適用性, 日本大学生産工学部研究報告 A 第 36 巻 1 号, 2003.6.
- 6) 高柳、山藤、佐々木、佐藤: 内水圧が作用するセグメントの剥離現象の考察, トンネルと地下第 37 巻 3 号, pp53-59, 2006.
- 7) 社団法人日本トンネル技術協会: セグメントシール材による止水設計手引き(東京電力株式会社委託), p.25, 1997.1.
- 8) 社団法人日本トンネル技術協会: セグメントシール材による止水設計手引き(東京電力株式会社委託), p.171, pp.177-178, 1997.1.
- 9) 山元、木村、原田、宮野: 高水圧化におけるセグメントシール材の長期止水性能について, 土木学会第 65 回年次学術講演会 VI-243, 2010.9.
- 10) 服部、三井、田中、金、中井: 水膨張性セグメントシール材の長期接面応力の予測について, 土木学会第 73 回年次学術講演会 VI-175, 2018.9.
- 11) 高橋、中村、石村: 首都圏外郭放水路シールドトンネルの挙動計測, トンネル工学研究論文・報告集第 11 巻 pp.273-278, 2001.11.
- 12) 加納、竹内、白土、黒川、金井、福本: シールド工事の合理化ー外郭放水路第 1 工区トンネル新設工事ー, 土木学会論文集 No.714/VI-56, pp.1-20, 2002.9.
- 13) 土木学会: トンネル・ライブラリー第 17 号 シールドトンネルの施工時荷重, p.46, 2006.10.

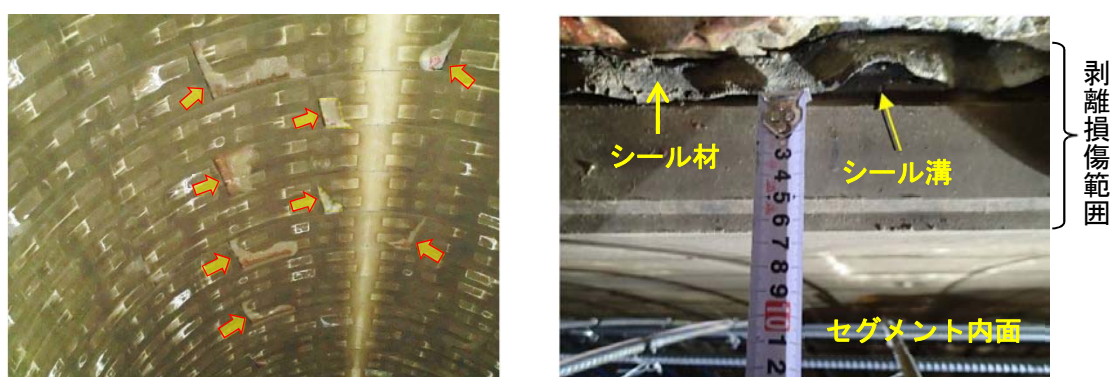
3. 損傷防止対策の提案

3.1 内水圧シールドトンネルにおける損傷の概要

(1) 損傷の状況と傾向

2017年度の実態調査¹⁾にて、以前から報告²⁾されていた内水圧が作用するシールドトンネルにおけるRCセグメントの剥離損傷が確認された。内水圧トンネルにおけるRCセグメント剥離損傷の主な形態はかぶりコンクリートの剥離であり、規模が大きい場合は鉄筋が露出するケースも見受けられた。

従来シールドトンネルは、セグメントの防食、防水、内面平滑、耐火等の性能を確保するため、セグメント内面に無筋コンクリートによる二次覆工を施すことが一般的であった。しかし、地震によって二次覆工が剥落するケースやコンクリートの充填不良によって二次覆工の頂部に空洞が生じるケースなどが生じたこと、シール材の性能向上により一次覆工のみでも防水性を確保できるようになったこと、コストや工期短縮等の社会的ニーズが高くなったこと等から、近年では二次覆工を省略又は一体化することが多くなっている³⁾。



(首都圏外郭放水路第3工区)



(神田川・環七地下調節池第1期)

図-3.1.1 内水圧が作用するシールドトンネルの剥離損傷¹⁾

(2) 過去の検討にて推定された損傷メカニズム

外郭放水路では供用後におけるセグメントの剥離損傷を受け、原因追求のための検討が行われた²⁾。その結果セグメントの剥離損傷は、洪水時におけるトンネル内水位の立坑天端までの上昇に伴ってトンネルの内水圧が外水圧より大きくなることによってセグメント間の隙間が開き、その隙間に水が浸透して止水材が膨張し、その後トンネル内水位の低下に伴って、膨張した止水材が支点となりトンネル軸力を受け持つため、セグメントに局部応力が発生してコンクリートが剥離すると推定された。

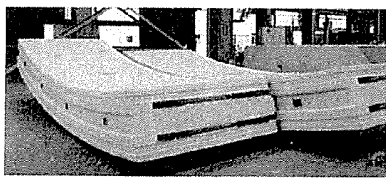
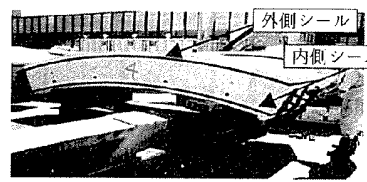
第 一 工 区	第 二 工 区
RCセグメント：幅×厚さ=1.2m×0.6m, 重量 7 tf/ピース	RCセグメント：幅×厚さ=1.2m×0.65m, 重量 8 tf/ピース
水平コッター(ピース間：トンネル円周方向)	高剛性継手(ピース間：トンネル円周方向)
ブッシュグリップ+ほぞ(リング間：トンネル軸方向)	ピン・ボルト併用(リング間：トンネル軸方向)
	

図-3.1.2 第1工区と第2工区におけるセグメントの概要²⁾

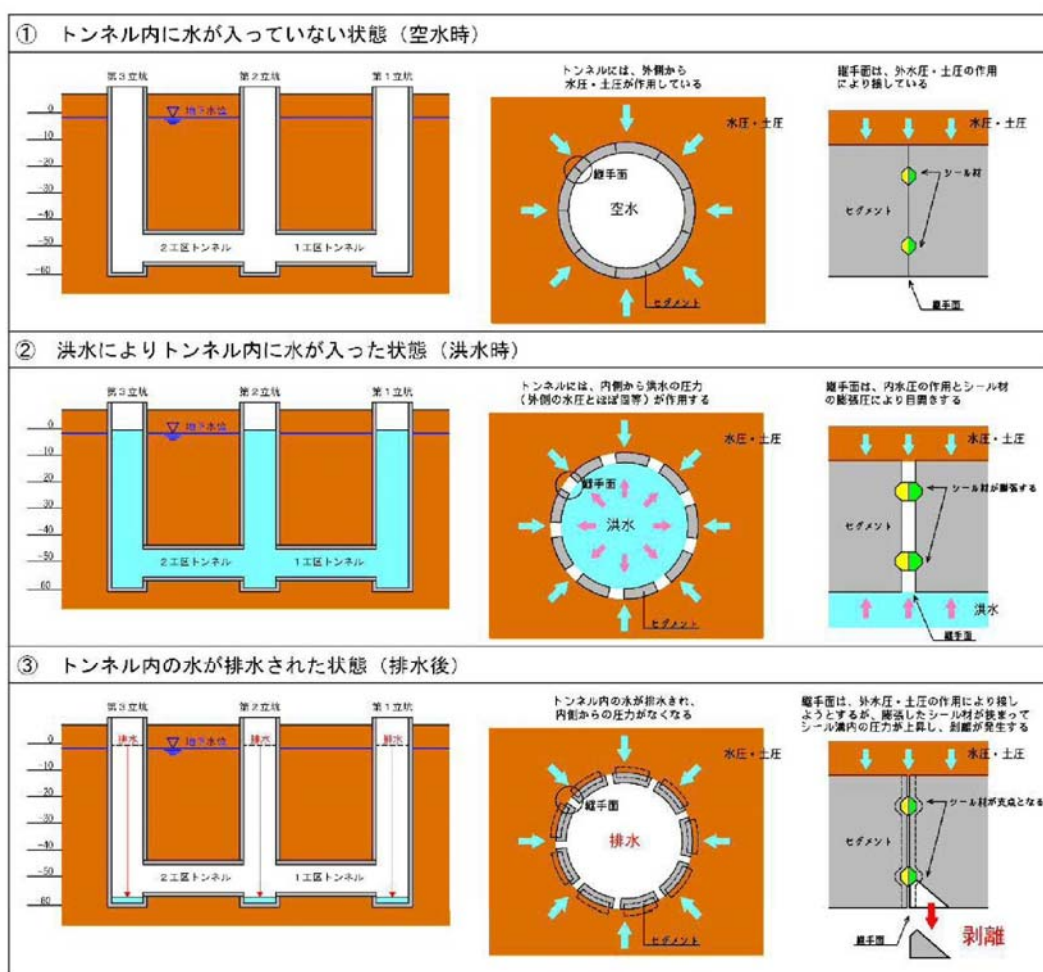


図-3.1.3 主要剥離発生メカニズムのイメージ²⁾

(3) セグメントの剥離損傷に対する事後対策

外郭放水路では、供用開始直後からセグメントの剥離損傷が多発したため、供用後にセグメントの内側に鉄筋コンクリートによる二次覆工を巻き立てる事後対策が実施された。この事後対策は、剥離損傷の最も多い第二工区から始められ、現在も順次施工が進められている。

内圧トンネルのセグメントの内側に二次覆工を巻き立てる場合、貯水時（洪水時）には二次覆工に非常に大きな内水圧が作用する。二次覆工の背面にはセグメントがあるものの、セグメントと二次覆工が完全に接していなければ、大きな内水圧によって二次覆工が引っ張られ、損傷する可能性が高い。そのため、外郭放水路では二次覆工に導水口を設置し、二次覆工の内側と外側（セグメントとの間）にて水圧差が生じないようにするとともに、ひび割れ誘発目地を設置して二次覆工に過度な損傷が生じさせない対策が施されている。また、ひび割れが生じても二次覆工の一体性が保つように用心鉄筋を配置し、誘発目地の周辺は腐食防止として鉄筋塗装を施している。

外郭放水路の事例のように、シールドトンネルではセグメントが損傷すると、事後対策に膨大な費用がかかる可能性が高い。外郭放水路は、当初、二次覆工を施す計画であったが、コスト縮減等の理由から二次覆工を省略したため、事後対策としてセグメントの内側に二次覆工を巻き立てる対策が可能であった。しかし当初から二次覆工を施さない計画であった場合、セグメントの内側に二次覆工を巻き立てることにより計画貯水量が確保できなくなる可能性がある。

このように、内水圧が作用するシールドトンネルでは、セグメントに剥離損傷を生じさせないための事前対策（設計）が特に重要であると言える。

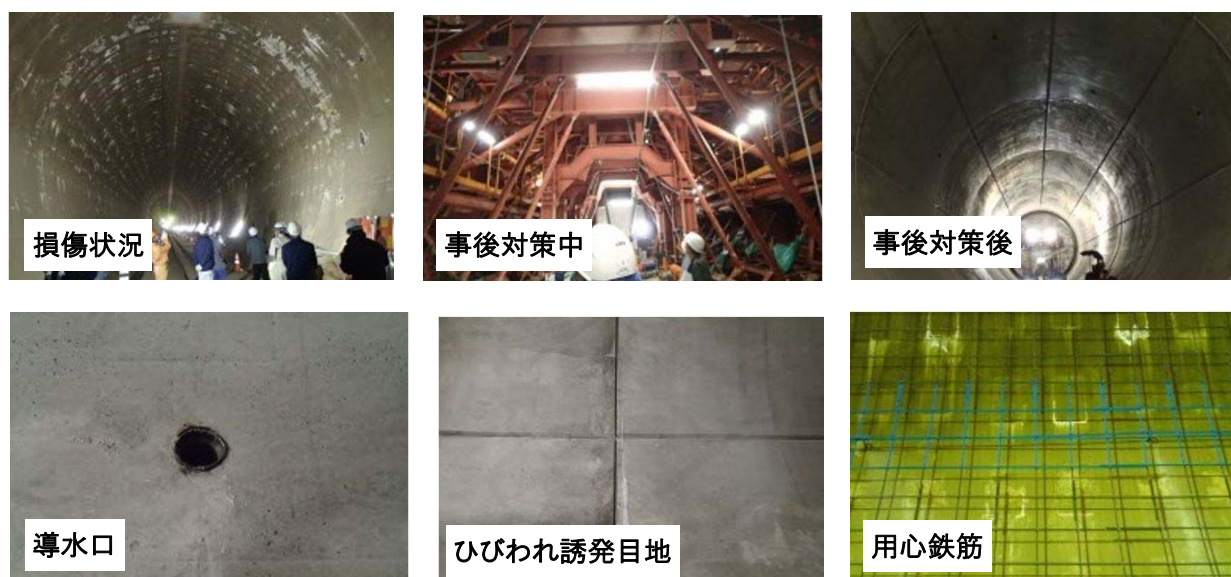


図-3.1.4 外郭放水路における事後対策事例²⁾

3.2 RCセグメントの適用可能性（本章の目的）

セグメントの剥離損傷は内水圧が作用するシールドトンネル特有の損傷であり、道路や鉄道のシールドトンネルでは二次覆工を省略している場合でもセグメントの剥離損傷は生じていない。また、セグメントの剥離損傷が確認されている内水圧トンネルは、内径が10m程度の大断面シールドトンネルにおけるRCセグメントに限定されている。さらに、剥離損傷が起きた外郭放水路では工区によって剥離損傷の発生割合が大きく異なっており、第1工区のうち膨張圧の小さいシール材を使用した区間のように、調査時点において剥離損傷が発生していなかった区間も存在する¹⁾。

また、2017年度の実態調査¹⁾では、シール溝に達していない軽微な剥離も確認された。外郭放水路における剥離損傷の原因追求²⁾では、剥離損傷はシール材が支点となってトンネル軸力を受け持つために起きるとしているが、このメカニズムではシール溝に達していない剥離は説明できない。そのため、シール溝に達していない軽微な剥離は別のメカニズムによって起きていると想定される。

表-3.2.1 セグメントの内径と種類別、損傷発生状況¹⁾

施設	環七地下調節池		外郭放水路		古川	北島	北浜
	第1期	第2期	第1～3工区	第4工区			
内径	12.5m	12.5m	10.6m	10.6m	7.5m	5.4m	6.0m
種類	RC	合成	RC	DRC※1	合成	合成	RC
剥離	有	無	有	無	無	無	不明

※1：ダクトイルセグメント



図-3.2.1 シール溝に達していない小さな剥離とシールが露出した大きな剥離¹⁾

内水圧が作用するシールドトンネルでは過去にセグメントの剥離損傷が生じたため、現時点で計画されている内水圧トンネルのセグメントは、接合面が鋼材となる鋼製セグメントか合成（鋼とコンクリートの合成）セグメントに限定されている。しかし、鋼製セグメントや合成セグメントはRCセグメントと比べて高価であるため、RCセグメントでも適用範囲を限定したり、適切な設計を施すことによって、剥離損傷を防止できれば、内水圧トンネルによる洪水対策をより効率的に進めることができる可能性がある。

本章では、昨年度の実態調査にて収集した外郭放水路における実績に基づき、内水圧トンネルにRCセグメントを用いる場合、剥離損傷を生じさせないために必要な条件を設計における損傷防止対策として整理する。

3.3 想定される損傷要因

内水圧が作用するシールドトンネルにおけるRCセグメントの剥離損傷を生じさせる想定される要因を下表に示す。

表-3.3.1 想定されるセグメント損傷の発生要因

損傷の発生要因	解説
①過剰な内水圧	トンネルの内側に過剰な水圧（内水圧）が作用することにより、トンネルの形状が変化し、局部接触によりセグメントが損傷する。
②トンネルの変形	トンネル径が大きくなるとセグメント数の増加等により、トンネルの剛性が低下して変形し、局部接触によりセグメントが損傷する。
③止水材の性質	膨張率の高い止水材や変形性能の小さい止水材を用いることにより、セグメントに局部的な力が作用してセグメントが損傷する。
④セグメントの構造	セグメントの端部や止水材の位置に局部的な力が作用した時、コンクリートの内部にせん断応力に抵抗する鉄筋が配置されていないため、せん断応力に抵抗できずにセグメントが損傷する。
⑤施工時の損傷や初期不整	セグメントの搬送や組み立て等の施工時に、セグメントに軽微な損傷が生じる若しくはセグメント内部に初期応力が生じる等の原因によりセグメントが損傷する。

内水圧が作用するシールドトンネルにおけるRCセグメントの剥離損傷は、幾つかの要因が複合的に組み合わさって生じる現象と想定される。しかし、複数の要因の組み合わせが損傷に与える影響を定量的に把握することは非常に困難であるため、本章では次項にて想定される損傷要因を挙げ、このうち主要な要因を対象に損傷を防止するために必要な対策内容を整理する。

〔①過剰な内水圧〕

過剰な内水圧はトンネルに作用する外力である。過剰な内水圧は内水圧が作用するトンネルに特有な要因であるため最も基本的な損傷要因であるが、過剰な内水圧が損傷の主要な要因であれば内水圧又は内水圧と外水圧の差が大きいほど損傷が多く発生するはずである。しかし、これまで調査した事例では必ずしも内水圧又は内水圧と外水圧の差が大きいほど損傷が多い傾向は見られなかった。そのため、過剰な内水圧は損傷要因であるものの、損傷に与える影響はさほど大きくないと想定される。

過剰な内水圧を抑える対策には流入水の制御が考えられる。トンネルに流入する水を制御し、トンネル内の水位を頂部以下に抑える水位管理を行うことにより、過剰な内水圧が作用することを防止できる。なお、水位管理による過剰な内水圧の抑制については次章にて取り扱う。

〔②トンネルの変形〕

シールドトンネルはセグメントを組み合わせてトンネルを形成しているため、トンネル径が大きくなりセグメント数が増えると断面剛性が小さくなる。そのため、内水圧が作用すると断面が変形し、セグメント間に目開きや接触が生じる。内水圧によってどの程度断面が変形するのかを正確に予測することは困難であるが、前章の解析結果より外郭放水路と同程度の径（内径10m程度）のであれば、セグメント間に水が侵入する程度の目開きやセグメント縁端の接触が起きることは十分想定される。

トンネルの変形を抑える対策としては、前述した水位管理による内水圧の抑制が考えられる。その他、トンネルの断面剛性を高めることも考えられるが、費用対効果の点から有効ではない。また、トンネル径が小さくなればセグメント数が減少するため断面剛性が向上するが、前章ではトンネル径を2種類に変化させた解析しか実施していないため、セグメント間の目開きや接触がどの程度小さくなるのかは不

明である。

〔③止水材の性質〕

シールドトンネルのセグメント間には水膨張シール材によって止水されている。水膨張シール材には水の供給によって膨張するゴムが用いられており、製品ごとに材質や構造が異なるため、膨張量や追随性等の性質も異なる。外郭放水路では使用された止水材の製品ごとに損傷の発生程度が異なる傾向が確認されたため、止水材が主要な損傷要因の一つであると考えられる。

止水材による損傷の防止対策としては、適度な膨張量でセグメントに過剰な膨張圧を与えない性能を有する止水材を用いることが挙げられる。本章では外郭放水路における損傷事例等から損傷を防止するために必要な止水材の性質を整理する。

〔④セグメントの構造〕

シールドトンネルのセグメントにはＲＣ、鋼、合成などの種類があり、鋼製セグメントや合成セグメントはセグメントの接触面が鋼材であるため、コンクリートの剥離損傷が生じない。そのため、内水圧が作用するシールドトンネルにて剥離損傷が確認されているセグメントはすべてＲＣセグメントである。ＲＣセグメントの形状や配筋などの構造は工区ごとに異なっており、セグメントの構造によって損傷の発生割合が異なるため、配筋やシール溝の位置などの形状が主要な損傷要因の一つであると考えられる。

セグメントの構造による損傷の防止対策としては、配筋やシール溝の位置などを適切に設計することや、コンクリート自体のせん断抵抗力を繊維補強等によって向上させることにより、コンクリートの剥離を防止することが挙げられる。本章では外郭放水路における損傷事例等から損傷を防止するために必要なＲＣセグメントの構造を整理する。

〔⑤施工時の損傷や初期不整〕

シールドトンネルの施工は近年自動化が進み、セグメントの搬入や組み立ては自動化又は半自動化されている。施工の自動化によって効率性は向上するものの、手作業と比べて丁寧な扱いができないため、セグメントに軽微な損傷が生じることが懸念されている。また、組み立て時や掘進時の初期不整による内部応力が剥離損傷の要因となることも想定される。しかし、施工時の損傷や初期不整は内水圧が作用するトンネルだけでなくその他のシールドトンネルにも共通する条件であり、これらによってセグメントの剥離損傷が生じやすくなっている可能性があるものの、主要な損傷要因とは言えない。そのため、施工時の損傷や初期不整は本章の対象から除外する。

以上より、本章では「止水材の性質」と「セグメントの構造」を対策の提案対象とし、損傷を防止するために必要な条件を次項 3.4 と 3.5 に整理する。

＜本章の対象＞

○止水材による対策 ⇒3.4

○セグメント構造による対策 ⇒3.5

3.4 止水材による損傷防止対策

3.4.1 止水材の特性

(1) 止水材の種類

シールドトンネルはセグメント（一次覆工）にて止水することが基本であり、セグメント間に挿入された止水材によって地下水のトンネル内への浸入が防止されている。

止水材は大きく非膨張シール材と水膨張シール材に分類され、非膨張シール材は1960年代～1970年代に使用されたが、目開きへの追随性が低いため、セグメント組み立て時の脱落や漏水の発生等のデメリットがあった。その後1980年代に水膨張シール材が開発され、止水性が格段に向上したため、現在でも止水材の主流になっている。

水膨張シール材は吸水によって膨張するゴム材で、セグメントの接合面に設置され、外部から水が浸入により膨張し、隙間が充填されることでトンネル内への漏水を防止する。水膨張シール材には単一材料のものと、複数の材料を組み合わせたものがあり、製品によって構造や性能が異なる。

表-3.4.1 止水材の分類表³⁾

(出典：野本寿 他；シールドトンネルの覆工技術(12)－防水－，トンネルと地下，第24巻8号，土木工学社，1993)

機能による分類	構造による分類	材料による分類	特徴
非膨張シール材	単一材料シール材	a.未加硫ブチルゴム系シール材 b.加硫ゴム系シール材 c.スポンジ系シール材 1.発泡ポリエチレン 2.発泡ゴム 3.発泡ウレタン d.反応型ウレタンシール材（2液反応型）	・ゴム弾性圧で止水性を発揮するもの、あるいは自己粘着性により止水性を発揮する。 ・従来から使用され、国内外の使用実績も多いが、現在は海外が主流 ・シール材は、比較的厚くなり、セグメント組み立て時の脱落などに注意を要する。 ・シール材の厚さ以上に、目開きが生じた場合は、対応できなくなる。
	複合材料シール材	a.スポンジ+未加硫ブチルゴム系被覆材 b.加硫ゴム（クロロブレンゴム）+未加硫ブチルゴム系被覆材	・価格は水膨張シール材に比較して、安価である。
水膨張シール材	単一材料シール材	a.吸水性樹脂系シール材 b.吸水性ウレタン系シール材 1.ウレタンエラストマー単一品 2.ゴム混練り加工品	・ゴム弾性圧に加え、水膨張圧による止水機能を発揮し、目開きへの追随性が高い。 ・昭和50年代に開発され、とくにここ6～7年の使用実績が多い。
	複合材料シール材	a.水膨張シール材+クロロブレンゴム b.水膨張シール材+鋼製網	・非膨張性シール材に比べ薄く、組み立て時の脱落は少ない。 ・雨水に対して養生を行う必要がある。

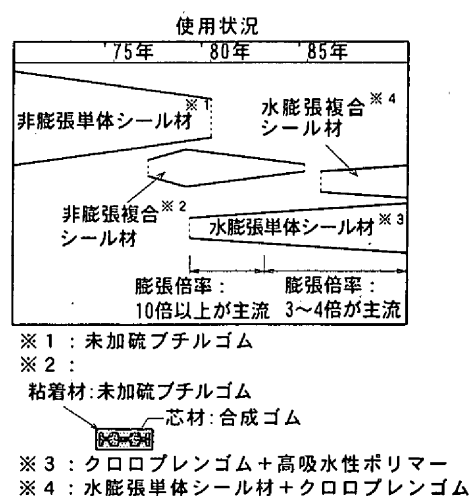


図-3.4.1 国内におけるシール材の使用経緯⁵⁾



図-3.4.2 水膨張シーラ材の例⁶⁾

(2) 水膨張シーラ材の挙動

水膨張シーラ材は、浸入した水によって膨張することによってトンネル内への漏水を防止する。シールドトンネルではセグメントの接触面に止水材を設置するためのシール溝があり、この溝に止水材が設置される。シール溝に設置された水膨張シーラ材は浸入した水によって膨張するが、周りをセグメントで覆われているため膨張が妨げられ、接触面に応力（接面応力）が生じる。

〔接面応力の変化〕

シールドトンネルでは、まず鋼製のシールドマシン内でセグメントが組み立てられ、シールドマシンの末端（テール）を抜けるまではセグメントに土圧と水圧は作用しない。セグメントがテールを脱出すると同時にセグメントの背面に地山の土圧＋水圧より高い圧力で裏込め材が注入され、その後裏込め材が硬化するため、セグメントには地山の土圧＋水圧が作用する。

シールドトンネルのセグメントに設置された水膨張シーラ材の接面応力の変化⁵⁾を図-3.4.3に示す。水膨張シーラ材はセグメントの組み立てによってシール溝に押し込まれて接面応力 σ_0 が生じる。その後シーラ材の応力緩和によって接面応力が減少して σ_1 に低下するが、テールを脱出すると背面より水が供給されるためシーラ材が膨張し、接面応力が σ_2 まで増加する。なお、図-3.4.3では $\sigma_0 > \sigma_2$ になっているが、 σ_0 と σ_2 の大小はシーラ材の性質と水の供給条件によって異なる。

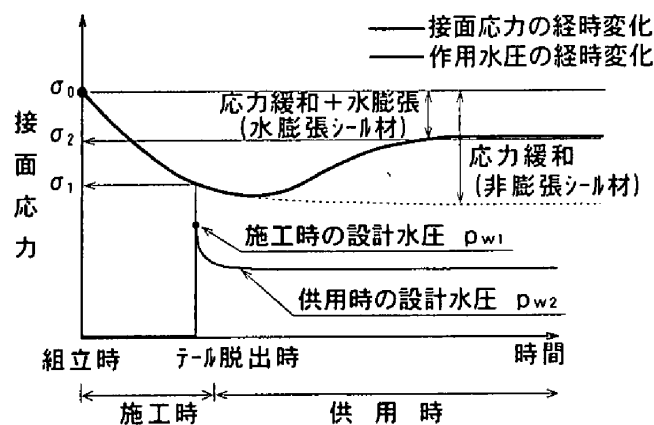


図-3.4.3 接面応力の経時変化⁵⁾

(3) 接面応力の計測事例

水膨張シール材に対して接面応力の経時変化を計測した3つの事例を以下に示す。

[事例1]

図-3.4.4は、メーカーの異なる3種類（A、C、G）の水膨張シール材に対して、隙間を開けた容器内に水膨張シール材を設置し、浸水させたときの接面応力の経時変化を計測した結果である。これより、水膨張シール材は、目開きが大きいほど膨張量が増加する傾向は共通しているものの、接面応力の増加量や増加スピードがメーカーによって異なっている。

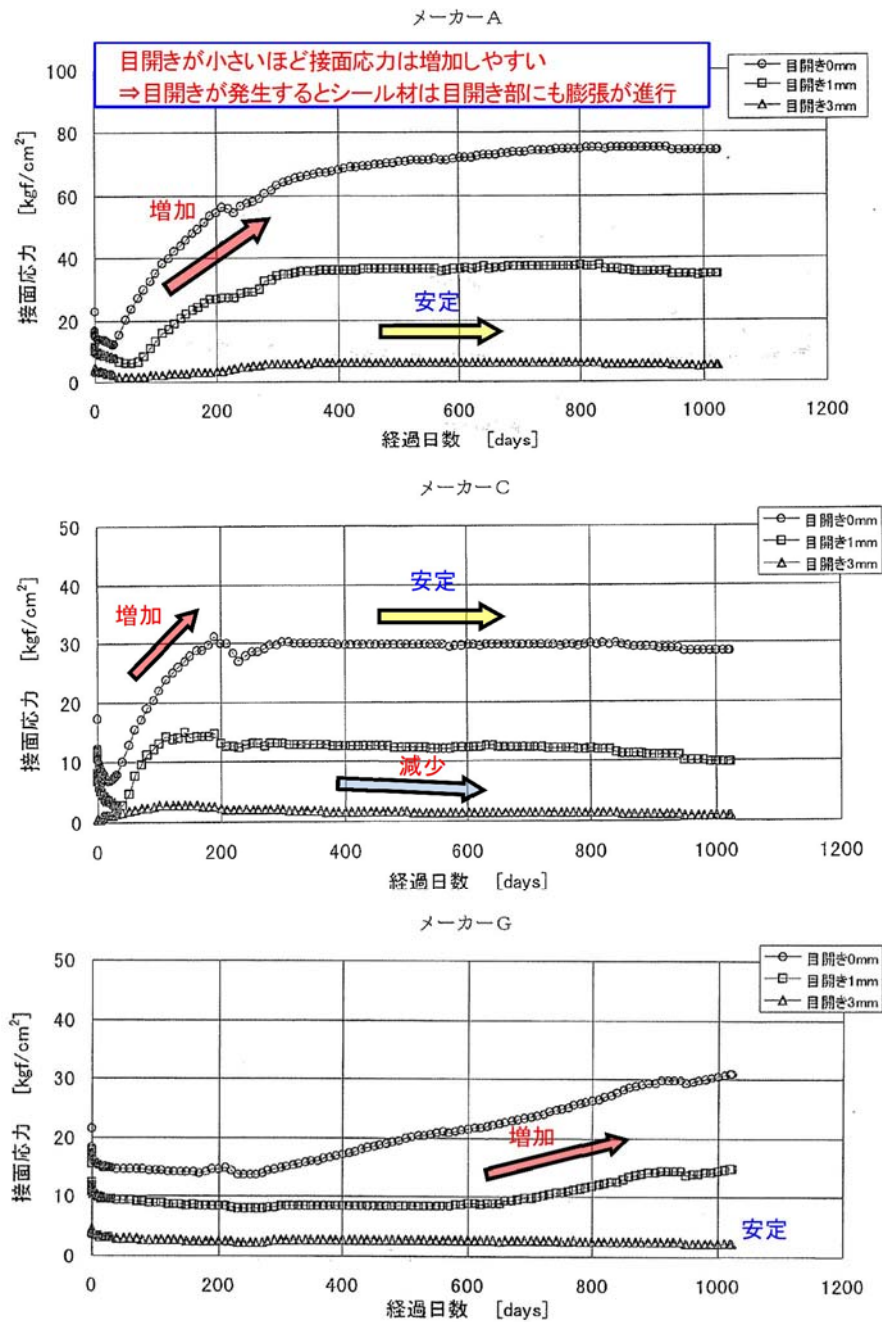


図-3.4.4 接面応力の計測結果（事例1）⁷⁾

[事例 2]

図-3.4.5 は、水膨張性ゴムと非膨張性ゴムの 2 つで構成された複合型の水膨張シール材を用いて、片側から給水した場合の接面応力を異なる 3 点で長期間計測した結果である。この事例では、接面応力は給水側が最も大きく、水の接触面から離れるにしたがって接面応力が小さくなる傾向を示した。また、接面応力は計測した 3 6 0 0 日（10 年）以上にわたって増加する傾向を示した。

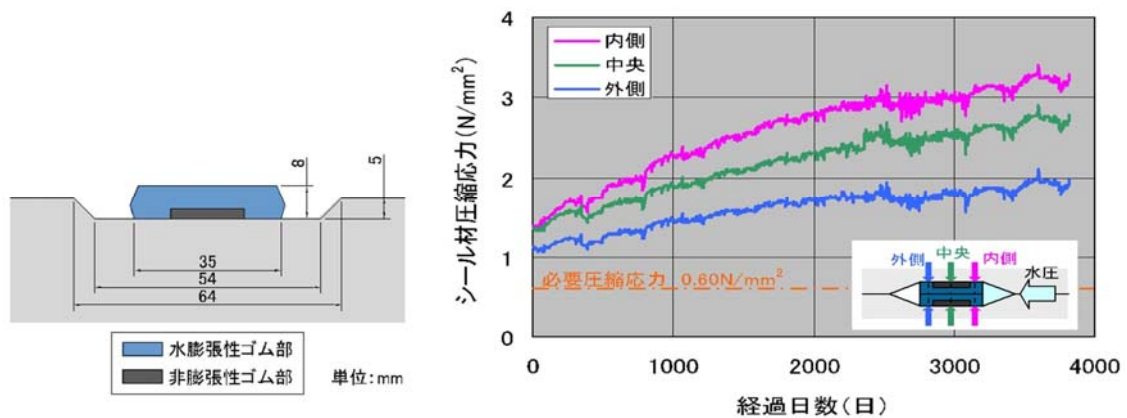


図-3.4.5 接面応力の計測結果（事例 2）⁸⁾

[事例 3]

図-3.4.6 は、形状と構造の異なる水膨張シール材（TypeA、TypeB、TypeC）の水膨張シール材に対して接面応力、膨張応力、緩和応力を計測した結果である。これより、短期試験では水膨張シール材の形状と構造、及びシール溝の断面積比によって接面応力の変化傾向が異なっている。

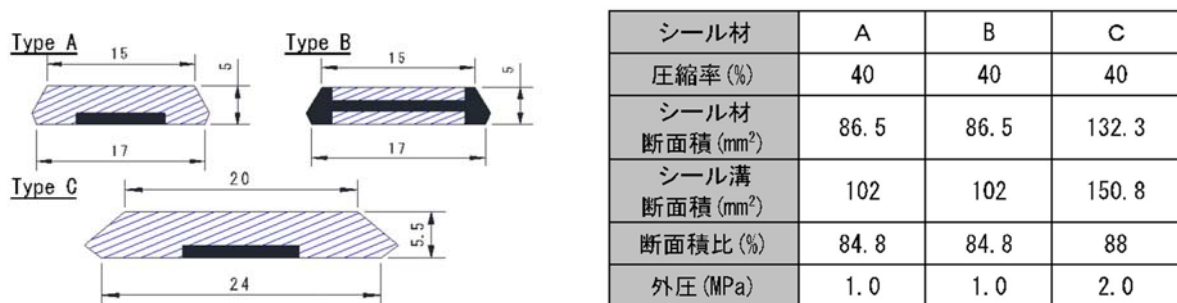


図-3.4.6 接面応力の計測に用いた水膨張シール材の諸元（事例 3）⁹⁾

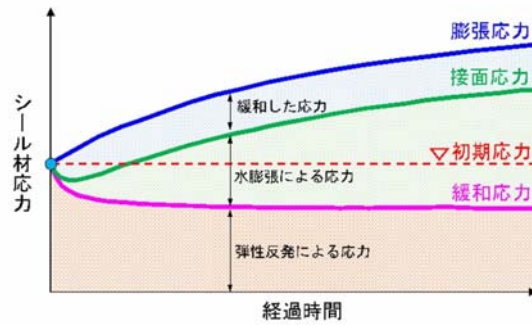
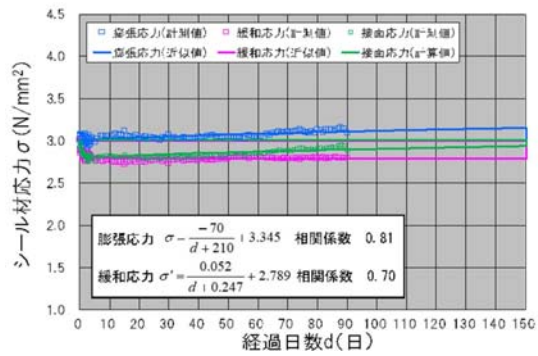
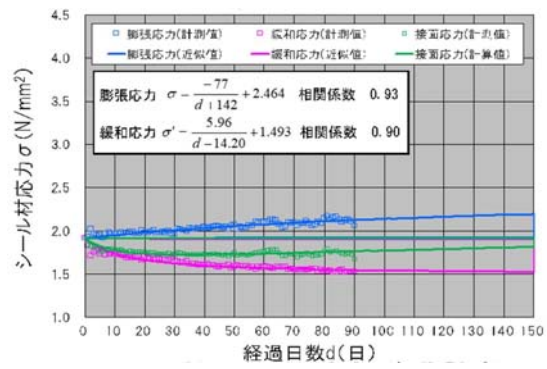
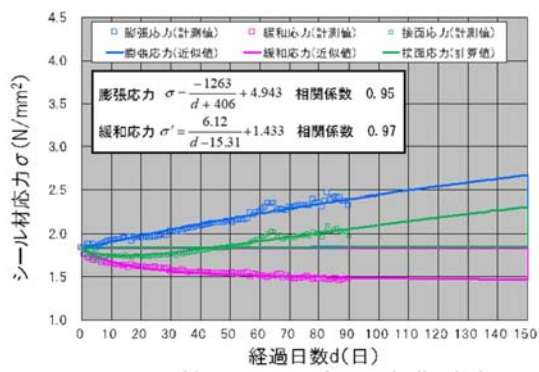


図-3.4.7 界面応力の計測結果（事例3）⁹⁾

3.4.2 止水材の膨張圧による損傷防止対策

外郭放水路の資料⁴⁾より水膨張シール材の膨張圧と剥離損傷の関係を整理したところ、第1工区のうちで剥離損傷が生じていなかった区間は膨張圧 8.5N/mm^2 の B 社製水膨張シール材を使用していた。また、第2工区では膨張圧 10.5N/mm^2 でも損傷が多く、第1工区では膨張圧 14.0N/mm^2 でも損傷が少なかった。

以上の水膨張シール材の膨張圧と剥離損傷の関係から、セグメントの剥離損傷を防止するためには、膨張圧が 8.5N/mm^2 以下の水膨張シール材を用いることが望ましいと考えられる。また、膨張圧 10N/mm^2 以上の水膨張シール材を用いる場合はセグメントに次項に示す剥落損傷の防止対策を施す必要があると考えられる。

表-3.4.2 水膨張シール材の膨張圧と剥離損傷の関係（外郭放水路）

工区	第1工区		第2工区	第3工区	
シールメーカー	A 社	B 社	B、C、D 社	A 社	B、C、E 社
シール膨張圧 (N/mm^2)	14.0	8.5	10.5	14.0	10.5
剥離損傷	少	無	多	無又は少	無又は少

※国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所提供資料⁴⁾を基に作成。

3.4.3 止水材の体積率による損傷防止対策

外郭放水路の資料⁴⁾より水膨張シール材の体積率（セグメントのシール溝の断面積に対する水膨張シール材の断面積の占める割合。延長方向には同じ断面が続くため、断面積率は体積率と同義。）と剥離損傷の関係を整理したところ、第1工区と第3工区は剥離損傷が無又は少であり、体積率 97%の第2工区は剥離損傷が多かった。

以上の水膨張シール材の体積率と剥離損傷の関係から、セグメントの剥離損傷を防止するためには、体積率を 95%未満とすることが望ましいと考えられる。ただし、剥離損傷が無又は少の第1工区及び第3工区と剥離損傷の多い第2工区は体積率にほとんど差が無いことから、体積率が 95%程度であればさほど影響はないと想定される。念のため体積率 95%以上とする場合は、シール材の膨張圧を 8.5N/mm^2 未満に抑えるか、セグメントに剥落損傷の防止対策を施すことが望ましい。

表-3.4.3 水膨張シール材の断面積率と剥離損傷の関係（外郭放水路）

工区	第1工区	第2工区	第3工区
シールメーカー	A、B 社	B、C、D 社	A、B、C、E 社
断面積率	95%	97%	92%
剥離損傷	無又は少	多	無又は少

※国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所提供資料⁴⁾を基に作成。

3.5 セグメント構造の損傷防止対策

3.5.1 シール溝縁端距離による損傷防止対策

外郭放水路の資料⁴⁾よりセグメントのシール溝縁端距離と剥離損傷の関係を整理したところ、シール溝縁端距離が約 60mm の第 1 工区と第 3 工区は剥離損傷が無又は少であった。また、シール溝縁端距離が約 35mm の第 2 工区は剥離損傷が多かった。

以上のセグメントのシール溝縁端距離と剥離損傷の関係から、セグメントの剥離損傷を防止するためには、シール溝縁端距離を 60mm 以上とすることが望ましく、シール溝縁端からの剥離面に鉄筋が入るように配筋する必要があると考えられる。

表-3.5.1 セグメントのシール溝縁端距離と剥離損傷の関係（外郭放水路）

工区	第 1 工区	第 2 工区	第 3 工区
シール溝縁端距離	58mm	35mm	63mm
剥離損傷	無又は少	多	無又は少

※国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所提供資料⁴⁾を基に作成。

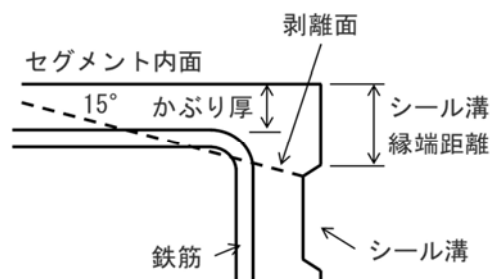


図-3.5.1 剥離損傷を防止するためのセグメント構造

3.5.2 鉄筋かぶり厚による損傷防止対策

外郭放水路の資料⁴⁾よりセグメントの鉄筋かぶり厚と剥離損傷の関係を整理したところ、鉄筋かぶり厚が約 55mm の第 1 工区と第 3 工区は剥離損傷が無又は少であったが、約 60mm の第 2 工区は剥離損傷が多かった。

以上のセグメントの鉄筋かぶり厚と剥離損傷の関係から、セグメントの剥離損傷を防止するためには、鉄筋かぶり厚を 55mm 未満とすることが望ましい。内水圧トンネルでは耐久性を確保するために一定の鉄筋かぶりが必要となるが、シール溝縁端からの剥離面と鉄筋が交差するような配筋にするため、鉄筋かぶり厚がシール溝縁端距離より大きくなることは避ける必要がある。

表-3.5.1 セグメントの鉄筋かぶり厚と剥離損傷の関係（外郭放水路）

工区	第 1 工区	第 2 工区	第 3 工区
鉄筋かぶり厚	54mm	59mm	55mm
剥離損傷	無又は少	多	無又は少

※国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所提供資料⁴⁾を基に作成。

[第3章 参考文献]

- 1) 土木学会関西支部共同研究グループ: 内水圧が作用する地下貯留トンネルの力学挙動に関する調査・研究 平成 29 年度報告書, pp77-93, 2019
- 2) 高柳、山藤、佐々木、佐藤: 内水圧が作用するセグメントの剥離現象の考察, トンネルと地下第 37 巻 3 号, pp53-59, 2006
- 3) 土木学会: トンネル・ライブラリー30, トンネルの維持管理の実態と課題, pp77-93, 2019
- 4) 国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所提供資料
- 5) 大塚、塩治、小林、小泉: シールド工事用セグメントの水膨張シール材による止水設計法について, 土木学会論文集 No.651/VI-47, pp61-79, 2000
- 6) 王子ゴム化成株式会社: 水膨張性義務シール材カタログ アクアケル (AQUAQUELL)
- 7) 社団法人日本トンネル技術協会: セグメントシール材による止水設計手引き (東京電力株式会社委託), pp.177-178, 1997.1.
- 8) 山元、木村、原田、宮野: 高水圧下におけるセグメントシール材の長期止水性能について, 土木学会第 65 回年次学術講演会VI-243, 2010.9.
- 9) 服部、三井、田中、金、中井: 水膨張性セグメントシール材の長期接面応力の予測について, 土木学会第 73 回年次学術講演会VI-175, 2018.9.

4. 管理運営方法の提言

4.1 管理運営方法の調査

(1) 調査方法

貯留施設の管理運営方法の調査は、2017年度での現地調査・管理者へのヒアリング¹⁾および、2018年度でのアンケートにより損傷実態の調査と併せて実施した。2017年度の現地調査・ヒアリング¹⁾は、神田川・環状七号線地下調節池、外郭放水路、寝屋川北部地下河川、北浜逢阪貯留管の4施設で実施したものであり、詳細は2017年度報告書¹⁾に示す。

2018年度のアンケート調査は、既存の大深度・大口径の雨水貯留管の維持管理方法や構造を把握するために調査された「大深度雨水貯留管構築に適用するシールド工法に関する技術資料」²⁾でのアンケート項目に、施設の損傷状況の確認を加えた表-4.1.1の調査項目とした。調査方法は、調査先を2017年度調査以外の施設のうち大都市部に構築された中大口径シールドトンネル貯留施設から8施設を抽出し、Eメールによりアンケート調査用紙を送信し、6施設の管理者から調査結果が回収できた。なお、アンケートは施設や管理者の名称は公表しないこととして調査したため、本報告書での名称は仮称で記載する。

表-4.1.1 2018年度アンケート調査の項目

項目	細目	記入方法
施設概要	施設名・事業者	記入式
	供用開始年月日	〃
	区分	河川、下水道分流雨水、下水道合流雨水から選択
	目的	浸水対策、合流改善から選択
	貯留方式	流下型貯留、完全貯留から選択
貯留管諸元	内径・外径	記入式
	延長	〃
	貯留容量	〃
	管渠勾配	〃
	管渠勾配の決定根拠	将来計画の自然流下対応、その他から選択 その他の場合は空欄に記入
	土被り	記入式
	標準部セグメント種別	鋼製、コンクリート、合成から選択
	厚さ（桁高）	記入式
	設計内圧	〃
	二次覆工の有無	二次覆工省略型、二次覆工ありから選択 ありの場合は二次覆工厚を記入
	防食対策	あり、なしから選択。ありの場合は方法を記入
	底部通行路の有無	あり、なしから選択。ありの場合は幅員を記入
	最小曲線半径	記入式
貯留水位	貯留の制限水位	管渠の管頂まで、立坑で地表面まで、その他から選択 その他の場合は記入式
流入施設	流入箇所数	記入式
	流入部スクリーンの有無	あり、なしから選択。ありの場合は目幅を記入
	高落差処理方法	棚式、らせん案内路、渦流式、なし、その他から選択 その他の場合は記入式
	流入頻度	年間の流入回数を記入
排水設備	排水槽への導水方式	管底から下部引抜き、人孔ピット、その他から選択 その他の場合は記入式
	排水方法	自然排水、水中ポンプ排水、地上ポンプ排水、その他から選択。 その他の場合は記入式
	計画排水量	記入式
	排水時間	記入式
	排水時間設定理由	腐敗防止、許容排水量、その他から選択 その他の場合は記入式
堆砂対策	管渠内の堆砂状況	ほとんど無し、ありから選択 ありの場合は、堆砂厚さを記入
	堆砂除去の手法	ブラッシング、人力洗浄、機械除去、その他から選択 その他の場合は記入式
	堆砂揚出方法	サンドポンプ、吸引車、バケット、その他から選択 その他の場合は記入式
	堆砂除去の年間費用	記入式
管渠内の環境	損傷の有無	あり、なしから選択
	損傷の状況	損傷ありの場合に、記入式
	補修実施の有無	損傷ありの場合に、あり、なしから選択
	臭気の有無	あり、なしから選択
	脱臭設備の有無	あり、なしから選択
管渠内の点検	点検方法	目視、TVカメラ、その他から選択 その他の場合は記入式
	点検頻度	年間の点検回数を記入式
	搬出入開口形状	開口寸法および設定理由を記入式
	搬出入設備の有無	リフト、クレーン、なし、その他から選択 その他の場合は記入式
その他	維持管理上の改善項目	記入式
	今後改善すべき事項	〃
	改築・更新・補修等の将来の対応方法	〃
	その他	〃

(2) 調査結果

2017 年度の現地調査および管理者へのヒアリング¹⁾および、2018 年度のアンケートの主要項目の、施設諸元、運用方法、損傷の有無、点検の方法・頻度の調査結果を取り纏めた一覧表を次ページに示す。

なお、2017 年度の現地調査・管理者ヒアリングの詳細内容は 2017 年度報告書¹⁾に示す。また、2018 年度のアンケート用紙および調査結果は、章末の付録 (1)に添付する。

表-4.1.1.2 施設調査結果一覧表（主要項目）

調査年	施設名 事業者	供用開始 年	区分	貯留方式	内径(m)	土被り (m)	標準部 セグメント	セグメント 厚さ(mm)	二次覆工の 有無	制限水位	損傷の有無	点検方法	点検頻度	将来の対応方法、 改善すべき事項など
2017	神田川・環状七号線 地下調節池 東京都建設局	H9年	河川	完全貯留	12.5	34~43	コンクリート 合成	600	無し	地表面	有り(多数)	目視	5年に1回	ポンプ等機器の更新
		H17年						350	無し		無し			
	首都圏外郭放水路 国土交通省関東地方整備局	H18年	河川	流下型貯留	10.6	50	コンクリート	600	無し	地表面	有り(約140箇所)	目視	年数回	排水ポンプ運転の燃料費 が高価
								650			有り(約7000箇所)			
								600			有り(数不明)			
	豊屋川北部地下河川 大阪府豊屋川水系改修工営所	H15年	河川	完全貯留 (暫定運用 時)	7.5	30~40	合成	370	無し	地表面	無し	目視	5年に1回	立坑へのエレベータ等の 設置、老朽化対策
		H22年			5.4			250			無し			
	北浜達坂貯留管 大阪市建設局	H27年	下水道合流 雨水	完全貯留	6	40~50	コンクリート	300	無し	地表面	無し (点検は供用開始後 1回のみ実施)	今後検討	供用開始後 1回のみ	維持管理時の堆積物の 除去方法
											無し			
2018	施設A	H13年	下水道分流 雨水	完全貯留	3~9	10~30	コンクリート	275~625	無し	管頂	無し	目視	不定期	未定
	施設B	H13年	下水道合流 雨水	完全貯留	8	30~40	コンクリート	300	あり	管頂	無し	目視	2回/年	-
	施設C	H20年	下水道合流 雨水	流下型貯留	6	5~20	コンクリート	300	あり	立坑の地表面	無し	目視	5年に1回	現在は問題なく運用
	施設D	H16年	河川	完全貯留	10	50~100	コンクリート	550	無し	管頂	有り	目視	供用開始後 1回のみ	設備の長寿命化計画に基 づいた整備・更新
	施設E	H24年	下水道分流 雨水	完全貯留	3	20~30	コンクリート	250	あり	管頂	無し	未実施	-	排水P点検時に、管渠の 破損や土砂堆積なし
	施設F	H24年	下水道分流 雨水	流下型貯留	3~5	10~30	コンクリート	250	あり	管頂	不明	今後検討	-	比較的新しいため点検未 実施

(3) 調査結果の整理と考察

1) 損傷が発生している施設の特徴

調査対象施設は 10 箇所であるが、今回、調査した内径 10m 以上のコンクリートセグメント（二次覆工なし）の貯留管で損傷が発生しており、いずれも供用開始が平成 18 年以前である。内径 10m 以上のコンクリートセグメント（二次覆工なし）の貯留管で損傷していない施設は、調査した施設では無い。

損傷している施設のうち、「神田川Ⅰ期」、「外郭放水路」は異常時最高水位を地表面付近として設計され運用されていたが、「施設 D」の管理制限水位は管頂となっている（但し、制御方法は未確認）。

「神田川Ⅰ期」では損傷確認後、制限水位を管頂にして運用されており、損傷は進行していないようである。

調査した施設は、いずれの施設も異常時最高水位は地表面付近として設計されているが、上記の通り、内径 10m 以上のコンクリートセグメントでは損傷が発生している。

2) 運用方法の整理

調査対象施設は 10 箇所の管理制限水位は、地表面が 5 箇所、管頂が 5 箇所であり、管頂としている 5 施設の貯留方式は、4 施設が完全貯留方式で流下型貯留は「施設 F」のみであるが、流下型貯留で制限水位を管頂とする制御方法は未確認である。

3) 管理方法の整理

調査した施設で、内径 10m 未満のコンクリートセグメント二次覆工なしは 2 施設であるが、「北浜逢阪貯留管」は比較的新しく、調査時点での点検は 1 回のみであった。また、「施設 A」は点検頻度が不定期で回数は不明との回答であった。一方、定期的に点検を行っているとの回答のあった施設は、調査対象 10 箇所のうち 5 箇所であった。

現地調査やヒアリングから、堆積物を容易に除去できないことや、換気・照明などの安全対策設備や点検者・機器の搬出入施設の整備が不十分なことから、維持管理・点検が簡単には実施できない施設も見られた。また、維持管理・点検の実施や維持管理施設を整備するために要する費用（予算）の確保が困難であるとの意見もあった。

3) 調査結果の考察

損傷が発生していないと回答されている内径 10m 未満のコンクリートセグメント二次覆工なしの 2 施設のうち 1 施設は、比較的新しく点検も 1 回のみしか実施されていない。もう 1 施設は、点検頻度が不定期で回数が不明である。よってこれらの施設は、今後損傷が発生する、あるいは発生している可能性は 0 では無いため、点検が必要と考えられる。

「神田川Ⅰ期」では損傷確認後、制限水位を管頂にして運用されており損傷は進行していないが、「施設 D」では管理制限水位は管頂となっているが損傷が発生しているため、制限水位を管頂としている施設については、貯水時の水位記録などから、貯留時に制限水位が維持できているかを確認して、制御方法の改善に反映することが好ましい。

定期的に点検を行っているとの回答のあった施設は、調査対象 10 箇所のうち 5 箇所であるが、目視による点検であること以外に詳細な点検方法は把握できていない。既存の下水道維持管理マニュアル^{3) 4)}には剥離、剥落など内水圧の作用による損傷を対象とした点検方法が記載されていないことから、施設により点検方法が異なっていると考えられる。

4.2 管理運営方法に対する提案

本節では、内水圧が作用するシールドトンネルのコンクリートセグメントに生じる剥離損傷を防止、あるいは早期発見するための管理運営方法を提案する。

(1) 水位管理による剥離損傷の防止

- ・ トンネル頂部に水位が上昇した時点でトンネル内への水の流入を止める措置（水位管理）を行うことは、セグメントの剥離損傷を防止するための有効な対策の一つである。
- ・ ただし、この水位管理方法はセグメントの剥離損傷の防止には有効であるものの、立坑に貯水できないことに留意する必要がある。

（剥離損傷の原因とメカニズム）

本研究会の研究対象である内水圧シールドトンネルは、住宅等の浸水被害を防止するため、豪雨によって増加した河川や下水の水を一時的に貯留する施設である。

シールドトンネルは複数のセグメントの継手をボルトでつなぐことによって断面が構成されている。空のシールドトンネルには周囲から土圧と水圧が働くので、トンネルには圧縮力（軸力）が働いて全体に圧縮され、セグメントの継手は締まって閉じている。豪雨等によって河川や下水が増水し、水がトンネル内に流入すると、内水圧がトンネルの内側から作用し、トンネルに働いていた圧縮力（軸力）が減る。そのため、トンネルは全体に膨張するとともに、セグメントの継手は開いて剛性低下を生じ、トンネルの断面の形も変化する。

このように、内水圧の変動によって生じるトンネルの圧縮・膨張と断面形状の変化につれて隣接するセグメントをつないでいる継手に目開きや局部接触が生じることが、内水圧の変動によってシールドトンネルのコンクリートセグメントに剥離損傷が生じる主要な原因であり、基本的なメカニズムと考えられる。

（水位管理によるセグメント剥離損傷の防止対策）

上記の損傷メカニズムから、コンクリートセグメントの剥離損傷を抑制するためには内水圧の変動量を抑制することが効果的と考えられる。

トンネルの内水圧はトンネル内の貯留水位の上昇に伴って増加する。貯留水位がトンネル頂部に達するまではトンネル内の水位は緩やかに上昇するが、貯留水位が立坑に達すると、立坑はトンネル本体に比べ容積が小さいため、水位が急激に上昇し、それに伴ってトンネルの内水圧が一気に増大することになる。したがってトンネル頂部まで水位が上昇した時点でトンネル内への水の流入を止める措置（水位管理）を行うことがセグメントの剥離損傷を防止するための有効な対策と考えられる。

実際に、本研究会で調査した東京都の神田川・環状七号線地下調節池（第一期）では、供用後における河川水の流入によってコンクリートセグメントに剥離損傷が生じたことから、最近ではトンネル頂部に水位が達した時点でトンネル内への水の流入を止める措置が取られていた。

（水位管理による損傷防止対策の留意点）

ここで提案した水位管理手法はセグメントの剥離損傷の防止には有効であるものの、立坑に貯水できないことに留意する必要がある。内水圧トンネルは計画された水量を貯留できるように設計されている。そのため、立坑の体積も計画貯水量に含めている施設では、制限水位をトンネル頂部までとするためには貯留施設の増設が必要である。また、流下型貯留施設の場合には貯留時の排水量を増加させる等の配慮が必要になる。

(2) 維持管理施設の設置

- ・ 効率的な維持管理や点検を可能とするために、設計時から適切な維持管理施設の配置を考慮する必要がある。
- ・ 大口径トンネルでは、規模や深度に配慮した適切な維持管理施設の設置が必要である。

(維持管理施設の必要性)

維持管理施設の設置や維持管理は、費用（予算）の確保が課題となるが、点検頻度が少なくなっている原因として、効率的な維持管理や点検ができる施設が設置されていないことがあげられる。

現地調査を行ったうちの一施設は、深度 40m 程度の立坑に自動昇降設備が無く、立坑底部の溜水が排水できない状況であり、維持管理や点検の作業を行う場合に必要な照明や梯子などの器具の運搬が容易でないと思われた。また、ある施設では、貯留管入口のゲート付近の堆砂の除去が容易でないことや、換気設備が常設されていないことから、現地調査が実施できなかった。今後、さらに大深度での貯留施設の建設計画があることも踏まえると、これらの維持管理施設を充実しない場合、貯留後の早期点検や定期的な点検の重大な妨げになる可能性がある。

(大口径トンネルの維持管理施設例)

調査結果の損傷事例から判断して、特に大口径トンネルではトンネル頂部や側部の点検が可能となる様に維持管理施設を設置する必要がある。大口径トンネルの維持管理に望ましい施設としては以下が考えられる。

- ・ 大口径トンネルの側部や頂部の点検も可能なリフト付き点検車両がトンネル内に搬出入可能となる出入口の設置、および点検車両のトンネル内通行を考慮したトンネル底部形式の選択。
- ・ 高水圧が作用する貯留管は地下 40m 程度以上の大深度のものが多いため、管理者や作業者が容易に立ち入れる様な自動昇降設備の設置。
- ・ 維持管理作業時に必要となる換気・照明設備の設置。

(3) 点検方法

- ・ 高内水圧が作用する貯留管では、剥離、剥落などの損傷が発生する可能性が高くなるため、内水圧が小さい下水道幹線や水路トンネルなどに増して、適切な点検計画と実施が必要である。
- ・ 点検による軽度の損傷の早期発見に努め、対策を立案実施して致命的な損傷を未然に防ぐべきである。

(点検の必要性)

下水道施設や河川施設の点検の必要性は政令や法令で定められているが、内水圧が作用する貯留管では、内水圧が作用しない下水道・河川施設に増して点検や調査の必要性は高い。貯留管の点検・調査計画には、内水圧による損傷の点検・調査項目を加え、適切な時期や方法を勘案して点検を実施する必要がある。

点検の必要性が定められている法令の一例として、下水道法施行令を以下に示す。

「下水道法施行令（昭和三十四年政令第百四十七号）

第五条の十二

- 二 公共下水道等の点検は、公共下水道等の構造等を勘案して、適切な時期に、目視その他適切な方法により行うこと。」

(点検の重要性)

施設は損傷しない設計が実施されていることが前提であるが、損傷が起こった場合、これを放置すると重大な事故に繋がることになる。

高内水圧が作用する貯留管を長期間安全かつ経済的に供用するために、特に損傷の早期発見と損傷等の異常が進行性のあるものかどうかを判断することが重要で、そのためには、供用後の定期点検・調査だけでなく、以下のような調査を行うことが有用である。

①初期調査（竣工時および供用開始時の調査）

補修等の状況調査と記録の保管を図るべきである。原則として竣工時に損傷はないはずであるが、補修がされていたり、コンクリート躯体ではヘアークラック等が発生している可能性もあるので、竣工検査等での確認結果を記録として保管しておくことが重要である。

②臨時点検（貯留直後の調査）

貯留で内水圧が加わった直後の状況調査が必要である。これまでは内水圧が加わった直後の調査記録がなく、損傷等の異常が確認されてもどの時点で生じたものか把握できず、その場合、よほどの損傷でない限り、対策の緊急性の判断ができていないと考えられる。

③その他

既存の下水道維持管理マニュアル等^{3) 4)}は、腐食に対する点検項目が主となっているものが多いが、剥離、剥落など内水圧の作用による損傷を対象とした点検項目を追加する必要がある。貯留管を長期間にわたり安全に供用するための点検・調査方法（案）を章末の付録（2）に示す。

第4章 付録

(1) 2018 年度アンケート調査資料

2018 年度に実施したアンケートの調査結果一覧表と、調査先に配布したアンケート用紙を次ページより示す。

1) アンケート調査結果一覧表

付表-1 2018年度アンケート調査結果（その1）

	施設概要				貯留管諸元												貯留水位	流入施設				
施設名 (仮称)	供用開始 年	区分	目的	貯留方式	内径	延長	貯留容量	管渠勾配 () 内は設定理由		土被り	標準部 セグメント 種別	セグメン ト厚さ	設計内圧	二次覆工 の有無	防食対策	底部通行 路の有無	最小曲線 半径	制限水位	流入 箇所数	流入部スク リーンの有無	高落差 処理方法	流入頻度
A施設	H13年	下水道 分流雨水	浸水対策	完全貯留	3～9m	5.0km	10万m3	1.0‰ (将来の自然流下対応)		10～30m	コンクリート	275～ 625mm	350kN/m2	省略型	あり (鉄筋被り の確保)	あり (幅2～4m)	30m	管頂	4箇所	なし	らせん 案内路式	15回/年
B施設	H13年	下水道 合流雨水	浸水対策 合流改善	完全貯留	8m	1.5km	8万m3	5.0‰		30～40m	コンクリート	300mm	－	あり (厚－)	なし	なし	90m	管頂	5箇所	あり (目幅40～ 50mm)	渦流式	34回/年
C施設	H20年	下水道 合流雨水	浸水対策 合流改善	流下型 貯留	6m	3.0km	7万m3	0.5～30.0‰ (管内流速、既存埋設管 との離隔確保)		5～20m	コンクリート	300mm	不明	あり (厚－)	なし	なし	80m	地表面	13箇所	なし	柵式	不明
D施設	H16年	河川	浸水対策	完全貯留	10m	2.0km	18万m3	1.0‰ (将来的な延伸を考慮)		50～100m	コンクリート	550mm	400～ 750kN/m2	省略型	なし	なし	150m	管頂	1箇所	あり (目幅160mm)	らせん 案内路式	9回/年
E施設	H24年	下水道 分流雨水	浸水対策	完全貯留	3m	1.5km	11万m3	0.8‰ (標準勾配)		20～30m	コンクリート	250mm	350kN/m2	あり (厚 150mm)	なし	なし	15m	管頂	6箇所	なし	柵式	1～2回/年
F施設	H24年	下水道 分流雨水	浸水対策	流下型 貯留	3～5m	1.0km	30万m3	0.8‰ (将来の自然流下対応)		10～30m	コンクリート	250mm	なし	あり (厚 250mm)	なし	なし	30m	管頂	4箇所	なし	らせん 案内路式	不明 (雨天時)
	排水設備					堆砂対策				管渠内の環境					管渠内点検				その他			
施設名 (仮称)	排水槽への 導水方式	排水方法	計画 排水量	排水時間	排水時間設 定理由	堆砂状況	除去手法	揚出方法	年間費用	損傷の 有無	損傷状況	補修方法	臭気の 有無	脱臭設備 の有無	点検方法	点検頻度	搬出入口 開口形状	搬出入 設備	維持管理上 の改善項目	改善すべ き事項	将来の 対応方法	その他
A施設	人孔ピット	ポンプ排水 (水中ポンプ)	0.58m3/ 秒	48時間	許容排水量	あり (厚10cm未満)	除去なし	除去なし		なし		－	なし	なし	目視	不定期	1400mm× 2000mm (ポンプ搬出 入用)	なし	特になし	特になし	未定	－
B施設	管底から下 部引抜き	ポンプ排水 (地上ポンプ)	－	－	－	あり (厚5cm程度)	人力洗浄	吸引車	約750万円	なし	－	－	あり	あり	目視	2回/年	4200mm× 4210mm	ゴンドラ	－	－	－	－
C施設	管底から下 部引抜き	自然排水	28m3/分	12時間	次降雨への 備え	ほとんどなし	機械除去	吸引車	－	なし	－	－	なし	なし	目視	5年に1回	3000mm× 5000mm	なし	現段階でなし	－	現在は未定	現在は問題なく運用
D施設	管底から下 部引抜き	ポンプ排水 (地上ポンプ)	62m3/分	48時間	計画降雨の 頻度	あり (厚10cm程度)	機械除去	クレーン、 ダンプ、 バックホウ	約3000万円 (1回のみ実施)	あり	ひび割れ 剥離 剥落	なし	なし	あり	目視	供用開始後 1回のみ実施	6000mm× 4000mm	クレーン	－	－	設備の長寿命 化計画に基づ いた整備・更新	－
E施設	人孔ピット	ポンプ排水 (水中ポンプ)	5m3/分	24時間	腐敗防止	ほとんどなし	未実施	未実施	－	なし	－	－	なし	なし	未実施	－	1600mm× 1500mm (ポンプ搬出 入用)	吊り上げ レール	特になし	特になし	未検討	排水P点検時に、管渠の破損 や土砂堆積なし
F施設	人孔ピット	ポンプ排水 (地上ポンプ)	15m3/分	30時間	許容排水量	未調査のため不明				未点検のため不明			なし	なし	今後検討		φ600、 1200mm	なし	なし	なし	なし	比較的新しいため点検未実 施

2) アンケート用紙

雨水貯留管（シールドトンネル）の維持管理に関する調査

貴施設につきまして、以下の通り回答をご記入下さい。

（ ）内については、最も相応しい内容をご記入下さい。

☐内については、ふさわしいものに○印を付けて下さい。

1. 施設概要について

- 1-1. 施設名 ()
- 1-2. 事業者 ()
- 1-3. 供用開始年月日 () 年 () 月
- 1-4. 区分
- 1-5. 目的
- 1-6. 貯留方式

2. 貯留管諸元について

- 2-1. 内径 () mm , 外径 () mm
- 2-2. 延長 () m
- 2-3. 貯留容量 () m³
- 2-4. 管渠勾配 () ‰

管渠勾配の設定根拠

☐ ①将来計画の自然流下対応

☐ ②その他 ()

- 2-5. 土被り () ~ () m

- 2-6. 標準部セグメント種別

厚さ(桁高) () mm

- 2-7. 設計内圧 () kN/m²

- 2-8. 二次覆工の有無

二次覆工ありの場合の鉄筋の有無

- 2-9. 防食対策

- 2-10. 底部通行路の有無

ありの場合の底部通行幅の設定根拠 ()

- 2-11. 最小曲線半径 () m

3. 貯留水位について

3-1. 貯留の制限水位

管渠の管頂まで	・	立坑で地表面まで	・	その他（	）
---------	---	----------	---	------	---

4. 流入施設について

4-1. 流入箇所数（現状）（ ）箇所

4-2. 流入部スクリーンの有無

なし	・	あり（目幅	mm）
----	---	-------	-----

4-3. 高落差処理方法

なし	・	棚式	・	らせん案内路式	・	渦流式	・	その他（	）
----	---	----	---	---------	---	-----	---	------	---

4-4. 流入頻度（ ）回／年

5. 排水設備について

5-1. 排水槽への導水方式

管底から下部引抜き	・	人孔ピット	・	その他（	）
-----------	---	-------	---	------	---

5-2. 排水方法

自然排水	・	ポンプ排水（水中ポンプ or 地上ポンプ）
------	---	-----------------------

5-3. 計画排水量（ ）m³/分

5-4. 排水時間（ ）時間

排水時間設定設定理由

腐敗防止	・	許容排水量	・	その他（	）
------	---	-------	---	------	---

6. 堆砂対策について

6-1. 管渠内の堆砂状況

ほとんど無し	・	あり（堆砂厚さ：	cm程度）
--------	---	----------	-------

6-2. 堆砂除去の手法

ブラッシング	・	人力洗淨	・	機械除去	・	その他（	）
--------	---	------	---	------	---	------	---

6-3. 堆砂揚出方法

サンドポンプ	・	吸引車	・	バケット	・	その他（	）
--------	---	-----	---	------	---	------	---

6-4. 堆砂除去の年間費用 約（ ）円

7. 管渠内の環境について

7-1. 管渠の損傷の有無

無し ・ 有り

損傷ありの場合 損傷の状況 (

)

〃

補修実施の有無

なし ・ あり

補修実施ありの場合 補修方法 (

)

7-2. 臭気の有無

なし ・ あり

7-3. 脱臭設備の有無

なし ・ あり (m^3/s 、設定理由

)

8. 管渠内点検について

8-1. 管渠内点検方法

目視 ・ TVカメラ ・ その他 (

)

8-2. 管渠内点検頻度

() 回/年

8-3. 搬出入口開口形状

() mm × () mm

設定理由 (

)

8-4. 搬出入設備の有無

なし ・ リフト ・ クレーン ・ その他 (

)

9. その他

9-1. 維持管理上の改善項目

(

)

9-2. 今後、改善すべき事項

(

)

9-3. 改築・更新・補修等の将来の対応方法

(

)

9-4. その他

(

)

ありがとうございました。

(2) 内水圧が作用するシールド管渠の点検・調査方法（案）

内水圧が作用するシールド管渠を長期間にわたり安全に供用するためには、維持管理は適切な時期、管理体制の下で、計画的に行われなければならない。本研究会の調査・研究結果を基に策定した点検・調査方法（案）を以下に示す。

1) 点検・調査方法の概要

貯留施設における維持管理の点検・調査は、以下のように実施する。

- ① 初期調査：建設完成時
- ② 定期点検：1年に1回
- ③ 臨時点検：貯留後や大規模地震発生後等
- ④ 定期調査：5年に1回程度
- ⑤ 詳細調査：定期点検、定期調査、臨時点検で必要と判定された場合

初期調査は、施工時の記録整理、供用前の初期点検、供用開始直後の点検を行うものとし、維持管理開始時点の構造物の性能に関する初期状態を把握することが目的となる。

定期点検は、経年による劣化、損傷の有無や程度の把握が目的であり、点検の頻度は、「下水道維持管理指針 2014年版」³⁾のオフサイト貯留施設（雨水調整池）において、浸水発生の予測される梅雨及び台風期等の前に実施するものとされていることから、1年に1回の実施とした。

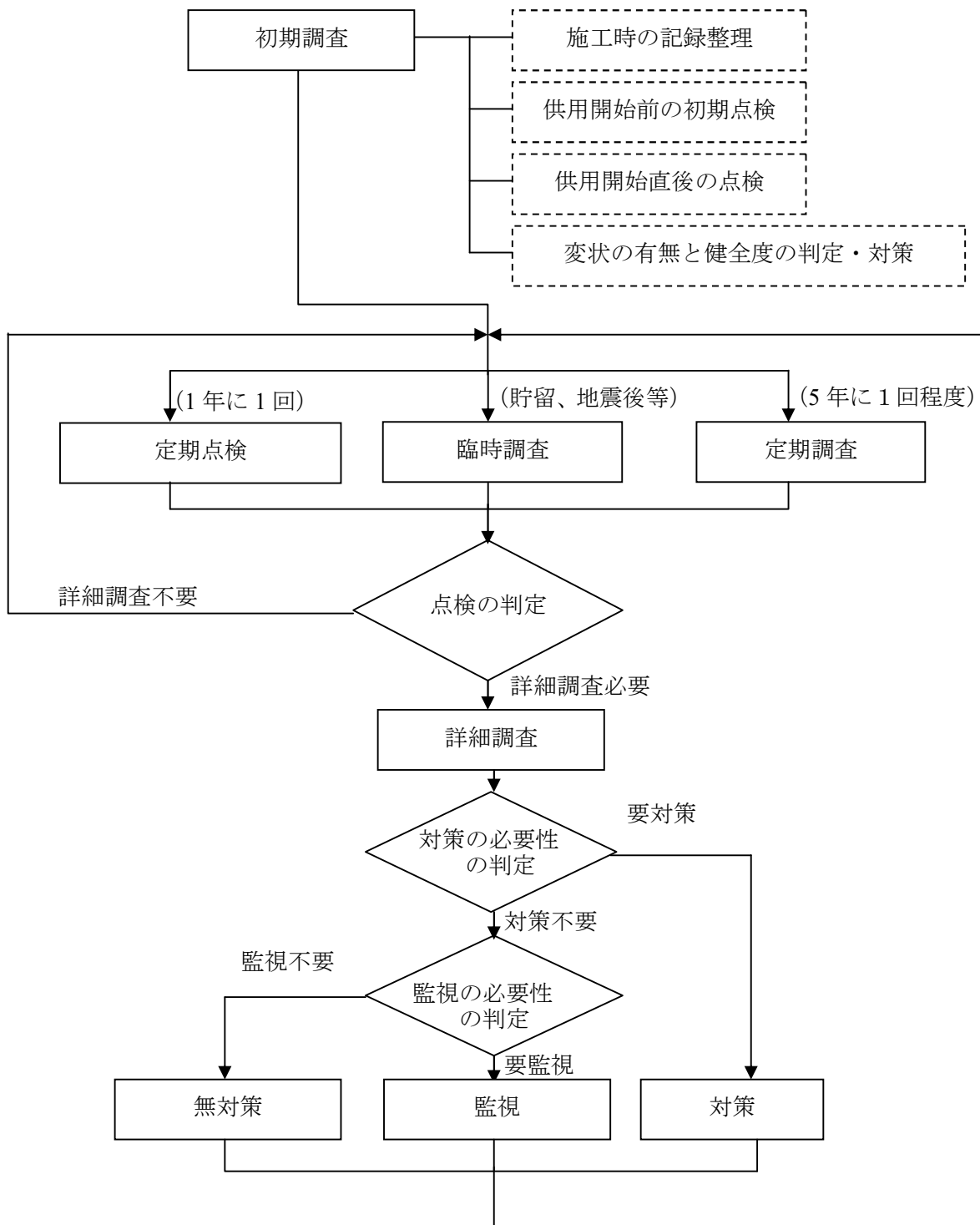
臨時点検は、内水圧の作用や地震等により変状の生じた、あるいはその可能性のある構造物や部位・部材等を対象として、大規模な貯留や地震後等を実施することが望ましい。

定期調査は、定期点検では把握できないような構造物全体の劣化、損傷の有無やその程度をより詳細に把握することが目的であり、調査頻度は下水道施設等の点検で実施されている5年に1回程度の実施とした。

詳細調査は、定期点検、定期調査または臨時点検で異常が確認された場合に必要に応じて実施するものとし、詳細調査の結果に基づいて、対策工、監視または無対策の判定を行うものとした。

なお、点検、調査および対策工などは記録書として保管・整理するとともに、次の点検を行う際、事前にこの記録書を十分に調べて管理のポイントを念頭に置き、効率的な維持管理を行うものとする。

次ページより、貯留施設の点検・調査のフロー（案）、および点検の目的、頻度、方法、判定（案）を示す。



付図-1 貯留施設の点検・調査のフロー（案）

付表-2 点検の目的、頻度、方法、判定（案）

項 目	初期調査	定期点検	臨時点検
目 的	・構造物の性能に関する初期状態の把握。 ・劣化状況等を検討するための初期データの記録。	・劣化、変状の程度の早期把握。 ・詳細調査の必要性の判定。	(同左)
頻 度	建設完成時	1年に1回 (定期調査を行う年度は省略)	貯留後、大規模地震発生後等
対 象	施設全体	(同左)	(同左)
方 法	目視、計量、測量他	・概略目視観察が主であり、必要に応じ計量、測量等を実施	(同左)
判定区分	—	詳細調査を行う必要があるかないかの判定	(同左)
判定基準	—	判定例の参考図書 「下水道事業のストックマネジメント実施に関するガイドライン」 ⁵⁾	(同左)

付表-3 調査の目的、頻度、方法、判定（案）

項 目	定期調査	詳細調査
目 的	・劣化、変状の程度の早期把握。 ・詳細調査の必要性の判定。	定期点検、定期調査、臨時点検で発見された異常個所の詳細な調査による原因の把握
頻 度	5年に1回	定期点検、定期調査、臨時点検の結果により実施
対 象	施設全体、構造物の細部	定期点検、定期調査、臨時点検の結果により設定
方 法	詳細な目視観察や、部材の強度や健全度、漏水や沈下・変位の有無などの計量や測量を実施。	
判定区分	詳細調査を行う必要があるかないかの判定	点検結果の判定例 区分Ⅰ（健全）：監視や対策を行う必要のない状態 区分Ⅱ（予防保全段階）：状況に応じて、監視や対策を行うことが望ましい状態 区分Ⅲ（早期措置段階）：早期に監視や対策を行う必要がある状態 区分Ⅳ（緊急措置段階）：緊急に対策を行う必要がある状態
判定基準	(定期点検に同じ)	

[第4章 参考文献]

- 1) 土木学会関西支部共同研究グループ: 内水圧が作用する地下貯留トンネルの力学挙動に関する調査・研究 平成 29 年度報告書, pp2-1～2-21, 2019
- 2) 財団法人下水道新技術推進機構: 大深度雨水貯留管構築に適用するシールド工法に関する技術資料, 2008 年 3 月, pp325～330
- 3) 公益社団法人日本下水道協会: 下水道維持管理指針（実務編）, 2014 年版
- 4) 公益社団法人日本下水道協会: 下水道管路施設の点検・調査マニュアル（案）, 平成 25 年 6 月
- 5) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部 国土交通省国土技術政策総合研究所: 下水道研究下水道事業のストックマネジメント実施に関するガイドライン-2015 年版-, 平成 27 年 11 月

5. 内水圧が作用するシールド管渠の力学挙動に関する考察

本章では、シールド管渠の設計に用いられている梁ばねモデルによる設計法、並びに土と構造物の相互作用を考慮した弾性 FEM による設計法について説明し、両設計法の長所を取り入れたコラボ解析手法を提案する。そして、この設計手法を首都圏外郭放水路の挙動予測へ適用した結果を示し、セグメントの損傷原因を推定する。

5.1 梁ばねモデルによる設計法の概要と問題点

(1)「内水圧トンネル設計の手引き」¹⁾

図-5.1.1 に「内水圧トンネル設計の手引き」の設計法の概要を示す。

この設計法では、荷重作用段階を自重、土水圧、内水圧の3通りに分け、土圧、外水圧、内水圧を鉛直・水平成分で与え、自重に対する反力を鉛直等分布で与える。さらにシールド管渠の変形に対する地盤反力として、土水圧によって生じる管渠の変形量に比例するばね力を与える。

この設計法の問題点は以下の通りである。

- ・ 設計土圧を管渠の変形と無関係に経験的に与えている。実際には、管渠の変形と土圧は相互に関連するので、単独に決定できない。
- ・ 地盤反力は、外荷重(土圧と外水圧)と内水圧によって管渠に生じる変位が外向きの範囲にのみ、半径方向変位量に比例させた値を経験的に与えている。
- ・ 管渠面に作用する土圧と自重反力、および静水圧(外水圧と内水圧)を、円形管渠の上下面に等分布、側面に台形分布でそれぞれ与えているため、円形の管渠面にせん断応力が発生することになる。土圧と自重反力については、これまで実験的に確認されてきた管面滑動条件と矛盾し、水圧については物理的にあり得ない分布となっている。
- ・ 内水圧変動によってシールド管渠に生じる軸力変動を考慮していない。実際は軸力が変動すると、セグメントの継手剛性が変化する。

一方、「内水圧トンネル設計の手引き」を策定する際に、内水圧载荷に伴う軸力変動がトンネルの変形挙動、およびセグメント継手の曲げ剛性に及ぼす影響を調べた試験が実施されている。図-5.1.2 は、内径 4.7 m の実規模 RC トンネルの集中線荷重試験の概要を示している。また、図-5.1.3 は、この集中载荷試験で用いたセグメントを模擬した供試体の継手曲げ試験の結果である。

これらの試験から判明した事項は以下の通りである。

- ・ 軸力 N と内水圧の有無、および荷重载荷の順番を変化させて頂・底部に集中線荷重を载荷した試験を実施し、 N を加えない場合の測定鉛直たわみ量 δ が N を加えた場合よりも 1.7 倍程度大きくなったことから、内水圧载荷による N の減少がトンネルの曲げ剛性 EI の減少を引き起こすことを明らかにした。
- ・ セグメント供試体の継手曲げ試験の結果は、軸力 N を加えない場合の継手曲げ剛性が N を加えた場合よりもかなり小さくなったので、これが上記の集中線荷重試験の結果をもたらしたことを確かめた。

しかし、これらの実験事実は設計法として取り入れられるまでには至らなかった。

(2) 「鉄道総研法」^{2)~4)}

図-5.1.4 に「鉄道総研法」の概要を示す。この設計法は、「内水圧トンネル設計の手引き」の問題点のうち、以下の点を改良している。鉄道トンネルが対象のため、内水圧は考慮していない。

- ・ 外水圧を法線方向で与えている。
- ・ セグメント継手の回転ばねの軸力依存性を考慮し、回転ばねの挙動を軸力 N に依存するバイリニアで表している。

「鉄道総研法」は、上記以外は「内水圧トンネル設計の手引き」と同様の問題を有する。なお、自重反力は地盤ばねで受けるものとし、「内水圧トンネル設計の手引き」と変えているが、次項で述べるようにこの点にも問題を残す。

(3) 「神田川Ⅱ期設計基準」⁵⁾

図-5.1.5 に「神田川Ⅱ期設計基準」の概要を示す。図-5.1.6 に「内水圧トンネル設計の手引き」から総研法を経て「神田川Ⅱ期設計基準」に至る設計法の改良過程を示す。「神田川Ⅱ期設計基準」は、図-5.1.6 に示したように、「鉄道総研法」のセグメント回転ばね定数の決定過程に内水圧の変動による N の影響を取り入れている。

「神田川Ⅱ期設計基準」の問題点は、以下のようにまとめることができる。

- ・ 鉛直土圧と側方土圧は経験的に決定し、管渠が変形しても設計土圧を変えない。実際は土と構造物の相互作用により管渠の変形と土圧は連動して変化する。
- ・ この設計法は、図-5.1.5 に示したように、鉛直、水平両方向の土圧はバランスさせているが、土圧に起因する管渠の変形、および力の釣合いに起因する反力(図-5.1.7)の両者を地盤ばねで支持するとしている点に問題を残す。すなわち、地盤中の管渠が純粋せん断変形する時の弾性理論解(Muir の解)を用いて決定した地盤反力係数(地盤のばね定数 k)を、管渠の変形に対してだけでなく、管渠自重と浮力によって生じる不平衡力(=反力)に起因する剛体変位に対しても適用している所に問題がある。
- ・ 管渠面の開口の扱い方として、管渠の変形が内側の範囲は地盤ばね無しとしている。ばね無しなら管渠面と地盤は開口するはずだが、設計土圧はゼロとしない。
- ・ 内水圧が働く場合、裏込めの完全硬化を考慮して地盤のせん断ばね(垂直ばね $\times 1/3$)を考慮することになっているが、実際の管渠面の境界条件は滑動条件にごく近い。

5.2 弾性 FEM による設計法の概要と問題点

(1) 弾性 FEM 解析の概要

東田らは、これまで長年にわたって埋設管渠の土圧と変形問題に取り込み^{6)~13)}、弾性 FEM を用いた埋設管渠の設計法を提案してきた^{14)~19)}。この一連の研究で判明した事項は以下の通りである。

- ・ 埋設管渠の土圧と変形は、土と構造物の相互作用として決まり、管面の境界条件(滑動)、地盤側方の境界条件(埋設方式によって変化)、管渠と地盤の相対剛性によって支配されること

を多数の遠心実験により確認した。

- ・ 弾性 FEM による解析手法の妥当性を多数の遠心実験との照合により検証した。
- ・ 弾性 FEM を用いた埋設管渠の設計法を提案し、この設計法が土と構造物の相互作用を正當に評価することを確認した。

(2) FEM 解析による設計法の問題点

下水道施設耐震計算例(管路施設編 2015 年版)²⁰⁾には、コンクリート系セグメントと鋼製セグメントを用いたシールド管渠の設計例が示されており、シールド管渠は継手の無い一様断面のトンネル構造としてモデル化されている。ところが、提案設計法を用いて下水道施設耐震計算例に記載されたシールド管渠の設計予測を実施したところ、常時において、コンクリートセグメントでは抵抗曲げモーメント、鋼製セグメントでは許容応力をそれぞれ超える結果となった。この結果は、実際に施工されたシールド管渠に問題が生じていない事実と矛盾することから、提案設計法は継手を有するシールド管渠の構造を扱えないことが判明した^{19), 21)}。

5.3 弾性 FEM と梁ばねモデルのコラボ設計法の提案

5.1 で述べたように、「神田川Ⅱ期設計基準」は継手を有するシールド管渠の内水圧変動に伴う剛性変化は扱えるが、シールド管渠の変形に伴う土圧の変化を扱うことができない。一方、5.2 で述べたように、弾性 FEM による設計法は土と構造物の相互作用を正當に評価するが、継手を有するシールド管渠の構造を扱えない。そこで本節では、弾性 FEM による設計法で土圧を、また「神田川Ⅱ期設計基準」の梁ばねモデルにより継手を有するシールド管渠の構造をそれぞれシミュレートし、両者を組み合わせた設計法(コラボ設計法)を提案する。

(1) η と内水圧の有無を変えた時の FEM 解析結果

外郭放水路第 2 工区のシールド管渠(コンクリートセグメント)²²⁾を対象として、内水圧無しの場合と G.L.+4 m の異常時内水圧有りの場合について FEM 解析を実施した。シールド管渠は継手の無い一様断面とし、 EI の減少率 η をそれぞれ 1、0.2 に変化させた。解析方法の詳細は 5.4(1)a) を参照されたい。

解析で得られた外力、 M 、 N の分布を図-5.3.1(内水圧無し)と図-5.3.2(G.L.+4 m の異常時内水圧有り)に示す。各図の左側、右側にそれぞれ EI の減少率 η が 1、0.2 の場合の結果を表す。また、表-5.3.1 にこの解析で得られた鉛直たわみ量 δ_v と水平たわみ量 δ_h を示す。 δ_v は収縮を、 δ_h は膨張をそれぞれ正として表している。

これらの図と表から、内水圧無し、有りに拘わらず、 η の減少によって以下が生じることが分かる。

- ・ 外力(有効土圧 σ +水圧)は等分布に近づく。
- ・ M は減少する。
- ・ N はほぼ変化が無い。
- ・ δ_h は増大する。 δ_h の変化傾向は内水圧の有無によって異なる。

次に、両図の同一 η の結果の比較から、内水圧の有無の影響として以下が分かる。

- ・ 外力は、内水圧が無い場合の方が内水圧有りの場合よりも大きい。
- ・ M は内水圧の有無の影響がほとんど無い。

- ・ N は内水圧有りの方が内水圧無しの場合よりもごく小さい。
- ・ δ_v は内水圧有りの方が内水圧無しの場合よりも小さいが、 δ_h は逆に内水圧有りの方が内水圧無しの場合よりも大きい。すなわち、管渠は内水圧载荷によって全体に膨らむ。

(2) 弾性 FEM と梁ばねモデルのコラボ設計法の概念

図-5.3.3 にコラボ設計法の概念を示す。図の太線は FEM 解析によって得られた継手の無いシールド管渠の鉛直たわみ量 δ_v と曲げ剛性 EI の減少率 η の定性的な関係を示しており、 η が小さくなって管渠の曲げ剛性が減少するほど、 δ_v は増大する。図中の丸数字は、アスタリスク (*) 無しが FEM 解析による結果、アスタリスク付きが FEM 解析で得られた荷重(有効土圧、水圧、自重)を梁ばねモデルに与えた時の δ_v を FEM 解析で与えた η と同じ位置にプロットした結果である。図-5.3.4 は、図-5.3.3 に丸数字で示した位置における管渠構造(継手の有無)と有効土圧分布の定性的関係を表している。以下、図-5.3.4 に示した管渠構造と有効土圧分布を管渠の状態と呼ぶ。

図-5.3.3 の丸数字のプロットと矢印は、図-5.3.4 に示した管渠の状態の変化によって $\delta_v \sim \eta$ 関係が、内水圧の有無に拘わらず、定性的に以下のように変化することを示す。

- ・ FEM 解析で得られた $\eta=1$ における δ_v は図-5.3.3 の①にプロットされる。この時の管渠の状態を図-5.3.4 の①に示す。
- ・ ①の土圧を梁ばねモデルに与えた状態が図-5.3.4 の①*で、継手の存在により δ_v は増大し、図-5.3.3 では①*の位置にプロットされる。
- ・ 図-5.3.3 の①*の δ_v と FEM で得られた太線との交点を②とする。この状態は、図-5.3.4 では②で表され、①よりも土圧は均等となるが、 η が小さいため δ_v は①よりも大となる。この δ_v は、梁ばねモデルに①の土圧を与えた①*の δ_v と等しい。
- ・ ②の土圧を梁ばねモデルに与えた状態が図-5.3.4 の②*である。軸力 N は、図-5.3.1 と図-5.3.2 で説明したように、内水圧に変動が無ければ、 η が変化してもほとんど変わらないので、継手の剛性は①*とあまり変わらない。一方、②*の δ_v は、①*よりも土圧が均等のため、①*の δ_v (=②の δ_v) よりも小さくなり、図-5.3.3 の②*にプロットされる。
- ・ 以下、これを繰り返して収束した点が、管渠の状態、すなわち土圧分布と管渠構造の収束点を表す。

5.4 コラボ設計法の外郭放水路への適用例

外郭放水路第2工区を対象として弾性 FEM 解析と梁ばねモデルによるコラボ設計を行った。

(1) コラボ設計法の概要

a) FEM による解析方法

FEM 解析では、地盤とシールド管渠を線形弾性体と仮定し、土自重、管渠自重、水圧を同時に与えて管渠面に作用する垂直土圧と管渠の変形を求めた。解析手法の詳細は文献^{14)~19)}を参考にされたい。

図-5.4.1 に解析対象としたシールド管渠の埋設条件と FEM 解析に用いた入力定数を示す。

シールド管渠は、継手を無視した一様な円環とし、外径 $D=11.9$ m、厚さ $t=0.65$ m、 $E_p=32.6$ GPa、 $\nu_p=0.167$ 、 $\gamma_p=26$ kN/m³ を与えた。土被り高は 50 m とした。地盤は均一地盤に置き換え、弾性係数 E_s は管側深度の周辺地盤の N 値を用いて $E_s=2800N=140$ MPa、ポアソン比 ν_s は $K_0=0.5$ から $\nu_s=1/3$ とし、単位体積重量は地表面から管側深度までの平均有効重量をとって $\gamma'=8.78$ kN/m³ を与えた。外水位は地

下水位である G.L. -4 m を与え、内水圧なしと異常時内水圧 (G.L. +4 m) 有りの 2 ケースについて解析を行った。

解析に用いた FE メッシュを図-5.4.2 に示す。管渠面の境界条件は、垂直剛性 $k_n=9.81 \text{ GN/m}^3$ 、せん断剛性 $k_s=0 \text{ GN/m}^3$ のジョイント要素を管渠表面と地盤の間に挿入して、せん断土圧 τ が働かない完全滑動条件を与えた。地盤側方の境界条件は K_0 条件とした。内水圧と外水圧は管渠の内面と外面にそれぞれ分布荷重として与えた。

b) 梁ばねモデルによる解析方法

梁ばねモデルを用いた解析では、地盤ばねを無視した梁ばね構造に、FEM 解析で得られた土圧、ならびに管渠自重と水圧を荷重として同時に载荷した。セグメント継手の回転ばね定数は「鉄道総研法」、リング継手のせん断ばね定数は「内水圧トンネルの手引き」に基づいて決定した。

図-5.4.3(a)～(c) に梁ばねモデルを示す。セグメントの弾性係数は図-5.4.1 に示した E_p と同じで、セグメントを曲げ剛性 $E_p I$ 、軸剛性 $E_p A$ を持つ梁としてモデル化した。なお、これらの剛性ではポアソン比は無視したが、この影響はわずかである。

図(a)に示すように、セグメント継手は回転ばねとして継手位置に設け、リング継手はせん断ばねとして隣接リングどうしを接続した。

図(b)にセグメント継手とリング継手の位置を示す。

図(c)に示すように、セグメント継手ばねは回転ばねとし、「鉄道総研法」に基づいてモーメント M ～ 回転角 θ の関係をバイリニアで与えた。なお、この図に示した M ～ θ 関係は、後述するコラボ計算において収束した時点のものである。図(c)の第1象限は、正曲げ状態（内側引張り）の M ～ θ 関係を示しており、軸力 N の作用により継手が開口せず、 $\theta=0$ のまま M が増大した後、 θ の増大につれて M が直線的に増大する範囲に移行する。図(c)の第3象限は負曲げ状態（外側引張り）の M ～ θ 関係を示す。

リング継手のせん断ばね定数 k_s は、「内水圧トンネル設計の手引き」の参考資料—4 に示された表 4.2 に基づいて、半径方向、接線方向とも、 $k_s=100 \text{ MN/m}$ を与えた。このように、セグメント継手の回転ばね定数とリング継手のせん断ばね定数の与え方を異なる設計法に基づいて決めたのは以下の理由による。

セグメント継手の回転ばねについては、内水圧が変動すると、シールド管渠の継手に働く軸力が変化し、これに追従して継手の回転ばねが変化する。この挙動を、「内水圧トンネル設計の手引き」では扱っていないのに対して、「鉄道総研法」ではこれを考慮しているため、「鉄道総研法」を採用した。

一方、「鉄道総研法」のリング継手は、空水状態のシールド管渠ではリング間の相対変位が非常に小さい（リング継手面にはせん断方向のずれがほとんど生じない）という実態に合わせて、セグメント本体のせん断剛性に相当する程度に非常に硬く設定する。そのため、内水圧トンネルに「鉄道総研法」の手法を採用すると、セグメント継手の内水圧による変形をリング継手で過度に拘束する可能性があると考えられる。そこで、リング継手のせん断ばねの与え方については「鉄道総研法」よりも柔らかいリング継手剛性を規定している「内水圧トンネル設計の手引き」の手法を用いることにした。なお、後述(5.4(2))するように、同じ鉛直たわみ量を与える FEM 解析と今回採用した梁ばねモデルの比較では、変形や曲げモーメントの違いはごくわずかであったので、結果的にリング継手の設定による影響は小さかったと考えられる。

c) 同一条件における両解析方法の比較

解析手法の違いによって解析結果に相違が生じないことを確認するため、構造と荷重を揃えた場合の断面力 (M と N)、および鉛直たわみ量 δ_v (圧縮が正) と水平たわみ量 δ_h (膨張が正) を FEM と梁ばねモデルによって求め、比較した。解析は外郭放水路第2工区の内水圧なしの条件で行った。FEM 解析では $\eta=1$ 、梁ばねモデルでは継手の剛性を ∞ ・地盤ばね無しとして構造を揃え、FEM 解析で得られた土圧、な

らびに管自重と外水圧を梁ばねモデルに荷重として与えた。

その結果、梁ばねモデルによる解析結果は、FEM 解析の結果に比べて、断面力(M と N)は最大値と最小値の平均誤差が M で3%程度、 N ではほぼ0%、たわみ量は δ_v 、 δ_h とも1%以内にそれぞれ収まることが分かった。したがって、両解析手法による計算結果はほぼ一致することが確認できた。

(2) 外郭放水路の解析結果

a) 収束計算の過程

図-5.4.4 にコラボ計算の過程で得られた鉛直たわみ量 δ_v と η (シールド管渠の曲げ剛性 EI の減少率)の関係を示す。図(a)が内水圧なし、図(b)が内水圧ありの場合である。両図の青太線が FEM 解析で得られた $\delta_v \sim \eta$ の関係を示す。また、赤の四角マークが FEM 解析で得られた各 η における有効土圧、ならびに管渠自重と水圧を梁ばねモデルに与えて求めた δ_v を η に対してプロットしたもので、アスタリスク付きの丸数字が計算順序を示す。いずれも $\eta=1$ の①*からスタートしたが、②*で δ_v が FEM 解析によるラインを下回ったので、 η を1よりも小さくして挟み込み計算を行い、FEM 解析と梁ばねモデルの δ_v がほぼ一致する時の η を決定した。

なお、このコラボ計算の過程で梁ばねモデルに与えた有効土圧は、フーリエ近似式によって求めたもの(本章付録参照)であり、図-5.4.4の青太線中の丸印で示した7通りの η において、近似式によって求めた有効土圧が FEM 解析によって得られた有効土圧と一致することを確認している。

b) 収束時の解析結果

図-5.4.5 は、FEM 解析によって得られた $\delta_v \sim \eta$ 曲線上に、コラボ計算で得られた収束点とその時の η 、 δ_v (圧縮が正)、および δ_h (膨張が正)の値を示している。 $\delta_v \sim \eta$ 曲線は赤ラインが内水圧無し、青ラインが異常時内水圧の場合である。内水圧なし、異常時内水圧の場合、それぞれ $\eta=0.89$ 、 0.79 で FEM 解析と梁ばねモデルの δ_v がほぼ一致し、その時の梁ばねモデルによる δ_v の値は30.0 mmと29.1 mmであった。

図-5.4.5 から以下のことが分かる。

- ・ FEM によって得られた δ_v は、同一 η では内水圧なしよりも異常時内水圧のほうが小さい。
- ・ 収束時の η は、修正慣用法で採用される0.8~0.6よりも大きめであるが、これらに割合近い値であり、内水圧なしの場合よりも異常時内水圧の場合のほうが小さい。
- ・ 収束時の δ_v (圧縮が正)は、内水圧なしの場合よりも異常時内水圧の場合のほうが小さい。一方、収束時の δ_h (膨張が正)は、逆に内水圧なしよりも異常時内水圧のほうが大きい。この結果は、内水圧が加わるとシールド管渠が内水圧なしの状態から全体に膨らむことを示す。
- ・ この内水圧作用によるシールド管渠の膨張は、図-5.4.3(c)に示したように、内水圧の作用によってセグメント継手の回転ばねが軟化することによって生じると判断できる。

収束時の外力、変形、モーメント M 、および軸力 N を、図-5.4.6(内水圧なし)、図-5.4.7(異常時内水圧)に示す。FEM 解析と梁ばねモデルの外力は共通である。外力を除く各図の黒実線が FEM 解析、赤破線が梁ばねモデルによって求めたものをそれぞれ表している。梁ばねモデルの結果は隣接するリングの片方のものを示しており、もう一つのリングの結果は図に示したものと鉛直軸に対して対称となっている。

図-5.4.6 と図-5.4.7 の比較から以下のことが分かる。

- ・ コラボ計算で収束した時点では、FEM 解析と梁ばねモデルの外力は同じで、変形、 M 、およ

び N も FEM 解析と梁ばねモデルで良く一致している。

- ・ 内水圧なしの場合に比べて、内水圧を付加した場合の外力と N の減少度合いはかなり大きい
が、管渠の変形と M の変化は比較的小さい。
- ・ よって、内水圧の付加によるセグメント継手の回転ばねの軟化(図-5.4.3(c))は、内水圧作用による外力減少に伴って N が減少するために生じることが理解できる。

(3) 応力照査の結果

表-5.4.1 に、セグメント本体とセグメント継手の応力照査の結果を示す。許容応力度は、内水圧なしでは長期許容応力度とし、コンクリートは本体・継手ともに 18 N/mm^2 、本体鉄筋は 200 N/mm^2 、継手部ボルトは 380 N/mm^2 である。異常時内水圧では短期許容応力度(=長期許容応力度 $\times 1.5$)とし、コンクリート、鉄筋、ボルトでそれぞれ 27 N/mm^2 、 300 N/mm^2 、 570 N/mm^2 とした。

コンクリートの許容応力を超過したセグメント継手の位置と発生応力を図-5.4.8 に示す。朱が内水圧無しの場合、青が異常時内水圧の場合をそれぞれ表している。

表-5.4.1 と図-5.4.8 から、以下のことが分かる。

- ・ セグメント本体のコンクリートと鉄筋、ならびに継手ボルトの発生応力は、内水圧の有無にかかわらず、許容応力度以下であった。
- ・ 継手コンクリートの発生応力は、内水圧なしでは、頂部・底部・側部で、また異常時内水圧では、1 か所の側部で許容応力度を超過し、損傷の可能性を示す。
- ・ ただし、最大曲げモーメント $M_{\max}$ が発生する管側部の 7 番の継手に着目すると、内水圧なしでは、 $M_{\max}=796 \text{ kNm/m}$ に対して終局曲げ耐力 $M_u=1603 \text{ kNm/m}$ 、異常時内水圧では、 $M_{\max}=823 \text{ kNm/m}$ に対して $M_u=1240 \text{ kNm/m}$ であり、継手の終局曲げ耐力よりも小さいので、どの継手も破壊には至らない。

(4) コラボ設計の結果に基づく外郭放水路の損傷イメージ

図-5.4.7 に、コラボ設計の結果に基づく外郭放水路の変形と損傷のイメージを示す。コラボ設計の結果によれば、内水圧が作用するとシールド管渠は全体に膨張するが、膨張量は側部の方が頂底部よりも大きい。よって、内水圧作用時のシールド管渠は、元の形状から膨張して楕円状に変形する。

図-5.4.7 から、以下の損傷メカニズムが推定される。

- ・ 頂部では、内水圧が作用すると、継手内側が開いて内側シール材が吸水膨張する。内水圧がなくなると、継手内側が閉じるため、膨張したシール材を挟み込む結果、内面側が剥離する。これは外郭放水路において、全工区で頂部において内面剥離が生じていることと整合する。なお、剥離した破片は砕けずに形状を維持していたことから水中落下したと考えられているが、水位低下過程で剥離したのであれば矛盾はない。
- ・ 側部では、コラボ解析で示されたように、内水圧が作用すると継手内側が閉じて損傷が生じると推定される。第2工区では、他工区に比べて、継手シール溝位置が内面側に位置し、さらにシール材の体積充填率が高いために内面剥離した可能性が高い。水位変動の繰返しによりシール材が膨張しておれば、さらに破損の可能性が高くなる。一方、第1、3工区では、継手シール溝位置が第2工区よりも外側にあり、シール材の体積充填率が低かったことにより、剥離が生じなかったと考えられる。
- ・ 外郭放水路では、出来上がり形状(縦変形、横変形)については損傷に影響がなかったこと

が分かっているが、上記の挙動は出来上がり形状には関係がないので、この点については矛盾はない。

5.5 結論

本章の結論は以下のようにまとめることができる。

(1) 内水圧シールド管渠の力学挙動

内水圧が作用するシールド管渠の力学挙動について考察を加え、新しい設計法の考え方を提案した。

- ・ 5.2(1)で述べたように、土と構造物の相互作用として決まる管渠の土圧と変形は3つの要因（管渠面の境界条件、地盤側方の境界条件、地盤と構造物の相対剛性）によって支配される。
- ・ 今回扱った内水圧シールド管渠では、管渠面の境界条件は滑動に近く、地盤側方の境界条件は K_0 条件である。残る要因は地盤とシールド管渠の相対的な剛性の比である。
- ・ シールド管渠の剛性は継手の剛性に支配され、継手の剛性は内水圧の変動に伴う軸力の変化に伴って変わる。その結果、内水圧の変動に伴って、地盤とシールド管渠の相対的な剛性が変わるため、シールド管渠の土圧と変形が変化することになる。
- ・ 内水圧が作用するシールド管渠に対する2つの設計法（梁ばねモデルと弾性FEM）のうち、梁ばねモデルによる設計法は、軸力の変化に伴う管渠の剛性変化を扱っているが、土と構造物の相互作用の扱いに問題を残す。一方、弾性FEMによる設計法は、土と構造物の相互作用は考慮しているが、軸力の変化に伴う管渠の剛性変化を扱えない。そこで、両者の長所を取り入れたコラボ設計法を提案した。

(2) コラボ設計法の外郭放水路への適用

提案したコラボ設計法によって首都圏外郭放水路の内水圧変動に伴う挙動予測を行って、コンクリートセグメントの損傷原因を考察し、以下の結論を得た。

- ・ 異常時内水圧の作用により、シールド管渠は全体に膨張し、元の形状から楕円状に変形する。
- ・ 内水圧なしでは頂部・底部・側部の継手で、また異常時内水圧では側部の継手で損傷の可能性を示唆する結果を得た。
- ・ 一方、コラボ計算で求められたシールド管渠の鉛直たわみ量は、実際の計測結果や経験からみて大きすぎると考えられる。よって、シールド管渠に作用する土圧は、今回のコラボ計算で求めた土圧よりも小さいか、あるいは、より等方的に作用するものと考えられる。
- ・ 「下水道施設耐震計算例」²⁰⁾に示されたシールド管渠のFEM解析（継手無し）の照査では、 η が0.6以下でないと構造的に安定とはならず、この結果は、周囲の地盤の変形係数を可能な範囲で増大させ、また裏込注入層の硬化を考慮しても、変わらなかった。
- ・ したがって、シールド管渠の場合、先行掘削による応力解放や裏込注入の影響などの不確定要素に対して検討の余地があり、これらを解決することが今後の課題となる。

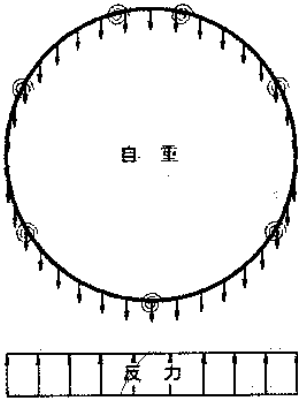
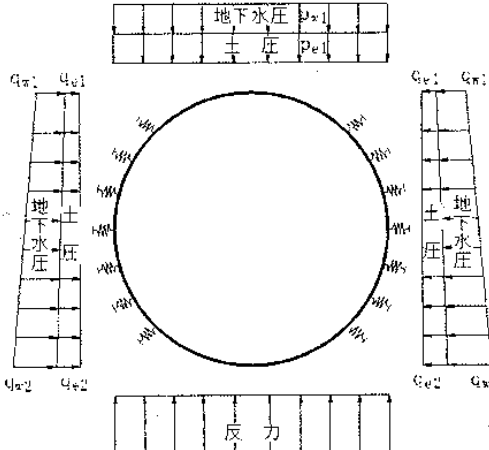
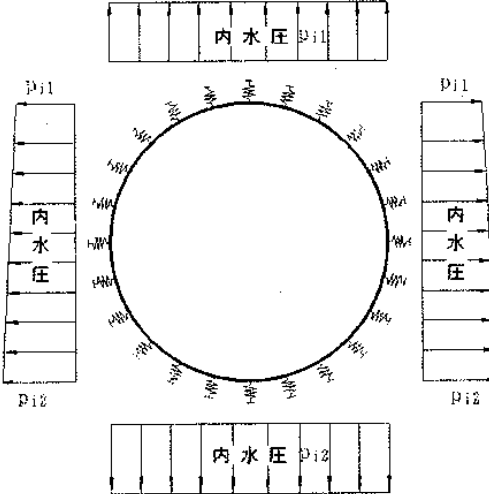
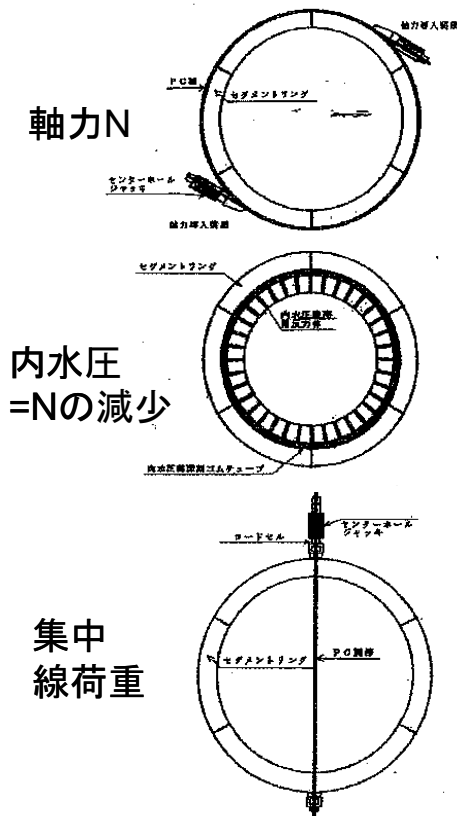
荷重作用段階	内圧トンネル設計手引き
自重	
土水圧	
内水圧	

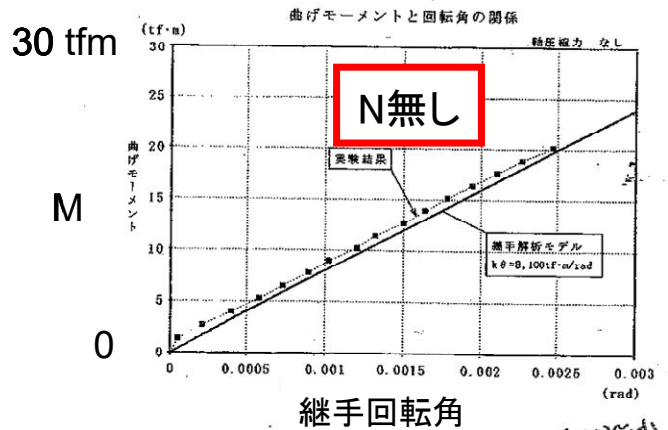
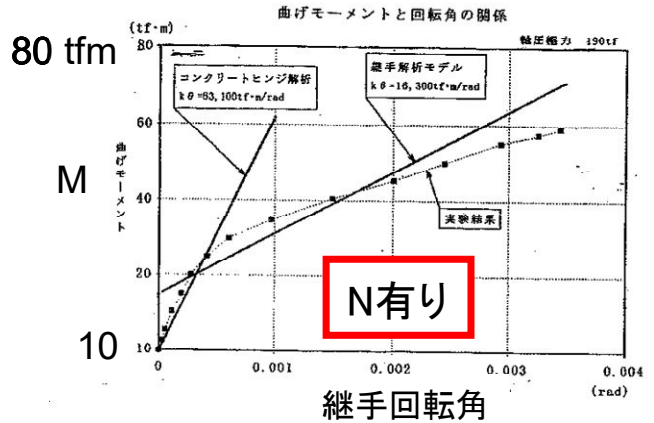
図-5.1.1 「内水圧トンネル設計の手引き」の概要

実構造RCTトンネルの載荷試験 (内径4.7m. t 200mm)



δv はN無しがN有りの1.7倍
 →内水圧によるN減少が η (EIの有効率)の減少を引き起こす

継手曲げ試験



継手の曲げ剛性は
N無し < N有り

図-5.1.2 「内水圧トンネル設計の手引き」の
載荷実験(参考資料—7)

図-5.1.3 「内水圧トンネル設計の手引き」の
継手曲げ試験(参考資料—8)

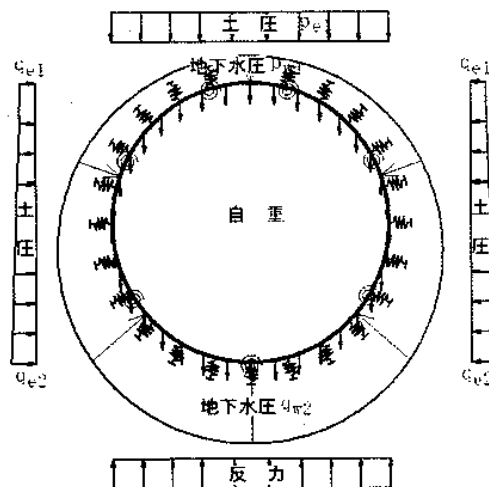


図-5.1.4 「鉄道総研法」の概要

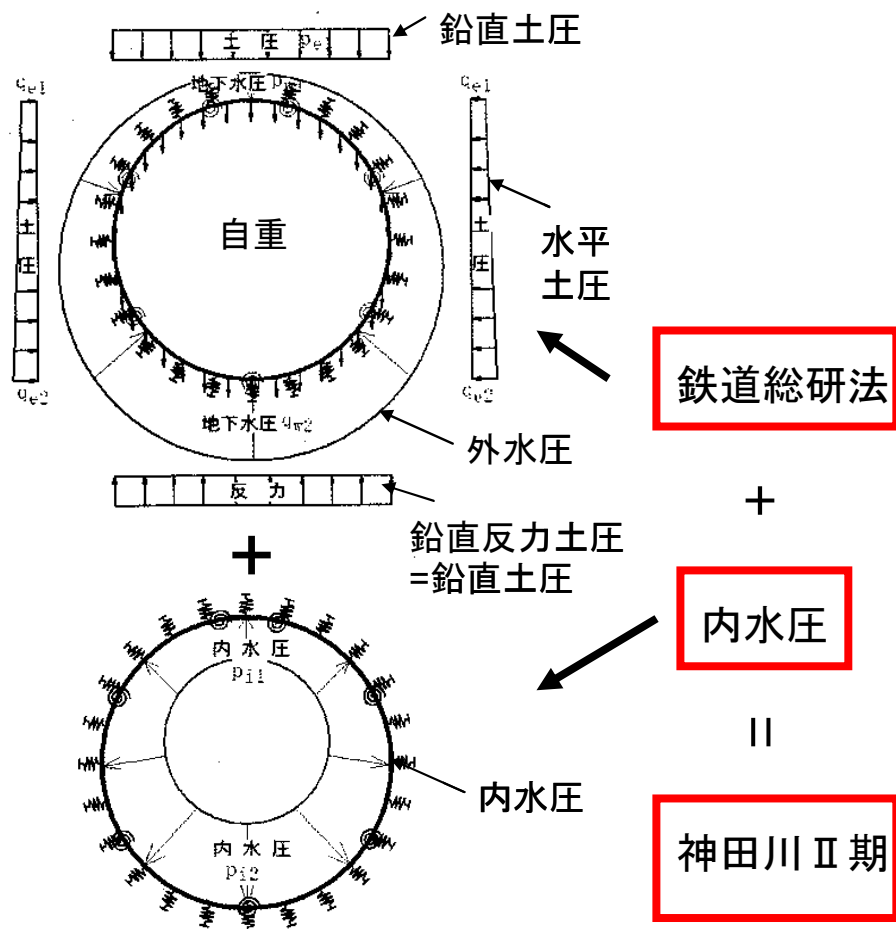


図 5.1.5 「神田川Ⅱ期設計基準」の概要

(内水圧トンネル設計の手引きの試験)

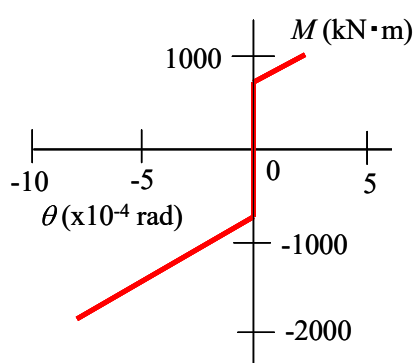
内水圧付加による軸力 N の減少
⇒セグメント継手の曲げ剛性の減少
⇒ η (EI の有効率)の減少を引き起す



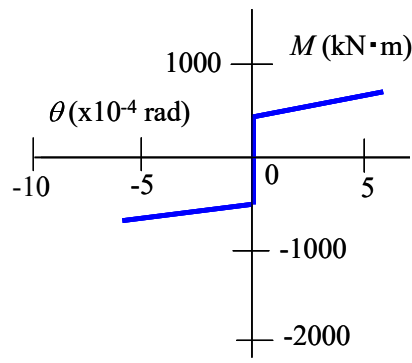
鉄道総研法はセグメント継手の挙動を
軸力 N に依存するバイリニアールで表す



神田川設計法は内水圧変動に伴う N の
変化に合わせてセグメント継手の回転ば
ね定数を変化(リング継手は変化なし)



内水圧無し(N 大)⇒剛



内水圧有り(N 小)⇒柔

図-5.1.6 継手ばね定数の設定方法

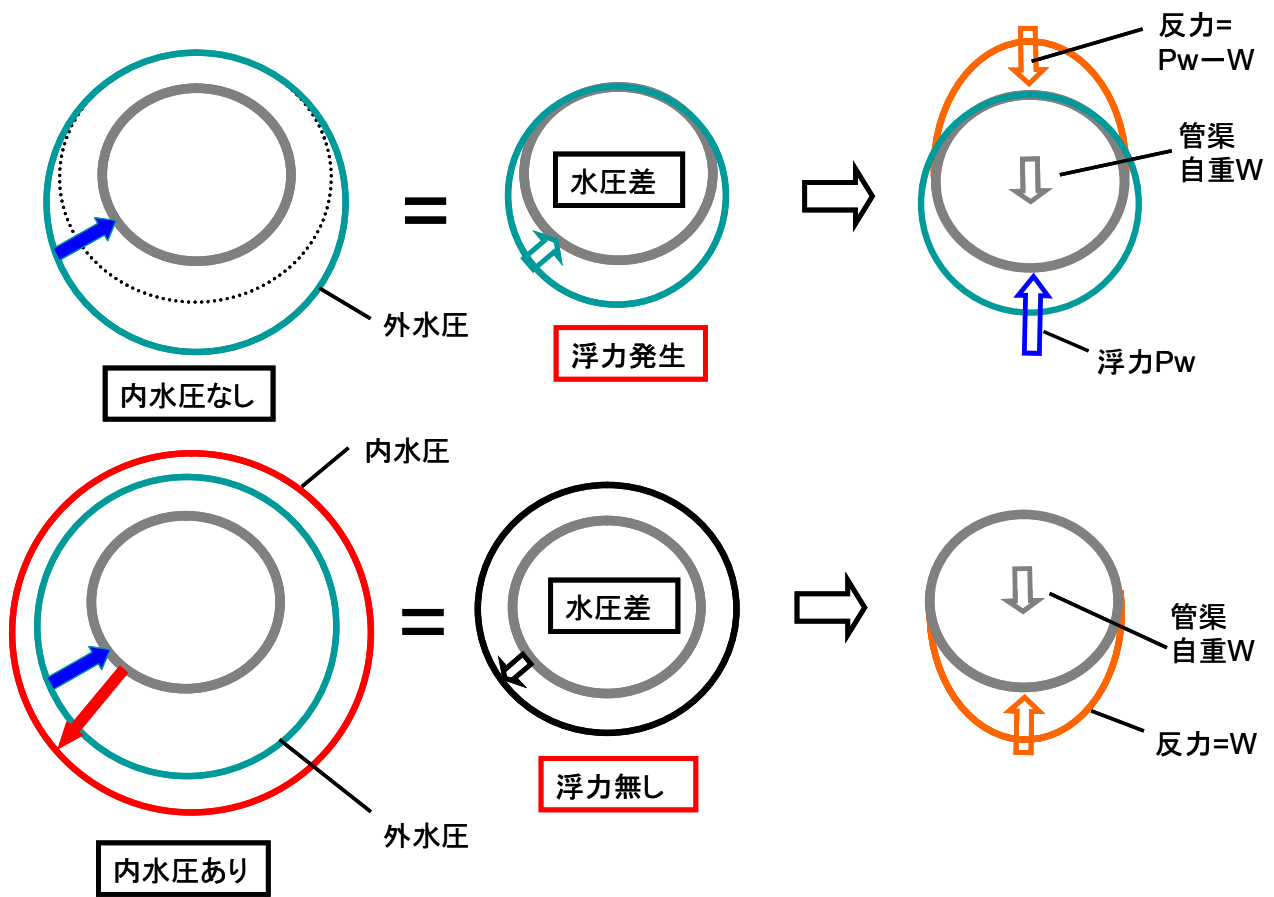


図-5.1.7 「神田川Ⅱ期設計法」の剛体変位に対するばね力の設定

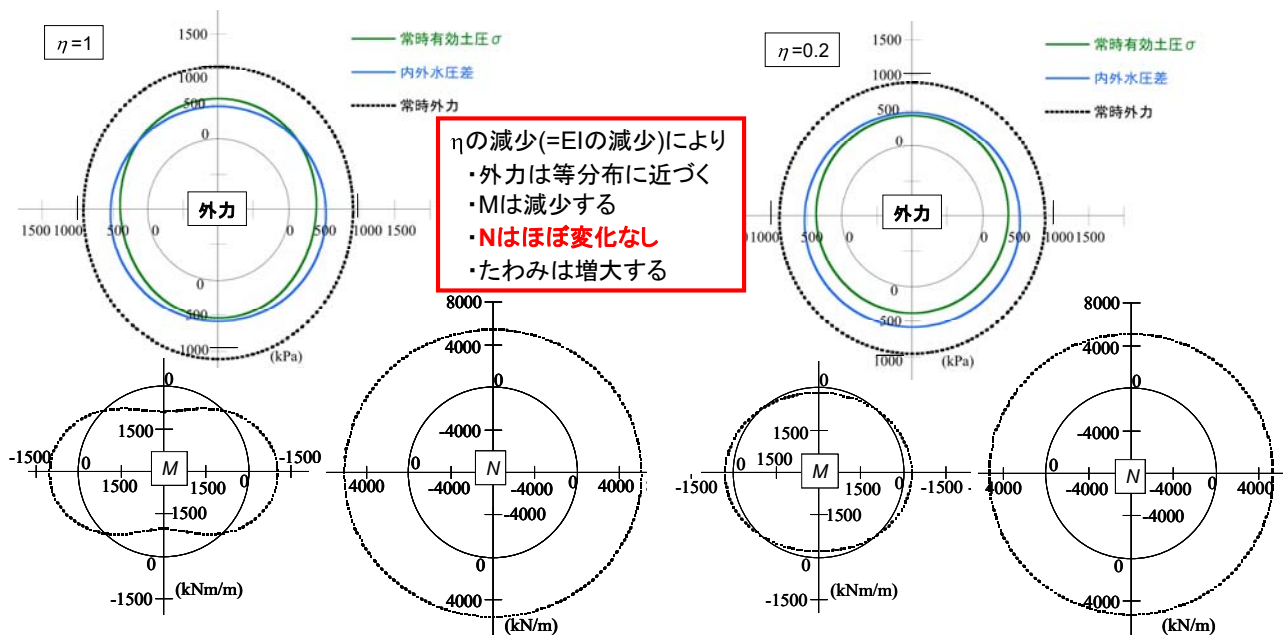


図-5.3.1 η を変えた時の FEM 解析結果 (継手無し・内水圧無し)

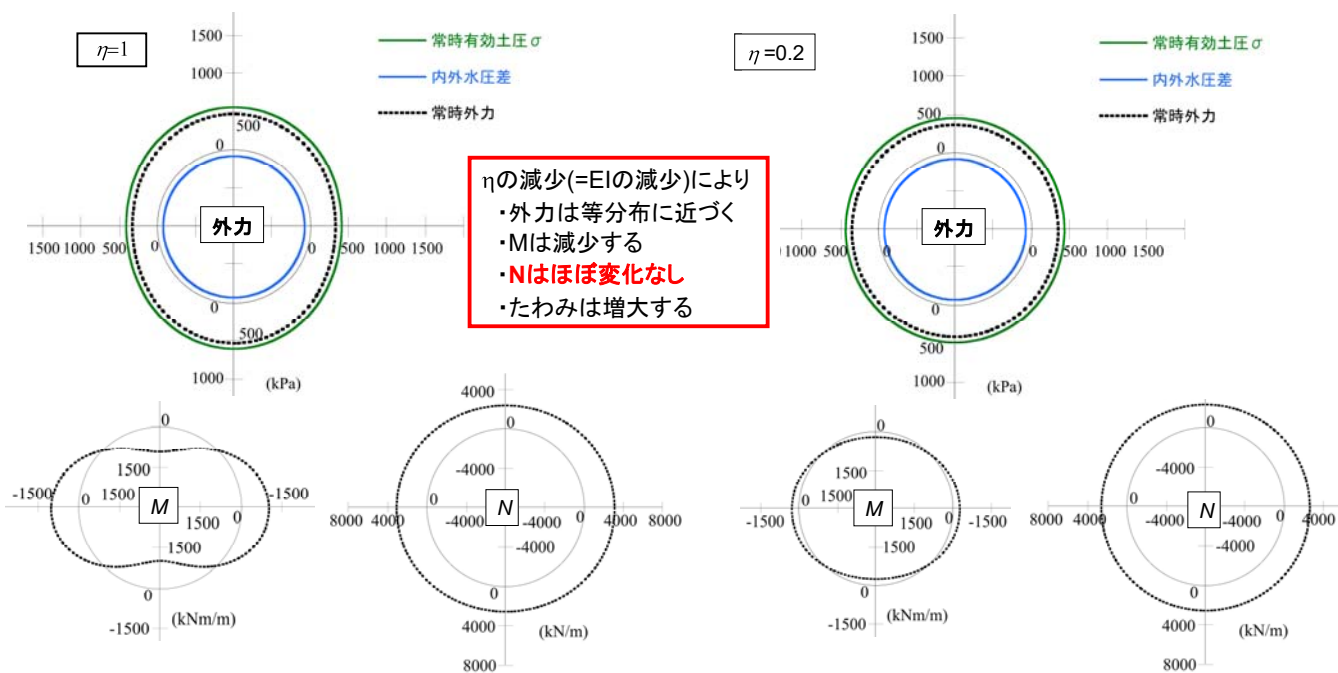
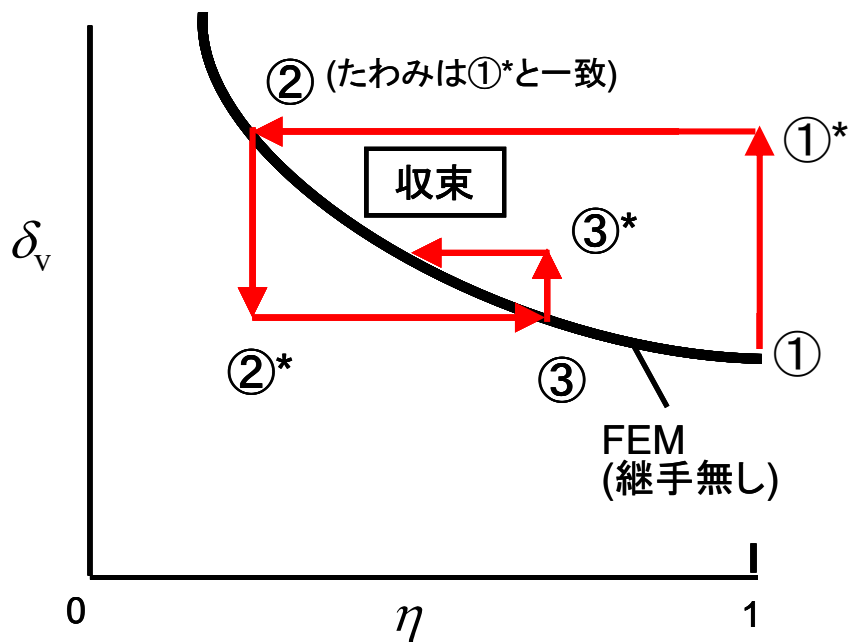


図-5.3.2 η を変えた時の FEM 解析結果 (継手無し・異常時内水圧)

表-5.3.1 内水圧の有無と η の違いによる δ_v と δ_h の変化

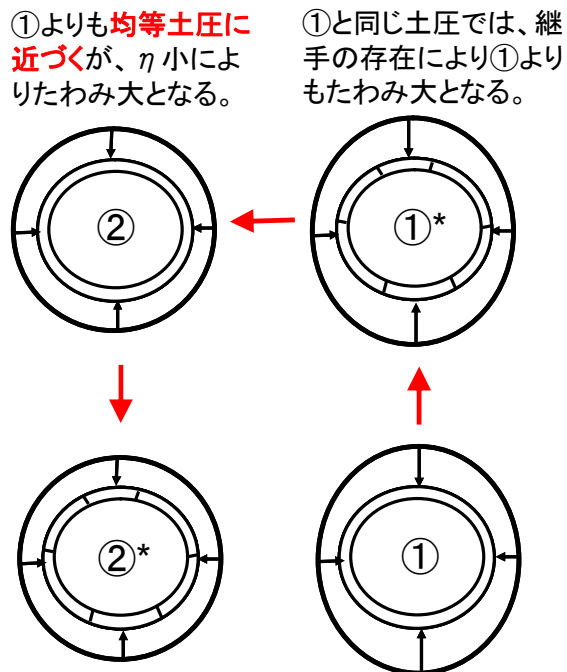
η	1		0.2		摘要
内水位	無し	有り	無し	有り	
δ_v (mm)	28.8	27.5	46.3	39.3	圧縮が +
δ_h (mm)	22.9	24.8	19.4	26.9	膨張が +
$\Delta\delta_v$ (mm)	-1.3		-7.0		膨張が -
$\Delta\delta_h$ (mm)	1.9		7.5		膨張が +

注) $\Delta\delta$: 内水位有り-内水位無し



○数字の★無し: FEM計算の結果
 ○数字の★付き: FEMで得られた土圧と水圧を与えた時の梁ばね計算の結果

図-5.3.3 コラボ設計法 の概念



Nは①*とほぼ同じなので、継手の剛性は①*とあまり変わらない。①*よりも土圧均等のため、たわみ小となる。

図-5-3.4 管渠構造と有効土圧分布の変化

シールド寸法

- ・シールド外径 = 11.9m
- ・管厚 = 0.65m

埋設条件

- ・ $H = 50\text{m}$
- ・ $\gamma' = 8.78\text{kN/m}^3$
- (均一地盤におきかえ管側までの有効重量の平均値)
- ・ $E_s = 140\text{MPa}$ ($N=50$ として、 $E_s=2800N$)
- ・ $\nu_s = 1/3$

水位

- ・地下水位 = GL-4.00m
- ・内水位 = なしと異常時 (GL+4.05m)

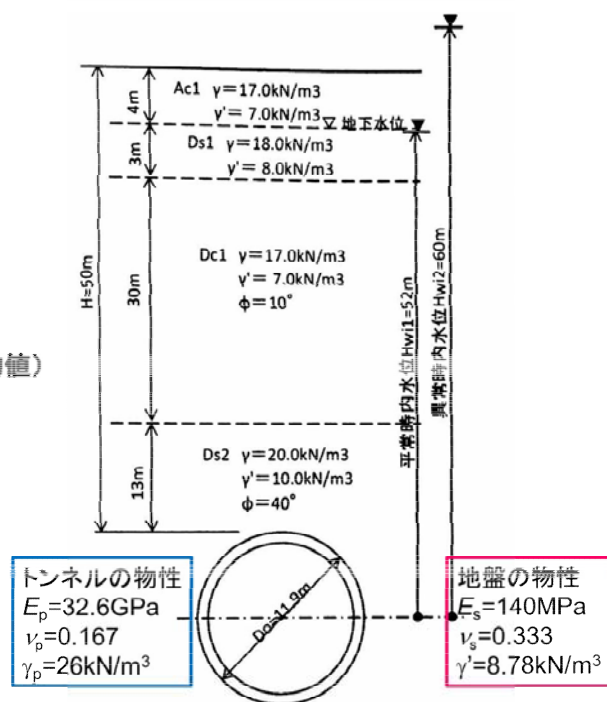
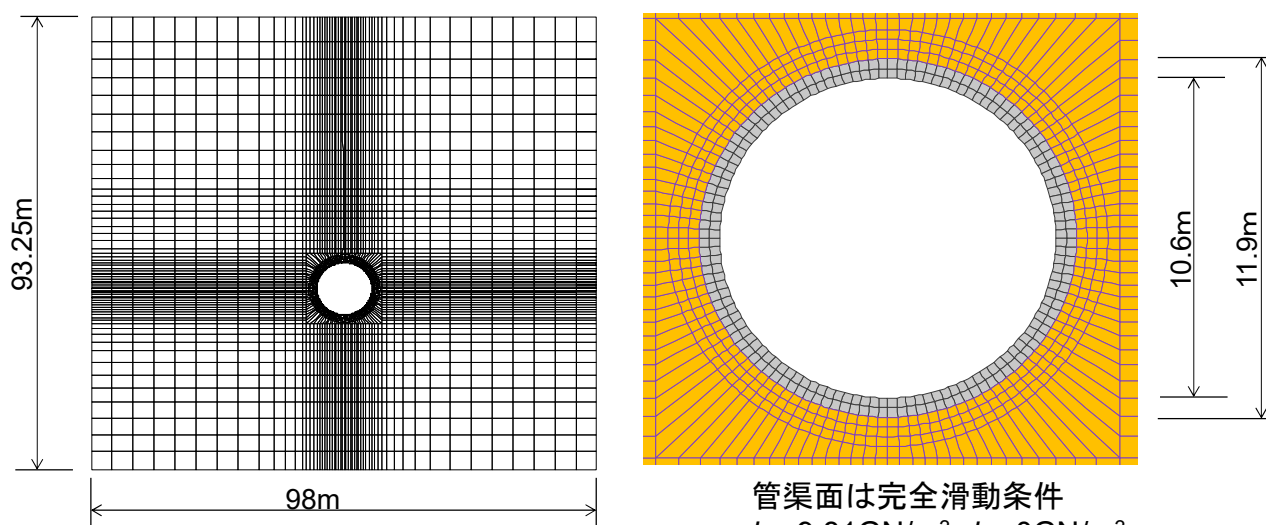


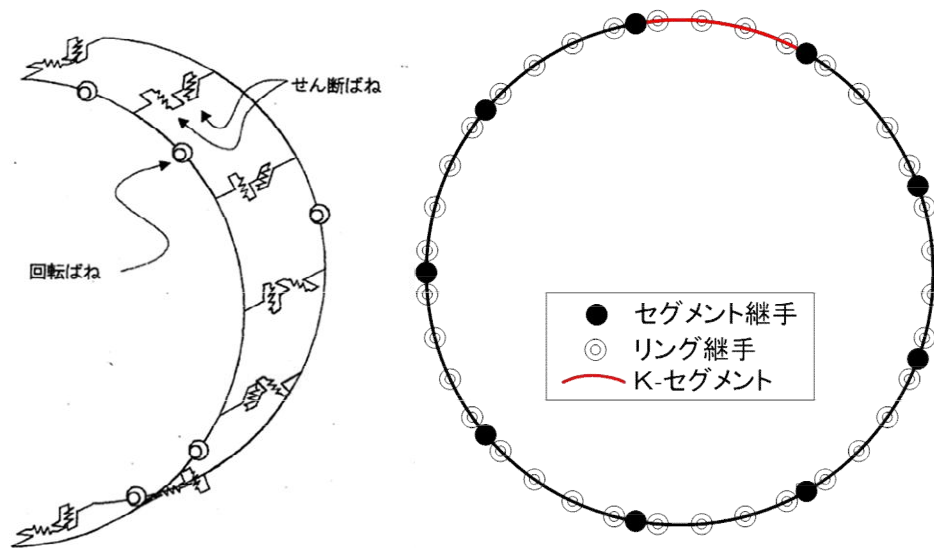
図-5.4.1 トンネルの埋設条件と FEM 解析に用いた入力定数



(a) FE メッシュ全体

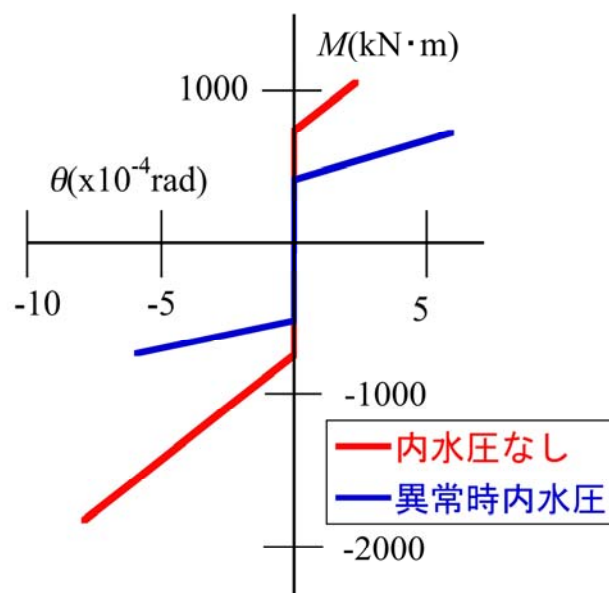
(b) 管周辺のメッシュ拡大図

図-5.4.2 FEM 解析に用いた FE メッシュ



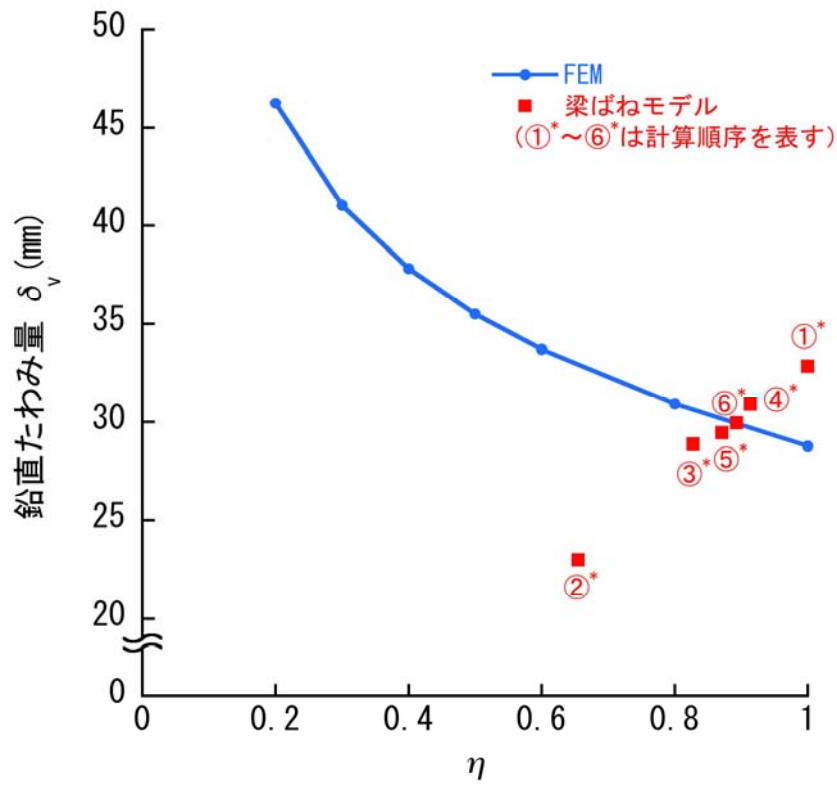
(a) 構造モデル

(b) 継手位置

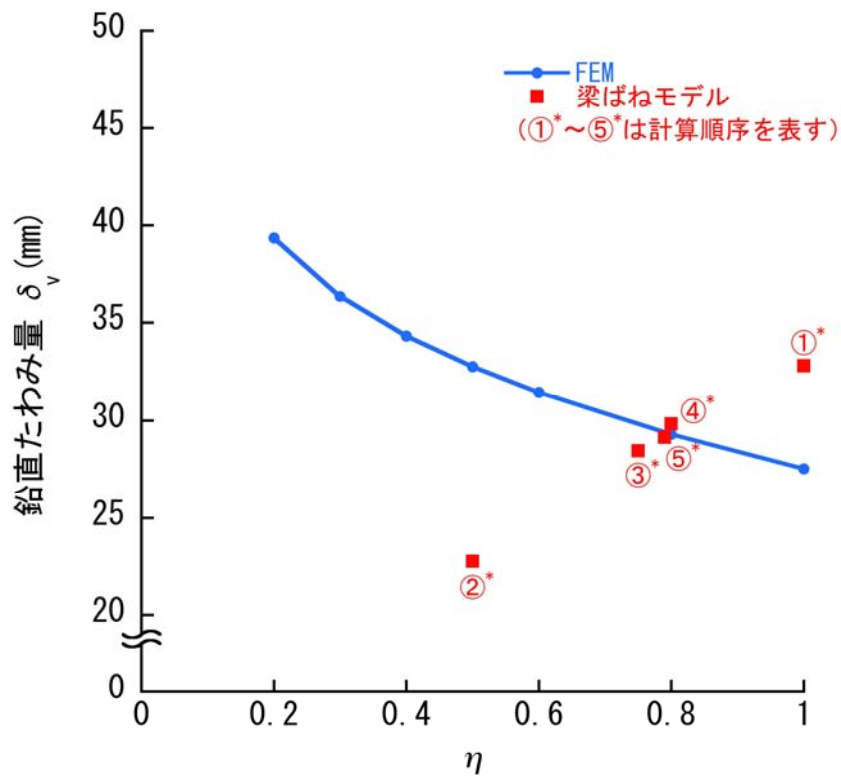


(c) セグメント継手回転ばね

図-5.4.3 梁ばねモデル



(a) 内水圧なし (⑥* : $\eta=0.89$, $\delta_v=30.0\text{mm}$ で収束)



(b) 異常時内水圧 (⑤* : $\eta=0.79$, $\delta_v=29.1\text{mm}$ で収束)

図-5.4.4 コラボ計算の過程

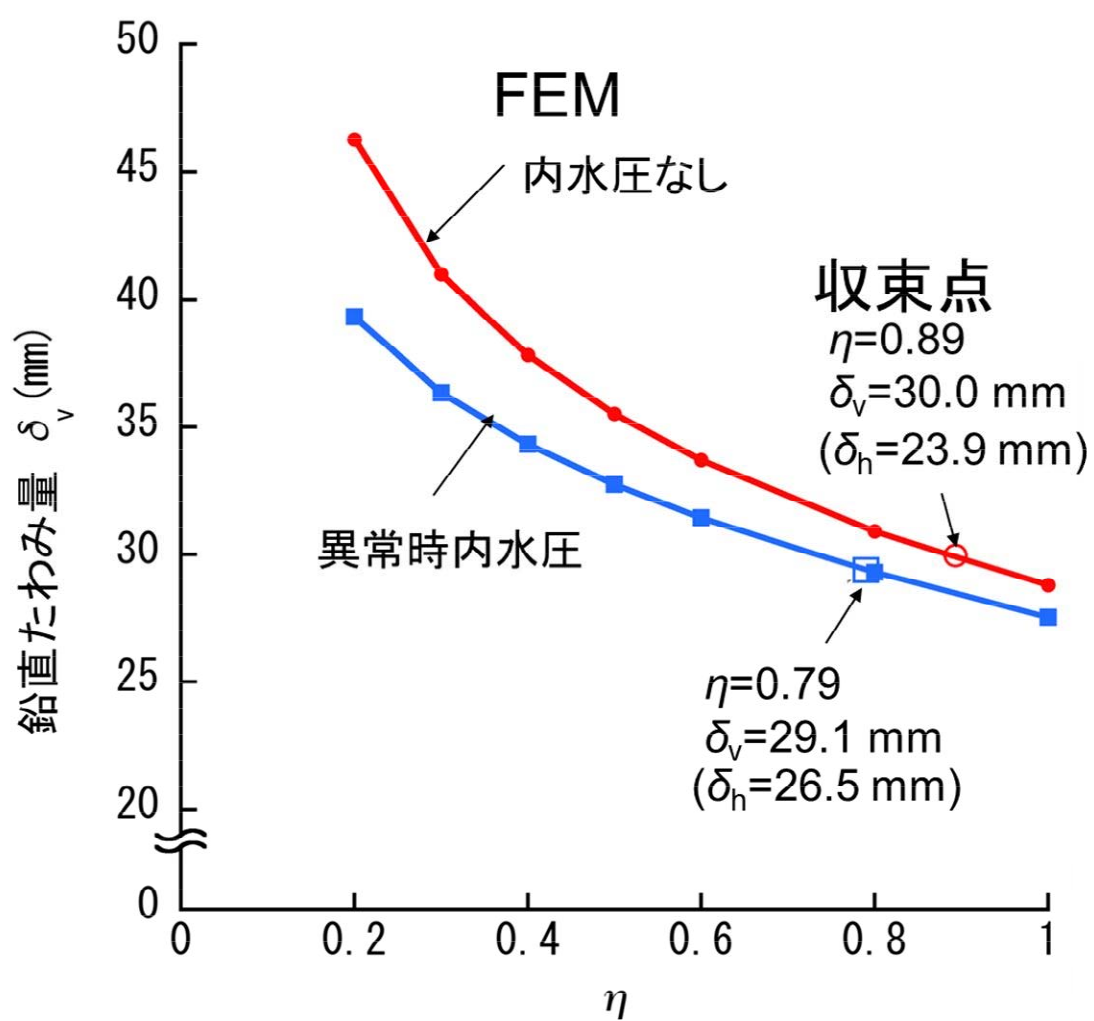


図-5.4.5 FEMによる $\delta_v \sim \eta$ 関係とコラボ計算の収束点の $\eta \cdot \delta_v$

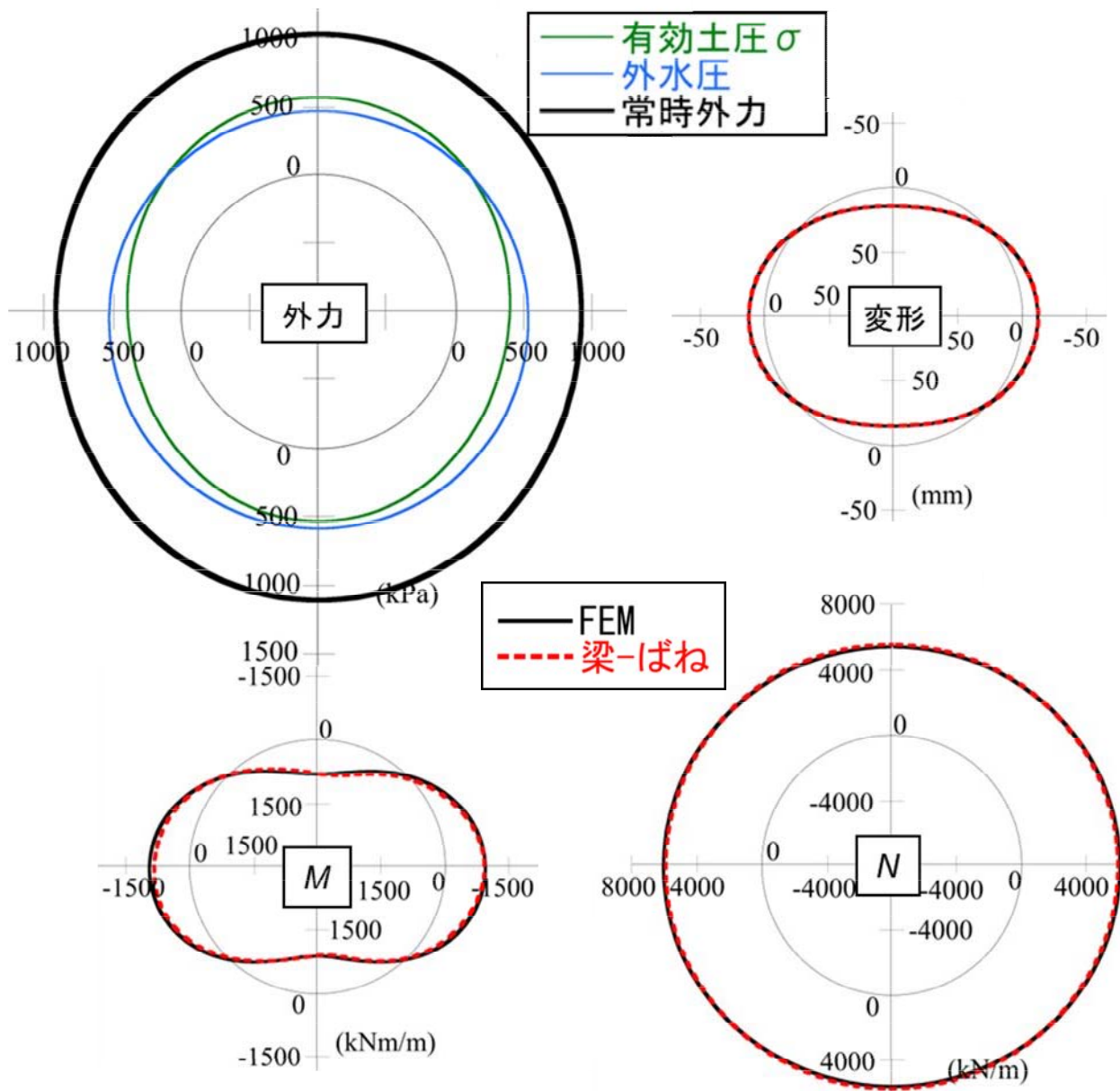


図-5.4.6 収束時の結果（内水圧なしの場合）

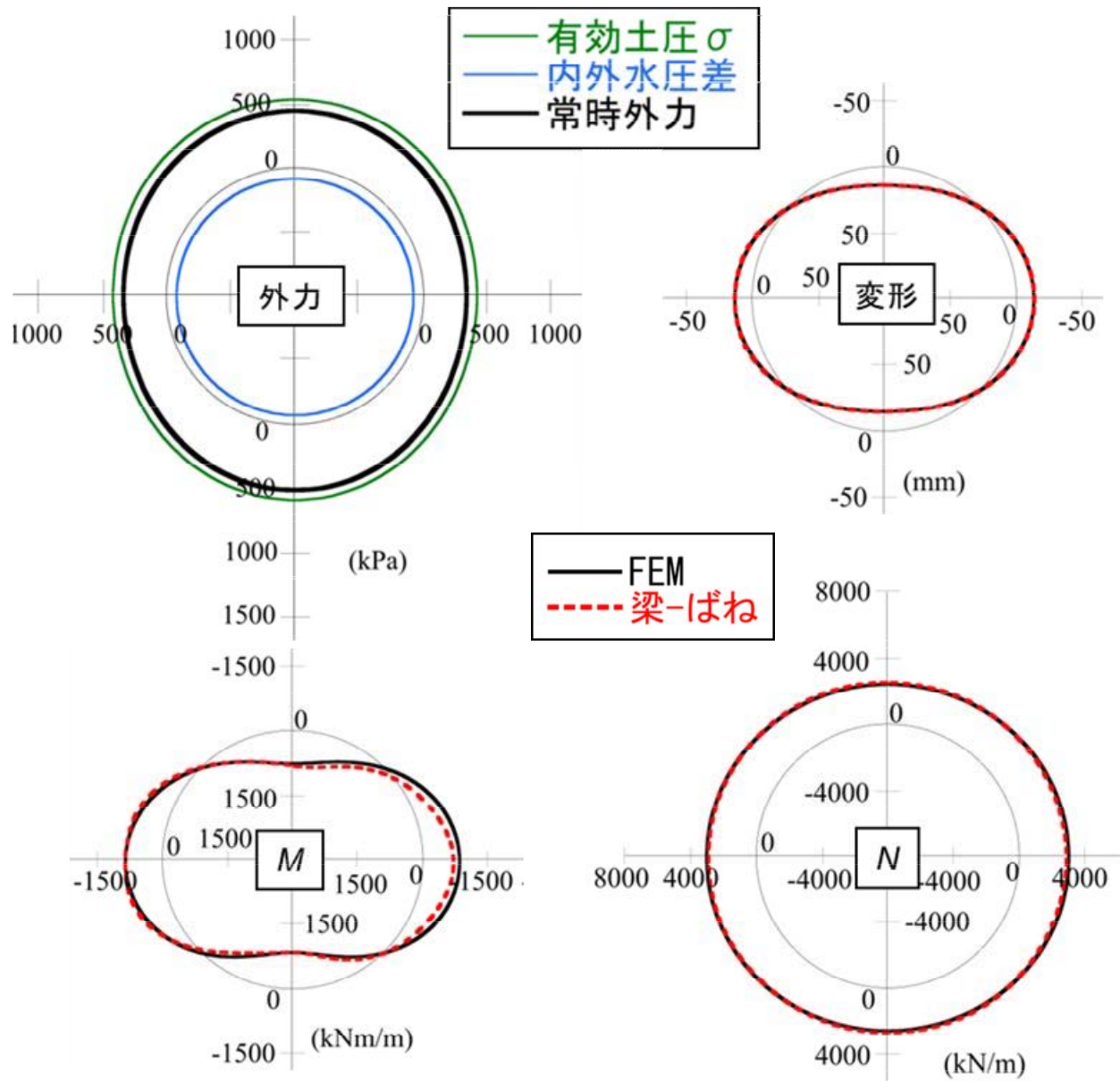


図-5. 4. 7 収束時の結果（異常時内水圧の場合）

表-5.4.1 応力照査結果

(a) セグメント本体

内水圧	位置	コンクリート			鉄筋		
		発生応力度 σ_c (N/mm ²)	許容応力度 σ_{ca} (N/mm ²)	判定	発生応力度 σ_s (N/mm ²)	許容応力度 σ_{sa} (N/mm ²)	判定
なし	正曲げ最大 ①	15.6	≤ 18	O.K.	3.6	≤ 200	O.K.
	負曲げ最大 ②	15.8	≤ 18	O.K.	全圧縮		O.K.
あり	正曲げ最大 ③	12.1	≤ 27	O.K.	103.9	≤ 300	O.K.
	負曲げ最大 ④	12.4	≤ 27	O.K.	83.7	≤ 300	O.K.

位置の丸数字は、下図の照査位置を示す

全圧縮:鉄筋には引張が生じないため、判定はO.K.とする

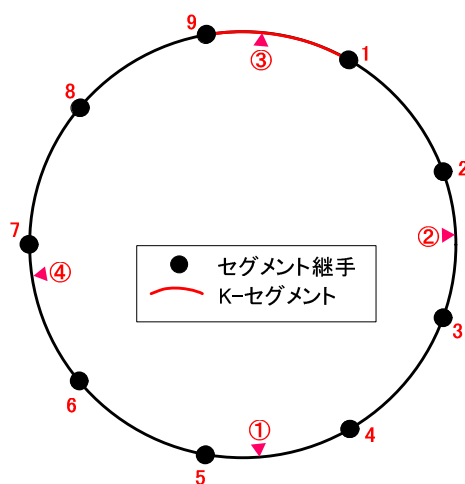
(b) セグメント継手

内水圧	継手位置	コンクリート			ボルト		
		発生応力度 σ_c (N/mm ²)	許容応力度 σ_{ca} (N/mm ²)	判定	発生応力度 σ_s (N/mm ²)	許容応力度 σ_{sa} (N/mm ²)	判定
なし	1	17.9	≤ 18	O.K.	全圧縮		O.K.
	2	20.5	> 18	N.G.	全圧縮		O.K.
	3	20.5	> 18	N.G.	全圧縮		O.K.
	4	18.4	> 18	N.G.	全圧縮		O.K.
	5	24.2	> 18	N.G.	13.0	≤ 380	O.K.
	6	12.8	≤ 18	O.K.	全圧縮		O.K.
	7	23.0	> 18	N.G.	全圧縮		O.K.
	8	11.2	≤ 18	O.K.	全圧縮		O.K.
	9	22.4	> 18	N.G.	全圧縮		O.K.
あり	1	14.1	≤ 27	O.K.	68.3	≤ 570	O.K.
	2	11.8	≤ 27	O.K.	全圧縮		O.K.
	3	13.1	≤ 27	O.K.	全圧縮		O.K.
	4	11.0	≤ 27	O.K.	全圧縮		O.K.
	5	22.8	≤ 27	O.K.	283.5	≤ 570	O.K.
	6	7.6	≤ 27	O.K.	全圧縮		O.K.
	7	28.9	> 27	N.G.	159.1	≤ 570	O.K.
	8	6.3	≤ 27	O.K.	全圧縮		O.K.
	9	21.6	≤ 27	O.K.	274.9	≤ 570	O.K.

位置は、下図に示す

全圧縮:ボルトには引張が生じないため、判定はO.K.とする

(c) 照査位置



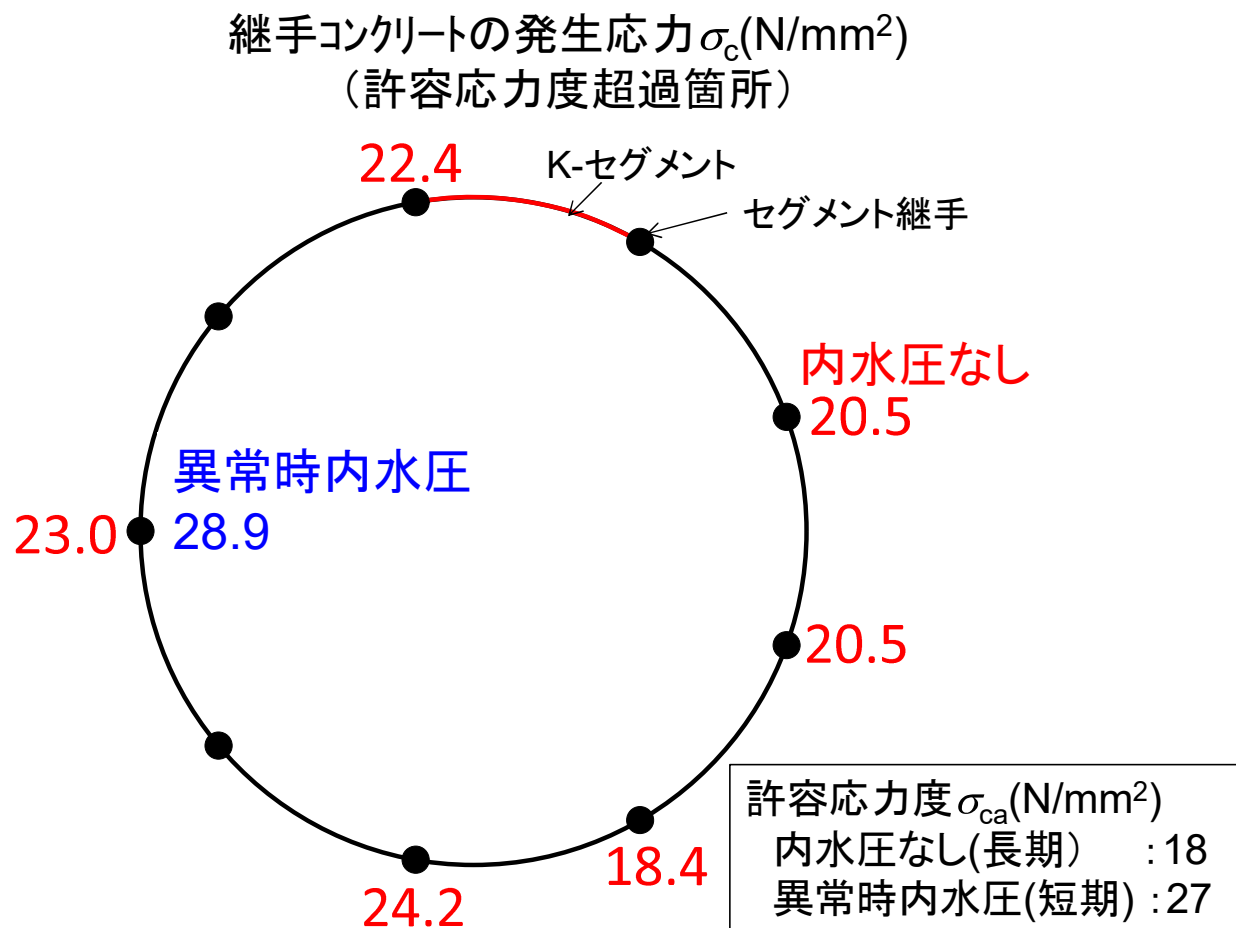


図-5.4.8 コンクリートが許容応力度を超過した継手位置と発生応力 σ_c

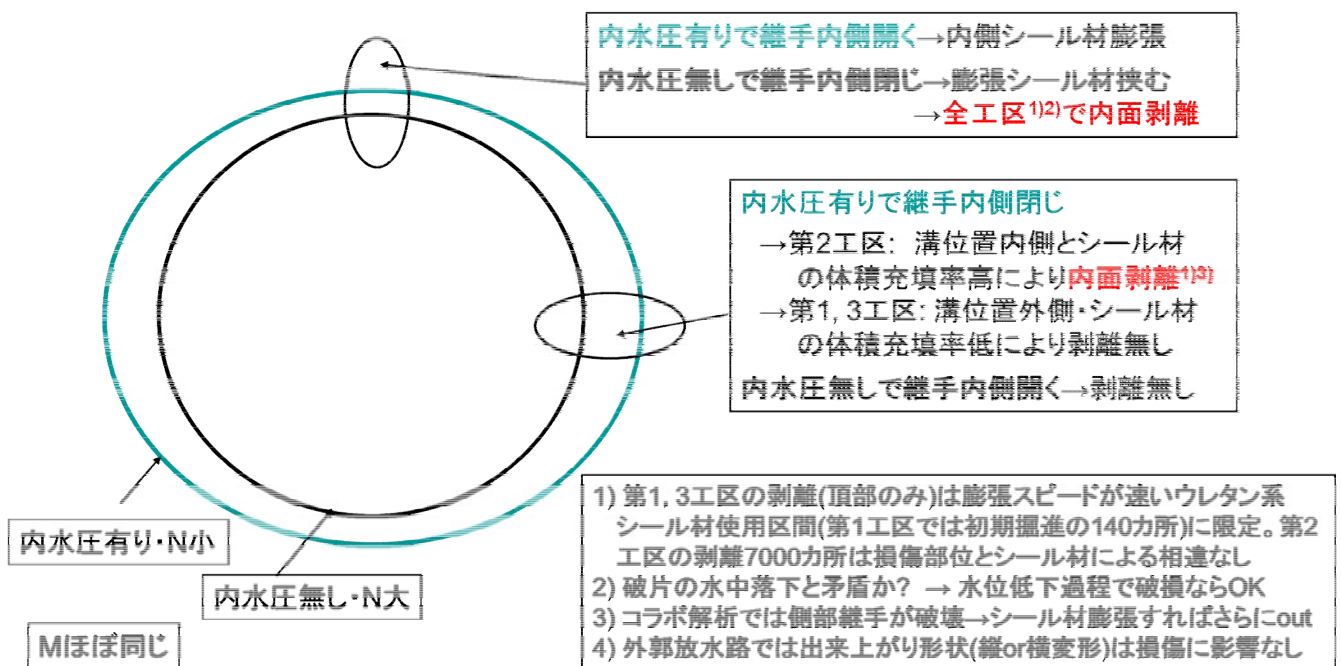


図-5.4.9 コラボ解析の結果に基づく外郭放水路損傷イメージ

第5章 付録

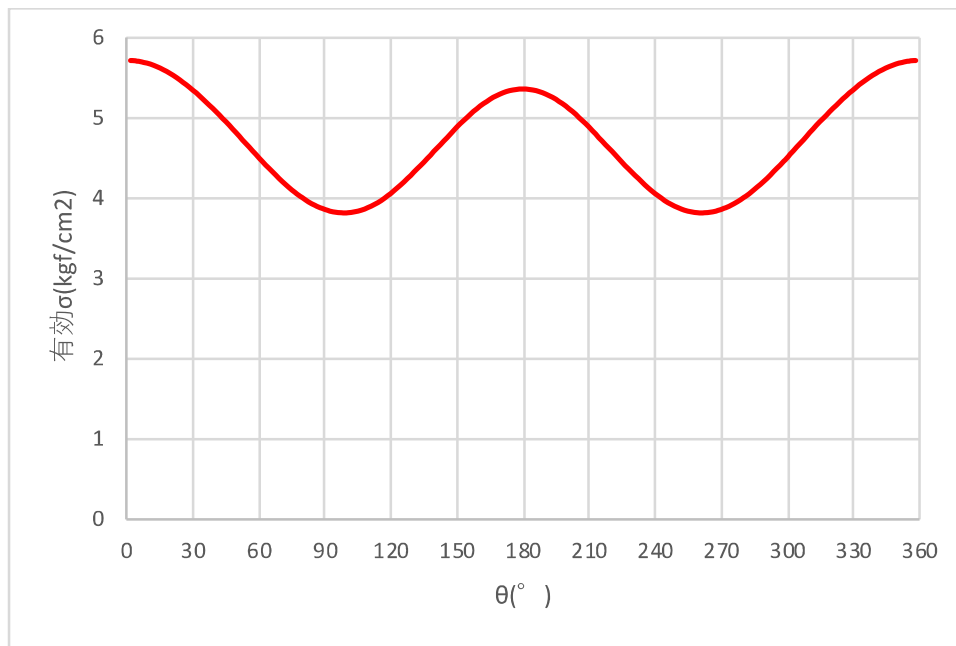
コラボ計算における梁ばねモデルの外力の設定方法

1. はじめに

コラボ計算では、FEM で算定された土圧を用い、梁ばねモデルで計算を行うが、 η に応じた土圧を FEM で繰返し算定する必要がある。そこで、FEM 計算で得られる有効 σ をフーリエ級数で近似し、梁ばねモデルには、近似式により η に応じた土圧を与えることとした。

2. 土圧分布の近似

FEM で求めた有効 σ 分布を付図-1 に示す (θ は、管頂を 0 とし右回り)。この図から、有効 σ は 360 度を 1 周期としたなめらかな関数であるため、フーリエ級数による近似が可能であると考え、まず、フーリエ級数による近似が可能であることを確認した。



付図-1 内水圧なし、 $\eta=1$ の場合の有効 σ の分布

Δx ごと等間隔に、 N 個の y_m が、離散的に与えられた場合のフーリエ級数は、一般的に次式で表すことができる。

$$\tilde{y}(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} \left[A_k \cos \frac{2\pi kx}{N\Delta x} + B_k \sin \frac{2\pi kx}{N\Delta x} \right] + \frac{A_{N/2}}{2} \cos \frac{2\pi(\frac{N}{2})x}{N\Delta x} \quad \text{----- (1)}$$

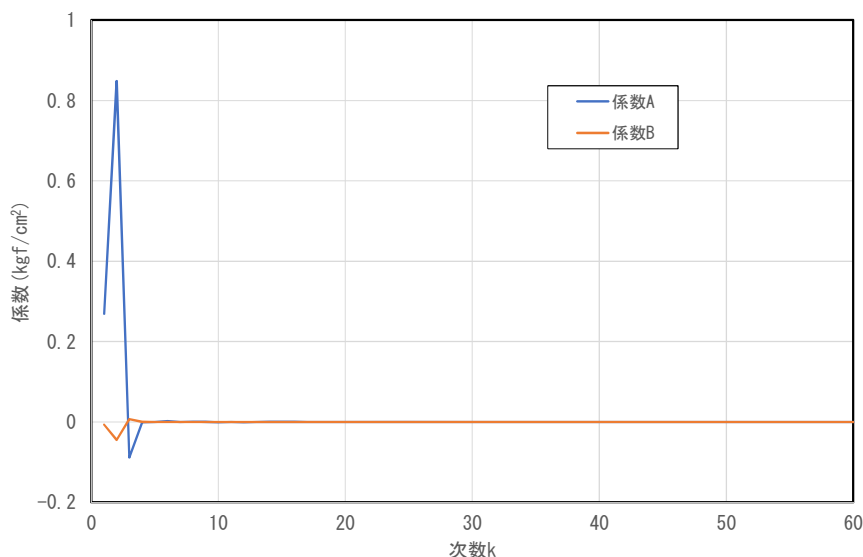
$$\left. \begin{aligned} A_k &= \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} y_m \cos \frac{2\pi km}{N} & k &= 0, 1, 2, \dots, \frac{n}{2} - 1, n/2 \\ B_k &= \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} y_m \sin \frac{2\pi km}{N} & k &= 1, 2, \dots, \frac{n}{2} - 1 \end{aligned} \right\} \quad \text{----- (2)}$$

$\tilde{y}(x)$ は、 N 個の y_m を必ず通過するが、 Δx 間の値については近似であるため、チルダをつけている。有効 σ 分布が、フーリエ級数で表すことが可能であり、さらに上記の近似式の A_k 、 B_k を η の関数とすることができれば、 η に対応した有効 σ を近似式で与えることができ、繰返しの都度、FEM 計算を実施する必要はない。

FEM における土圧は、120 点あり、 A_k 、 B_k はそれぞれ 60 個、58 個となるが、付図-1 を見る限り、

高次の級数は必要なく、数次分だけ重ね合わせれば、ある程度近似できる可能性がある。

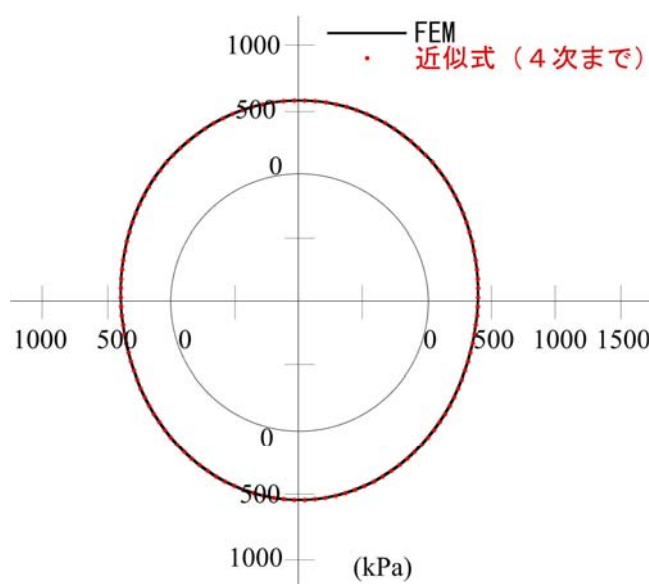
ここで、内水圧なし、 $\eta=1$ の場合について、 A_k 、 B_k を求め、次数 k ごとにその大きさを比較したものを付図-2 に示す。なお、 $k=0$ の時の A_0 はバイアスであり、有効 σ の平均値を示し、他の係数より大きいので、付図-2 には $k=1$ 以上のものを示している。この図から、概ね 4 次以上は、係数 A_k 、 B_k は小さく、求める有効 σ に与える影響が小さいことがわかる。



付図-2 内水圧なし、 $\eta=1$ の場合の A_k 、 B_k

付図-3 は、4 次まで重ね合わせたものと、FEM で得られた有効 σ 分布を比較したものを示す。この図から、4 次まで、重ね合わせれば、FEM で得られた有効 σ 分布とほぼ一致することがわかる。

そこで、実際には、4 次では管側部でわずかであるが、振動がみられるため、近似の精度をあげるため、6 次までの 13 個の A_k 、 B_k を、異なる η の FEM で得られた有効 σ 分布から求め、 η と A_k 、 B_k の関係を 4 次式で近似し、 η に応じた有効 σ 分布を算定することとした。近似式は付表-1 のとおりである。



付図-3 有効 σ の 4 次までのフーリエ近似結果と FEM の比較

付表-1 近似式とその係数

$$\sigma = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^6 (A_k \cos k\theta + B_k \sin k\theta)$$

$$A_k = a_1 \eta^4 + a_2 \eta^3 + a_3 \eta^2 + a_4 \eta + a_5$$

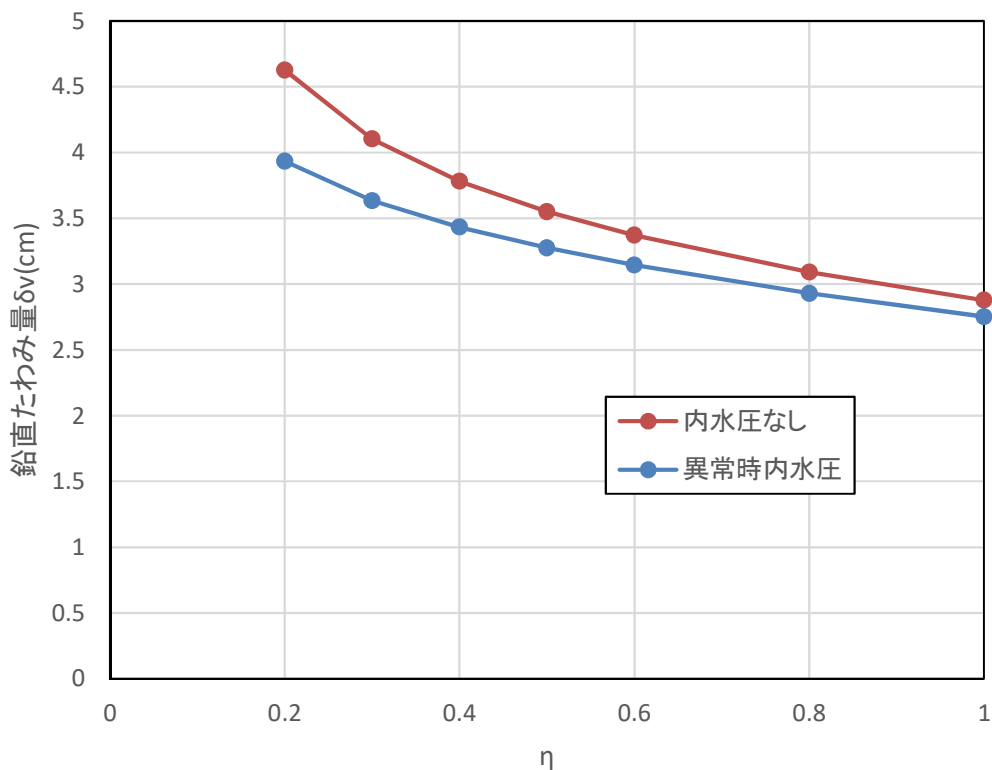
$$B_k = b_1 \eta^4 + b_2 \eta^3 + b_3 \eta^2 + b_4 \eta + b_5$$

σ :有効土圧 $\sigma(\text{kgf/cm}^2)$ 、 θ :管頂からの角度(rad)

内水圧	k	係数($\times 10^{-3} \text{kgf/cm}^2$)									
		a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
なし	0	-13758	39708	-43170	22027	4555.4	-	-	-	-	-
	1	0	0	0	0	268.81	0	0	0	0	7.0391
	2	0	68.186	-352.92	1130.3	3.1487	0	-3.5837	18.515	-59.247	-0.16306
	3	0	-39.032	121.20	-168.26	-2.6920	0	3.0824	-9.5555	13.250	0.21082
	4	1.1351	-3.6216	4.5934	-2.9747	-0.13653	-0.18159	0.52306	-0.59841	0.35044	0.010324
	5	-0.15313	0.44656	-0.50243	0.21818	0.080300	0.019284	-0.060338	0.071278	-0.032195	-0.0099716
	6	-2.8472	8.4110	-9.4063	4.6908	1.0801	0.42931	-1.2722	1.4310	-0.71930	-0.17425
異常時	0	-6458.2	18639	-20260	10324	7494.9	-	-	-	-	-
	1	0	0	0	0	-203.06	0	0	0	0	-5.3174
	2	0	68.706	-356.97	1146.0	2.0973	0	-3.6083	18.722	-60.064	-0.10918
	3	0	-39.443	122.31	-169.56	-3.1451	0	3.0948	-9.6088	13.336	0.24891
	4	0.58234	-1.8957	2.4477	-1.5564	-0.082157	-0.06098459	0.22145	-0.29406	0.18265	0.0059240
	5	-0.21949	0.61642	-0.65851	0.28575	0.050868	0.076218	-0.18752	0.16555	-0.059499	-0.0048909
	6	-2.9550	8.6929	-9.6891	4.8286	1.0801	0.49560	-1.4538	1.6099	-0.79417	-0.16753

3. 鉛直たわみ量 δ_v と η の関係

FEMにより $\delta_v \sim \eta$ 関係を求め、3次式で近似した。付図-4に、 $\delta_v \sim \eta$ 関係を示す。



$$\text{内水圧なし: } \eta = -0.08834\delta_v^3 + 1.242\delta_v^2 - 5.979\delta_v + 10.02$$

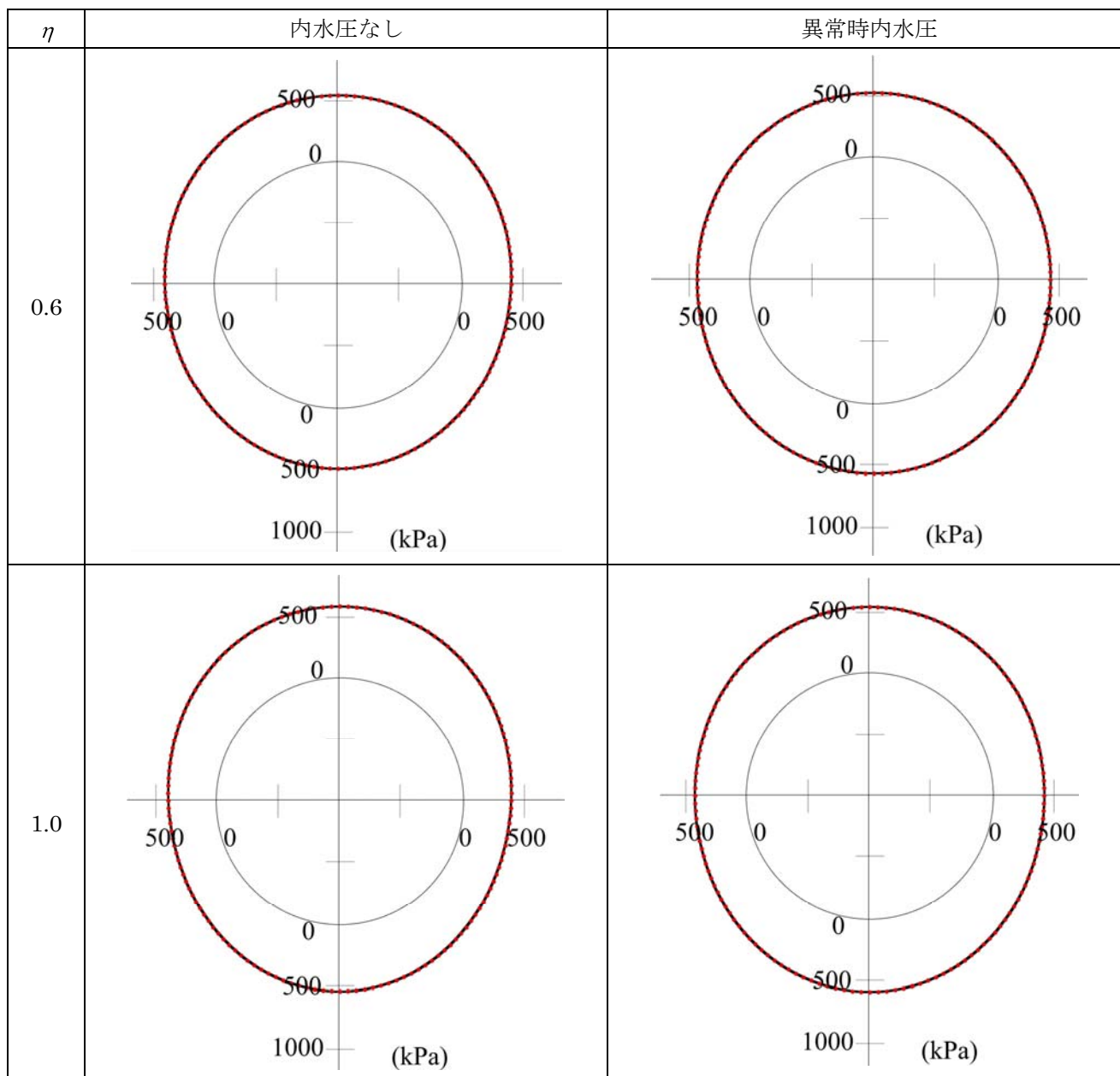
$$\text{異常時内水圧: } \eta = -0.08687\delta_v^3 + 1.287\delta_v^2 - 6.341\delta_v + 10.51$$

付図-4 δ_v と η の関係

4. 予測の精度について

付図-5 に、代表例として $\eta=0.6$ 、 1.0 の場合の FEM、近似式でそれぞれ求められる有効 σ 分布を比較したものを示す。この図から、近似式と FEM による有効 σ はほぼ一致していることがわかる。他の η においても近似式と FEM とは、ほぼ一致していることを確認している。

なお、鉛直方向のバランスについては、(鉛直土圧総量 P_v - 鉛直反力 P_r) が、シールドトンネルの有効重量の $1/500$ 程度生じているが、影響は少ないと判断した。



— FEM
・ 近似式

付図-5 FEM と近似式による有効 σ 分布の比較

[第5章 参考文献]

- 1) 先端建設技術センター (1999): 内水圧が作用するトンネル覆工構造設計の手引き.
- 2) 鉄道総合技術研究所 (1999): 鉄道構造物等設計標準・同解説 (シールドトンネル).
- 3) 鉄道総合技術研究所 (2001): シールドトンネル設計標準に関する手引き.
- 4) 鉄道総合技術研究所 (2002): 鉄道構造物等設計標準・同解説 (シールドトンネル) SI 単位版.
- 5) 小林寛治、肥沼昭 (2000): 東京都の河川事業における建設コスト縮減の取り組み—神田川・環状七号線地下調節地シールド工事—, pp.11-16、土木施工 41 巻 6 号.
- 6) 東田淳, 堀田清美, 篠崎亘, 三笠正人: 遠心力鉄筋コンクリート管(コンクリート支承)に加わる土圧と管の強度について, 土木学会論文報告集, 第 310 号, pp. 97-112, 1981.
- 7) 東田淳, 三笠正人: 遠心力模型実験による剛性埋設管の土圧の検討, 土木学会論文報告集, 第 376 号/III-6, pp. 171-180, 1985.
- 8) 吉村洋, 東田淳, 李黎明: 遠心模型によるたわみ性埋設管の土圧・変形挙動の検討, 土木学会論文集, No. 561/III-38, pp. 245-255, 1997.
- 10) 東田淳, 三笠正人: 弾性論による埋設管の土圧の検討, 土木学会論文報告集, 第 376 号/III-6, pp. 181-190, 1986.
- 11) 東田淳: 弾性論による地中埋設管のバックリング挙動の検討, 地盤工学会, 土と基礎, Vol. 49, No. 4, Ser. No. 519, pp. 19-22, 2001.
- 12) 東田淳, 三笠正人, 八谷誠, 中橋貞雄: 遠心力模型実験による剛性埋設管の実測土圧と FEM 弾性解析, 土木学会論文集, 第 406 号/III-11, pp. 263-272, 1989.
- 13) 吉村洋, 東田淳: たわみ性埋設管の遠心模型挙動に対する FEM 弾性解析, 土木学会論文集, No. 596/III-43, pp. 175-188, 1998.
- 14) Tohda, J., Yoshimura, H. and Li, L.: Mechanical behavior and design of buried Pipes as a soil-structure interaction, *Proc. of 14th ICSMFE*, pp. 1049-1052, 1997.
- 15) 東田淳, 吉村洋: たわみ性埋設管の合理的設計法の提案, 土木学会論文集, No. 617/III-46, pp. 679-686, 1999.
- 16) Tohda, J. and Yoshimura, H.: A new design method for buried pipe, *Proc. of 15th ICSMGE*, pp. 1319-1322, 2001.
- 17) 東田淳, 日野林譲二, 吉村洋, 寒竹英貴, 不動雅之: 高盛土下に埋設される排水管の合理的設計法の提案, 土木学会論文集, No. 701/III-58, pp. 263-281, 2002.
- 18) 吉村洋, 東田淳, 島津多賀夫, 西田博文, 中村臨: 斜掘り溝型方式で設置される埋設管の合理的設計法の提案, 地盤工学ジャーナル, Vol. 5, No. 1, pp. 119-136, 2010.
- 19) 東田淳, 島津多賀夫, 吉村洋, 井上裕司: 土と構造物の相互作用を考慮した埋設管渠の耐震設計法(断面方向)の提案, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.75, No.1, pp. 15-34, 2019.
- 20) 日本下水道協会: 下水道施設耐震計算例(管路施設編) 2015 年版, 2015.
- 21) 土木学会関西支部: 共同研究グループ「老朽化, および更生した下水道管きよの耐震設計法に関する研究」平成 28 年度報告書, 第 4 章, pp. 11-28, 2017.
- 22) 高柳淳二、山藤稔、佐々木一英、佐藤元治(2006): 内水圧が作用するセグメントの剥離現象の考察 — 外郭放水路 第一工区・第二工区一、トンネルと地下、427 号、Vol.37、日本トンネル技術協会、2006.

(文責: 東田 淳・島津多賀夫)

6. 今後の課題

本章では、本共同研究グループの2018年度の研究活動で検討課題として残った事項について述べる。

① 損傷原因の分析

- ・ 2017年度に引き続き、フレーム解析とFEM解析によってセグメント継手部内面側におけるコンクリートの剥離損傷の再現を試みた。その結果、側部では剥離損傷を再現できたものの、トンネル頂部では剥離損傷を再現することができなかった。そこで、他の要因として想定を超えたシール材膨張圧力の付加、シール材のシール溝からはみだし、内側シール材を介した軸力伝達などの可能性を指摘したが、これらの要因を説明付ける根拠は見出すことはできなかった。今後、要素試験、数値解析ならびに現場計測などにより、シール材が添付された状態でのセグメント継手部の挙動を解明することが課題として残った。
- ・ トンネル頂部の剥離損傷を再現することができなかったのは、既往の設計基準類を参考にして解析の荷重条件を設定したことから、トンネル頂部で正の曲げモーメント（内面側引張り）が卓越したためである。一方、現場計測や5章で提案されたコラボ設計法などでは、セグメント頂部において負の曲げモーメント（内面側圧縮）が発生する可能性が示されていることから、今後、トンネル頂部内面側が圧縮状態となる場合の現象をさらに解明し、その成果をセグメント継手部の挙動評価に反映することが課題として残った。

② 損傷対策

- ・ セグメントの剥離損傷を防止するためのハード面での対策として、セグメントの止水材（水膨張シール材の膨張圧とシール溝に対する占有体積率）、およびセグメント構造（シール溝と鉄筋の配置）について提案を行った。ただし、この提案は首都圏外郭放水路における損傷実績に基づいているので、必ずしもすべての内水圧トンネルに対して適用できるものではないことに注意が必要である。
- ・ ハード面での対策について残る検討課題としては、提案した対策の効果と適用限界の検証が挙げられる。この検討課題を追求する際には、提案した対策が想定される個々の損傷要因に対して損傷防止のために必要と想定される条件を整理したものに過ぎないことに注意が必要である。すなわち、実際の内水圧トンネルで生じるセグメントの剥離損傷は、個々の損傷要因が組み合わされて発生すると想定されるが、どの要因がどのように組み合わせると危険なのかについての分析は本研究会ではできておらず、課題として残っている。
- ・ 2017年度および2018年度の調査結果によれば、損傷が発生した3箇所の施設は全て内径が10m以上のコンクリートセグメント（二次覆工なし）であった。二次覆工や合成セグメントを採用している施設では損傷は確認されていないが、施工コストやスチール系部材の腐食などを考慮すると、これらによって全てが解決するものではないので、損傷防止対策を施したコンクリートセグメントの開発や合成セグメントの耐久性の確認が今後の技術的な研究課題として挙げられる。

③ 管理運営方法

- ・ コンクリートセグメントの剥離損傷防止の有効な対策として、トンネル頂部で内水位上昇を制御する管理方法を提案したが、この対策の実施に当たっては、計画貯水量への留意（例えば浸水に対する安全度の低下など）に対する事前検討が課題として挙げられる。
- ・ 大口径内水圧トンネルでは、維持管理や点検のための施設整備、および定期的点検が特に必要であり、これらを設計時点から考慮しておくことが望ましく、その実現のための具体的な働きかけ（例えば指針や手引きへの記載など）が今後、必要である。
- ・ アンケート調査で「損傷あり」との回答があった施設、または損傷の可能性が想定されるものの点

検が 1 回のみしか実施されていない施設に対する現地調査が、日程や安全面から実施できなかった例があった。施設の健全性の確認や研究の基礎データをより多く得るために、今後もこれらの施設の現地調査結果や点検結果を収集することが望ましい。

④ 内水圧が作用するシールド管渠の力学挙動に関する考察

- ・ 土と構造物の相互作用を考慮した弾性 FEM 解析と梁ばね解析(「神田川Ⅱ期設計基準」)を組み合わせる解析手法を提案し、外郭放水路第 2 工区のシールド管渠をモデルケースとした解析を実施して、内水圧無しでは頂部・底部・側部の各継手の内側が、また内水圧有りでは側部の継手の内側がそれぞれ損傷する可能性を示唆する結果を得た。
- ・ しかし、この解析で得られたシールド管渠の鉛直たわみ量 δ_v は、実際のシールド管渠の計測結果や施工経験から見て大きすぎると推定された。したがって、シールド管渠の場合、先行掘削による応力解放や裏込注入の影響などの不確定要素に対して検討の余地があり、これらを解決することが今後の課題として残った。

付録 1

研究会・幹事会 議事録

内水圧が作用する地下貯留トンネルの力学挙動に関する調査・研究

－ 第4回幹事会 議事録 －

■ 開催概要

日 時：2018年4月26日（木）15:00～17:30

場 所：中央復建コンサルタンツ株式会社大阪本社

出 席：東田代表、山本幹事長、今井幹事、井上幹事、團幹事、岩田委員、
島津委員

配布資料：

- ①第5回研究会 議事録案
- ②WSちらし：山本幹事長
- ③2018年度研究会活動方針案：山本幹事長
- ④損傷原因分析の解析計画案：井上幹事、團幹事

■ 議事概要

1. 第5回研究会議事録の確認

2月21日に開催した第5回研究会の議事録の内容を確認した。

2. WSちらしの説明

土木学会関西支部に提出した6月16日開催のWSのちらし（案内）について山本幹事長より説明があり、WG2の「損傷原因の分析」の報告は、作業の進み具合にもよるが、解析方針の発表でも良いのではないかとの意見があった。

3. 2018年度の研究会活動方針案の説明

2018年度の研究会の研究テーマ，活動組織，WGの組織，活動スケジュールについて山本幹事長より説明があり、以下を決定した。

- ・ 2018年度のWG4の名称を「対策検討WG」に修正する。
- ・ 次回研究会で方針案を委員に説明し、討議を行う。

4. 解析計画案の説明と討議

損傷原因分析の解析計画案として、対象とする損傷，損傷メカニズム，解析目的，確認事項，解析ケースについて、井上幹事と團幹事より説明があった。

- ・ 推測する損傷原因は意見が分かれているが、原因を特定するためにもセグメント端部とシール溝をモデル化して軸応力とシール膨張圧を作用させる二次元FEM解析を数ケース実施する必要があると意見が一致したため、研究会での承認に先立ち、代表承認により解析に着手することとした。

- ・ モデル化するセグメントは、損傷個所が特に多い外郭放水路の 2 工区を対象とする。
- ・ 解析の方針と途中経過を次回研究会で報告することとした。

5. 次回研究会の日程と議題について

以下の日程を決定した。議題は、2018年度活動方針、WSでの発表内容、および解析の方針と途中経過報告とする。

第 6 回研究会 : 5 月 31 日 (木)

14 時～17 時 (会場: 土木学会関西支部)

以 上

内水圧が作用する地下貯留トンネルの力学挙動に関する調査・研究

－ 第 6 回研究会 議事録 －

日時：2018 年 5 月 31 日（木）14:00～17:00

場所：土木学会関西支部会議室

出席：東田代表、山本幹事長、今井幹事、井上幹事、團幹事、岩田委員、矢野委員、吉村委員、
吉田委員、松本委員、楊委員

欠席：三品委員、島津委員、神谷委員、寺田委員、大杉委員、安岡委員、村上委員

【配布資料】

- ・資料 6-1 第 5 回研究会議事録（案）
- ・資料 6-2 第 4 回幹事会議事録（案）
- ・資料 6-3 2018 年度研究会活動方針（案）
- ・資料 6-4 WS（ワークショップ）の案内
- ・資料 6-5 WS での発表内容（案）（WG1）
- ・資料 6-6 WS での発表内容（案）（WG2）
- ・資料 6-7 解析計画、途中報告
- ・資料 6-8 管の引上げ実験

【議事内容】

1. 第 5 回研究会議事録の確認

山本幹事長より、第 5 回研究会の議事録案の報告があり、了承された。

2. 第 4 回幹事会議事録の確認

山本幹事長より、第 4 回幹事会の議事録案の報告があり、了承された。

3. 2018 年度研究会活動方針について

山本幹事長より第 4 回幹事会で討議した今年度の研究会活動方針案の報告があり、下記を修正することで、了承された。

＜修正点＞

- ・WG のメンバー表で、名前が漏れている委員があるので修正する。
- ・WG4 の名称は「損傷対策検討 WG」に修正する。

4. WG 1 のWSにおける発表内容について

6/16 関西支部学術講演会にて開催される WS の発表内容について説明があり、以下を修正して当日の発表資料とすることとした。

1) 神田川地下調整池の現地視察報告について

井上幹事より、神田川地下調整池現地視察報告の WS 発表スライド案の説明があった。

＜修正点＞

- ・誤字(トンネル外径)およびシール溝までの距離の写真と文書の不一致の修正。
- ・添付写真を鮮明にする。
- ・第一期は損傷個所が多数あるということの説明の追加（発表時の口頭での補足でも可）。

2) 外郭放水路の現地視察報告について

井上幹事より、外郭放水路現地視察報告の WS 発表スライド案の説明があった。

<修正点>

- ・添付写真を鮮明にする。
- ・シール材の「充填率」を「体積率」に変更。

3) 寝屋川北部地下河川の現地視察報告について

山本幹事長より、寝屋川北部地下河川の現地視察報告の WS 発表スライド案の説明があった。

<修正点>

- ・NM セグメントと HCCP セグメントの違いの説明の追加。
- ・計画中の地下河川の径、深さなどの説明の追加。

4) 北浜逢坂貯留管の現地視察報告について

山本幹事長より、北浜逢坂貯留管のヒアリング報告の WS 発表スライド案の説明があった。

<修正点>

- ・セグメント概要図を鮮明にする。
- ・合成セグメント（SSPC）を「鋼製中詰めセグメント」に修正する。

<その他の議論>

- ・当貯留管は RC セグメントで大深度であり、損傷発生の可能性が高いと想定されるにも拘わらず調査が不十分なため、管理者への注意喚起を続ける必要があるとの意見があった。

5) 損傷実態の整理について

現地視察報告のまとめに考察を加えて、「損傷実態の整理」として発表することとした。

5. WG 2 のWSにおける発表内容、および解析計画・途中経過について

團幹事より、「損傷原因の分析」の WS 発表スライド案、および現時点での FEM 解析結果の説明があった。解析方法や解析結果の捉え方について多数の意見が出されたが、一定の解析結果が得られているため、発表資料とすることで了承を得た。

6. 管の引上げ実験について

東田代表より、管の引上げ実験の方法と結果、およびセグメントの変形に対する考察の説明があり、WS で発表することとした。

以上

内水圧が作用する地下貯留トンネルの力学挙動に関する調査・研究

－ 第7回研究会 議事録 －

日時：2018年7月11日（水）14:00～17:30

場所：中央復建コンサルタンツ株式会社大阪本社

出席：東田代表、山本幹事長、今井幹事、井上幹事、團幹事、岩田委員、島津委員、楊委員

欠席：三品委員、神谷委員、寺田委員、大杉委員、安岡委員、松本委員、村上委員、矢野委員、吉田委員、吉村委員

【配布資料】

- ・資料 7-1 第6回研究会議事録（案）
- ・資料 7-2 2017年度報告書（案）
- ・資料 7-3 2018年度研究会活動計画（案）

【議事内容】

1. 第6回研究会議事録の確認

山本幹事長より、の第6回研究会の議事録案の報告があり、了承された。

2. 2017年度報告書について

2017年度報告書（案）について内容を確認し、以下の修正を行うこととした。また、未完成の「3.2 現地視察の損傷実態の整理」は、井上幹事が作成することとした。

- ・本報告書に記載する研究会、幹事会の議事録は、2017年度内で行ったものに限る。
- ・幹事会の名称は、第〇回幹事会と回数を付けることとする。
- ・第6章のタイトルは、「6.残る課題と来年度の活動方針」に修正する。
- ・第5章で紹介している模型実験は、過去に行ったものと解るように記載する。
- ・構成員名簿は、代表、幹事長、幹事、委員の順に記載する。所属は会社名のみとする。また、株式会社→㈱に統一する。
- ・章番号、図表番号の書式は、第5章に統一する。
- ・文中に記載している出典は、参考文献として章末に記載する。
- ・「3.1 既往報告の損傷実態に関する整理」は、既往文献の文章の引用になっているため、要旨をまとめて簡潔にする。

3. 2018年度研究会活動方針について

- ・損傷対策検討 WG4 および管理運営方法提言 WG5 の活動については、損傷実態の追加調査と管理運営方法に関する管理者への聞き取りを実施することとし、国内の既設内圧トンネルから適切な箇所を抽出して、具体的な調査計画を進めることとした。
- ・設計法検討 WG3 での数値解析による損傷要因の推定について、これまでの研究に引き続き、計算や解析を進めることとした。

5. 今後の予定

次回、幹事会、研究会の開催は下記で予定する。

- ・第5回幹事会 8月22日（水）14：00～ 土木学会関西支部会議室
- ・第8回研究会 9月5日（水）14：00～ //

以上

内水圧が作用する地下貯留トンネルの力学挙動に関する調査・研究

－ 第5回幹事会 議事録

■ 開催概要

日 時：2018年8月22日（水）14:00～17:00

場 所：土木学会関西支部会議室

出 席：東田代表、山本幹事長、今井幹事、團幹事、岩田委員、
島津委員、吉田委員、楊委員

配布資料：

①WGメンバー構成表修正案、研究会会員名簿修正案、追加調査計画案、貯留管図面：山本幹事長

②Muir解について：東田代表

③セグメント計算モデルについての確認の経緯：東田代表

④各計算法によるセグメント計算結果：團幹事

⑤フレーム解析・FEM解析の解析ケース：團幹事

⑥曲げ剛性有効率 η を変化させたFEM解析：島津委員

■ 議事概要

1. WG組織計画

WGメンバー構成の修正案が提示され、了承された。

2. 追加調査計画

損傷対策検討WG 4 と管理運営方法提言WG 5 が担当する調査箇所の案が提示され、調査可能な箇所を管理者に確認して設定し、調査日程を設定することとした。

調査は急いで実施する必要があるとの意見があった。

3. Muir解の解について

Muir解を用いる応答変位法の問題点を指摘した論文の説明が東田代表よりあった。

4. 各計算法によるセグメント計算結果

集中線荷重載荷および下水道耐震設計計算例モデルの荷重載荷に対する梁ばねモデル（剛性一様リング、鉄道総研法、M-K法）による計算結果（断面力、変位）について、配布資料に基づき團幹事より説明があった。

たわみ量を最大変位量から最大内空変位量に修正して、次回研究会で説明することとした。

5. フレーム解析・FEM解析の解析ケース

WG3が実施予定のセグメントフレーム解析とFEM解析の解析ケースについて、配布資料に基づき団幹事より説明があった。

大口径トンネルのフレーム解析は岩田委員、中口径トンネルのフレーム解析は今井幹事と楊委員が、FEM解析は団幹事と井上幹事他がそれぞれ担当することとした。また、次回研究会でフレーム解析の結果を提示することとした。

6. 曲げ剛性有効率 η を変化させたFEM解析

曲げ剛性有効率 η を変化させたFEM解析の解析モデルについて、島津委員より説明があった。次回研究会に解析結果の説明を行うこととした。

7. 次回研究会の日程と議題について

以下の日程を決定した。

第7回研究会 : 9月5日(水) 14時～17時
(会場：中央復建コンサルタンツ株式会社本社会議室)

以 上

内水圧が作用する地下貯留トンネルの力学挙動に関する調査・研究

－ 第 8 回研究会 議事録（案） －

日時：2018 年 9 月 5 日（水）14:00～17:30

場所：中央復建コンサルタンツ株式会社大阪本社

出席：東田代表、山本幹事長、今井幹事、井上幹事、團幹事、岩田委員、島津委員、楊委員、寺田委員、矢野委員、吉田委員、吉村委員

欠席：三品委員、神谷委員、大杉委員、安岡委員、松本委員、村上委員

【配布資料】

- ・資料 8-1 第 7 回研究会議事録（案）、第 5 回幹事会議事録（案）
- ・資料 8-2 WG 組織構成の変更（案）、研究会会員名簿（更新版）
- ・資料 8-3 WG3 のフレーム解析、FEM 解析方針
- ・資料 8-4 WG4, WG5 の調査計画案
- ・資料 8-5 各計算法によるセグメント計算結果
- ・資料 8-6 曲げ剛性有効率 η を変化させた FEM 解析

【議事内容】

1. 第 7 回研究会議事録、第 5 回幹事会議事録、WG 組織構成、会員名簿の確認

團幹事より、第 7 回研究会、第 5 回幹事会の議事録案および WG 組織構成の変更、会員名簿更新の報告があり、以下の事項を修正し了承された。

- ・第 7 回研究会議事録（案）において、出席者に吉田委員を追加し、「5. 今後の予定」に修正する。
- ・第 5 回幹事会議事録（案）において、3. のタイトルを「Muir 解について」に修正する。

2. WG 3 でのフレーム解析、FEM 解析方針の説明

團幹事より、WG3 のフレーム解析および FEM 解析の方針について説明があった。また、岩田委員より、大口径トンネルのフレーム解析結果の説明があった。

- ・フレーム解析結果より、内水圧の作用に伴って軸力が減少し、トンネル頂部付近では内面側の引張応力が増加する傾向が認められる。これは、外郭放水路等で確認された内面側の剥離損傷とは異なる挙動を示しているため、実態を再現できる解析条件への見直しが必要であるとの意見があった。
- ・フレーム解析に用いた地下水圧は、現行設計基準に基づき鉛直、水平方向の分布を採用しているが、実態に即して部材に垂直方向の分布に変更すべきとの意見があり、解析ソフトが対応可能であれば分布形状を見直すこととなった。

3. WG 4, 5 での調査計画について

山本幹事長より、配布資料に基づき WG4, WG5 の調査計画の調査予定先と管理者への質問案が説明され、下記の意見ならびに指摘があった。

- ・提示された管理者への質問案では、質問内容がセグメントの設計条件や損傷等の不要と考えられる質問も含まれており、文書も簡潔でないため、施設の管理・運営方法を中心とした簡潔な質問書に修正すべきである。
- ・下水道新技術推進機構の文献に、管理・運営方法のアンケート調査の内容と結果が記載され

ているため、これを参考にして、調査先と質問書を見直した方が良い。

- ・アンケート形式の簡潔な質問書にするのであれば、調査先を増やした方が良いとの意見があった。
- ・調査候補箇所の管理部署・連絡先等はHP等で調べる事が可能である。

4. 各計算法によるセグメント計算結果

団幹事より、集中線荷重載荷および下水道耐震設計計算例モデルの荷重載荷に対する梁ばねモデル（剛性一様リング、鉄道総研法、M-K法）による計算結果（断面力、変位）について、配布資料に基づき説明があり、鉄道総研法とM-K方で算定された鉛直たわみ量は、曲げ剛性有効率 η をそれぞれ0.85、0.55とした剛性一様リングの鉛直たわみ量と一致する結果が示された。

5. 曲げ剛性有効率 η を変化させたFEM解析

η を変化させたFEM解析の解析モデルおよび解析結果について、島津委員より説明があり、RCセグメントの鉄筋が降伏しないためには η を0.4以下にする必要があるとの結果が示された。

6. 今後の予定

次回、WG主査打合せ、幹事会、研究会の開催は下記で予定する。

- ・WG主査打合せ 9月27日（木）16：00～ 中央復建コンサルタンツ本社
- ・第6回幹事会 10月10日（水）14：00～ 土木学会関西支部会議室
- ・第8回研究会 10月31日（水）14：00～ //

以上

内水圧が作用する地下貯留トンネルの力学挙動に関する調査・研究

－ 第6回幹事会 議事録 －

■ 開催概要

日 時：2018年10月10日（水）14:00～17:30

場 所：中央復建コンサルタンツ株式会社大阪本社

出 席：東田代表、山本幹事長、今井幹事、井上幹事、團幹事、岩田委員、
島津委員、吉田委員、楊委員

配布資料：

- ①第8回研究会議事録案、WG主査打合せ記録簿
- ②WG3研究状況資料
- ③WG4，5調査計画資料
- ④FEM解析による内圧有無の影響検討

■ 議事概要

1. 第8回研究会議事録案、WG主査打合せ記録簿

山本幹事長より、第8回研究会議事録案およびWG主査打合せ記録簿の説明があり、一部誤字を修正し了承された。

2. WG3研究状況

團幹事より、WG3で損傷要因の特定として実施したフレーム解析結果の報告、および今後実施するFEM解析方針の説明があり、以下の意見があった。

- ・フレーム解析結果表の水圧作用方向の名称は、全体系、要素系では判り難いため、法線方向、鉛直方向に修正すべきである。
- ・フレーム解析結果から、空水時と内水圧作用時の変形量を比較すると、内水圧作用時から空水時に戻るときの挙動は、想定している変形に合致していると言える。
- ・FEM解析に用いるフレーム解析結果は、セグメント頂部のKセグメントの箇所でも得られた断面力を用いることで良い。

3. WG4，5調査計画資料

山本幹事長より、配布資料に基づきWG4,WG5の調査計画の調査予定先と、前回研究会の意見を踏まえて作成した管理者へのアンケート案が説明され、下記の意見があった。

- ・管渠の損傷の有無のアンケートは、「損傷無し」と「損傷有り」の二択にした方が良い。
- ・損傷ありの場合の損傷状況を問うアンケートは、選択式でなく損傷状況を記載していただく様にされた方が良い。

- ・その他の「維持管理上の改善項目」や「今後改善すべき事項」等は行間を空けて詳しく記載できる様にする。

4. FEM解析による内圧有無の影響検討

島津委員より、FEM解析による内圧有無の影響検討結果が提示され、セグメントの断面力や変位の差異について説明があり、以下の意見があった。

- ・検討モデルは内水位が比較的低く内圧有無での差が小さいと考えられるため、フレーム解析に用いたような大深度のモデルでも解析した方が良い。

5. 次回研究会の日程と議題について

以下の日程を決定した。

第9回研究会 : 10月31日(水) 14時～17時
 (会場：土木学会関西支部会議室)

以 上

内水圧が作用する地下貯留トンネルの力学挙動に関する調査・研究

－ 第 9 回研究会 議事録（案） －

日時：2018 年 10 月 31 日（水）14:00～17:00

場所：土木学会関西支部会議室

出席：東田代表、山本幹事長、井上幹事、團幹事、三品委員、岩田委員、島津委員、矢野委員、吉田委員

欠席：今井幹事、楊委員、吉村委員、寺田委員、神谷委員、大杉委員、安岡委員、松本委員、村上委員

【配布資料】

- ・資料 9-1 第 8 回研究会議事録（案）、第 6 回幹事会議事録（案）
- ・資料 8-2 WG3 研究状況資料
- ・資料 8-4 WG4, WG5 の調査計画案

【議事内容】

1. 第 8 回研究会議事録、第 6 回幹事会議事録の確認

山本幹事長より、第 8 回研究会と第 6 回幹事会の議事録案の報告があり、了承された。

2. WG 4, 5 での調査計画について

山本幹事長より、配布資料に基づき WG4, WG5 の調査計画の調査予定先と管理者への質問案が説明され、下記の意見があったが、配布資料の調査候補先に大阪府下水道事務所を追加し、アンケート調査を実施することとなった。

- ・アンケート形式の質問書にするのであれば、調査先を増やした方が良いとの意見があった。
- ・調査先にメリットが無ければ、アンケートの回収率は低くなると予想される。
- ・維持管理を中心とした管理者が公表を躊躇するアンケート内容になっているため、回答が得られないことが予想される。

3. WG 3 での研究状況の説明

團幹事より、WG3 の研究状況として、セグメントリングモデルのフレーム解析結果と継手部の FEM 解析結果について説明があった。また、島津委員より、大口径トンネルの FEM 解析結果の説明があった。

討議の結果、セグメント継手部 FEM 解析の次のステップとして、以下を実施することとした。

- ・頂部のセグメントピース継手面の斜角をモデル化した解析を実施する。
- ・継手面の作用力をどの程度増やしたら破壊するか確認する。
- ・シール材に働く圧力を軸力相当まで上げる解析を実施するかは、今後議論する。

4. 今後の予定

次回、WG 主査打合せ、幹事会、研究会の開催は下記で予定する。

- ・第 7 回幹事会 11 月 30 日（金）14:00～ 中央復建コンサルタント株式会社大阪本社
- ・第 10 回研究会 12 月 19 日（水）14:00～ （同上）

以上

内水圧が作用する地下貯留トンネルの力学挙動に関する調査・研究

－ 第 9 回研究会 議事録（案） －

日時：2018 年 10 月 31 日（水）14:00～17:00

場所：土木学会関西支部会議室

出席：東田代表、山本幹事長、井上幹事、團幹事、三品委員、岩田委員、島津委員、矢野委員、吉田委員

欠席：今井幹事、楊委員、吉村委員、寺田委員、神谷委員、大杉委員、安岡委員、松本委員、村上委員

【配布資料】

- ・資料 9-1 第 8 回研究会議事録（案）、第 6 回幹事会議事録（案）
- ・資料 8-2 WG3 研究状況資料
- ・資料 8-4 WG4, WG5 の調査計画案

【議事内容】

1. 第 8 回研究会議事録、第 6 回幹事会議事録の確認

山本幹事長より、第 8 回研究会と第 6 回幹事会の議事録案の報告があり、了承された。

2. WG 4, 5 での調査計画について

山本幹事長より、配布資料に基づき WG4, WG5 の調査計画の調査予定先と管理者への質問案が説明され、下記の意見があったが、配布資料の調査候補先に大阪府下水道事務所を追加し、アンケート調査を実施することとなった。

- ・アンケート形式の質問書にするのであれば、調査先を増やした方が良いとの意見があった。
- ・調査先にメリットが無ければ、アンケートの回収率は低くなると予想される。
- ・維持管理を中心とした管理者が公表を躊躇するアンケート内容になっているため、回答が得られないことが予想される。

3. WG 3 での研究状況の説明

團幹事より、WG3 の研究状況として、セグメントリングモデルのフレーム解析結果と継手部の FEM 解析結果について説明があった。また、島津委員より、大口径トンネルの FEM 解析結果の説明があった。

討議の結果、セグメント継手部 FEM 解析の次のステップとして、以下を実施することとした。

- ・頂部のセグメントピース継手面の斜角をモデル化した解析を実施する。
- ・継手面の作用力をどの程度増やしたら破壊するか確認する。
- ・シール材に働く圧力を軸力相当まで上げる解析を実施するかは、今後議論する。

4. 今後の予定

次回、WG 主査打合せ、幹事会、研究会の開催は下記で予定する。

- ・第 7 回幹事会 11 月 30 日（金）14:00～ 中央復建コンサルタント株式会社大阪本社
- ・第 10 回研究会 12 月 19 日（水）14:00～ （同上）

以上

内水圧が作用する地下貯留トンネルの力学挙動に関する調査・研究

－ 第7回幹事会 議事録 －

■ 開催概要

日 時：2018年11月30日（金）14:00～17:00

場 所：中央復建コンサルタンツ株式会社大阪本社

出 席：東田代表、山本幹事長、井上幹事、團幹事、岩田委員、
島津委員、矢野委員、吉田委員

配布資料：

- ①第9回研究会議事録案
- ②WG3研究状況資料
- ③実規模シールドの載荷試験資料
- ④WG4、5調査計画資料

■ 議事概要

1. 第9回研究会議事録案

山本幹事長より、第9回研究会議事録案およびWG主査打合せの内容について説明があり、了承された。

2. WG3研究状況の報告

(1) 團幹事より、WG3で損傷要因の特定を目的として実施した直角および斜角セグメントピースモデルによるフレーム解析の断面力を用いたFEM解析結果の説明があり、トンネル側方部では想定される作用によって剥離損傷を再現できたものの、トンネル頂部付近についてはセグメント同士の接触に相当する荷重を考慮する必要があるとの結果が示された。

(2) 岩田委員より、各段階の荷重の断面力を重ね合わせるステップ解析と、荷重を同時載荷するワンステップ解析によるフレーム解析の断面力の差異について説明があり、ワンステップ解析では発生曲げモーメントを過小に評価する傾向にあること、鉄道総研に準拠した継手ばねを適用するとその傾向は顕著になることが示された。

(3) 島津委員より、内水位の有無の影響について検討したFEM解析の結果の報告があり、 $\eta=0.6$ とした場合も、 $\eta=0.2$ とした場合と同様に、内水圧が作用すると軸力Nは小さくなるが、モーメントMは影響を受けないことが示された。また、内水圧により、 η が小さくなると考えた場合には、 $\eta=1.0$ の内水圧無しの場合と $\eta=0.6$ の内水圧が平常時の場合を比較することにより、内水圧の有無により、Nの変動は小さいが、Mは分布形状と大きさが変化することが示された。

3. 実規模シールドの載荷試験結果の考察

東田代表より、「内水圧が作用するトンネル覆工構造設計の手引き」に記載されている実規模シールドトンネルの載荷試験結果について説明があり、シールドトンネルの曲げ剛性EIは内水圧の有無による軸力Nの変化に伴って、内水圧無し・軸力N大の時の $EI >$ 内水圧有り・軸力N小のEIと変化し、これに伴って生じるシールドトンネルの変形量の変化がセグメントの損傷を引き起こしている可能性があるとの考察が示された。

4. WG 4, 5 のアンケート調査

山本幹事長より、前回研究会で了承を得たアンケート調査について、8箇所の管理者にアンケートを配布済みであるとの報告があった。

5. 損傷対策WG 4 の活動計画

損傷対策WG 4での今後の活動は、これまで得られた情報や研究結果に基づいて損傷を防止するためのRCセグメントの構造細目等や留意点を立案することとし、WG 4 主査の井上幹事を中心に、幹事、委員から意見を抽出して素案を作成することにした。

6. 次回研究会の日程と議題について

以下の日程を決定した。

第10回研究会：12月19日（水）14時～17時 中央復建コンサルタンツ株式会社本社

以 上

内水圧が作用する地下貯留トンネルの力学挙動に関する調査・研究

－ 第 10 回研究会 議事録（案） －

日時：2018 年 12 月 19 日（水）14:00～17:30

場所：中央復建コンサルタンツ株式会社大阪本社

出席：東田代表、山本幹事長、今井幹事、井上幹事、團幹事、岩田委員、矢野委員

欠席：楊委員、吉村委員、寺田委員、神谷委員、大杉委員、安岡委員、松本委員、村上委員、島津委員、三品委員、吉田委員

【配布資料】

- ・資料 10-1 第 9 回研究会議事録（案）
- ・資料 10-2 第 7 回幹事会議事録（案）
- ・資料 10-3 WG3 研究状況資料
- ・資料 10-4 WG4, WG5 アンケート調査

【議事内容】

1. 第 9 回研究会議事録、第 7 回幹事会議事録の確認

山本幹事長より第 9 回研究会と第 7 回幹事会の議事録案が報告され、いずれも了承された。

2. WG 3 での研究状況の説明

(1) 團幹事の報告

空水時、満水時（異常内水圧載荷時）にセグメント継手部に発生する断面力を梁ばねモデルを用いたフレーム解析によって求め、この断面力から得られた応力、ならびに試算により別途推定したシール材膨張圧力と局所的な接触荷重を、側部（内側圧縮=負曲げ）と頂部（内側引張り=正曲げ、直角形状と斜角形状の 2 通り）のセグメント継手面に与えた FEM 解析を実施し、以下の結果を得た。

- ・側部（内側圧縮=負曲げ）では、シール材の反発力を考慮すれば、空水時、満水時とも、セグメント内面側の剥離を再現でき、空水時の破壊形状の方が満水時よりも浅い角度で生じて実際に近い結果となった。
- ・頂部（内側引張り=正曲げ）では、直角形状セグメントおよび斜角形状セグメントとも、シール材の膨張圧力を考慮しても剥離現象を再現できなかった。
- ・頂部（内側引張り=正曲げ）の斜角形状セグメントで、空水時に継手部の内側シール溝よりもさらに内側に局所的な接触荷重を与えた場合、セグメント内面が剥離する可能性があるとの解析結果が得られた。
- ・フレーム解析では、内水圧無しの場合、シールド覆工の形状は扁平となる。内水圧載荷によってシールド覆工は全体にわずかに膨らむが、形状としては内水圧無しの場合よりもさらに扁平となる結果が得られた。これは、満水時から空水時に移行する過程で、シールド覆工の変形が元の真円側に移行し、頂部内面側において隣接したセグメントが接近し、接触に至る可能性を示す。さらに、接触発生位置について議論があり、外郭放水路の破損報告で指摘されたように水膨張したシール材を介して接触するとの意見と、斜角形状セグメントの FEM 解析で示されたようにシール溝よりも内側でセグメントどおしが直接接触するとの意見が出されたが、結論には至らなかった。

(2) 東田代表の報告

「内水圧が作用するトンネル覆工構造設計の手引き」(以下、「手引き」と呼ぶ)に記載されている実規模トンネル覆工の載荷試験の結果、島津委員が実施した FEM 解析の結果、および東田による思考実験の内容について以下の説明があった。

- ・ 「手引き」に示された実規模トンネル覆工の載荷試験結果によれば、トンネル覆工に軸力を作用させない場合の鉛直たわみ量は軸力を作用させた場合よりも 1.7 倍程度大きくなっている。この結果は、内水圧載荷によって覆工に生じる軸力が減少するのに伴ってトンネル覆工の曲げ剛性 EI が減少し、トンネル覆工の鉛直たわみ量が内水圧載荷無しの場合よりも増大することを示す。
- ・ 内水圧の載荷除荷に伴うシールド覆工の変形挙動は、FEM 解析と梁ばねモデルのフレーム解析で定性的に一致したが、FEM 解析で得られたトンネル覆工の変形量は内水圧の有無に拘らずフレーム解析で得られた変形量よりも 1 オーダー程度大きかった^{注)}。
- ・ 梁バネモデルで用いられる設計荷重は土と構造物の相互作用を正當に評価できていないので実態とは異なる。一方、FEM 解析は、荷重の設定方法については梁バネモデルが有するような問題は無いが、シールド覆工の構造系に一樣断面を用いているため、継手の存在による剛性低下を考慮できない。よって、FEM 解析で求めた荷重を梁ばねモデルに与えて覆工の変形量を求め、この変形量に相当する一樣断面の ηEI と荷重を収束計算によって決定すれば、実際に近いシールド覆工の挙動を再現できる可能性があるとの思考実験の内容が示された。
- ・ 継手断面にジョイント要素を挿入する FEM の実施は今後議論していくこととした。

注) これは FEM で採用した周辺地盤の $E_s=700N$ が過小であったためと推定されるので、今後 $E_s=2800N$ として解析を実施する予定である。

3. WG4, WG5でのアンケート調査結果

(1) 山本幹事長より、アンケート調査の回収状況と回答について説明があった。調査先 8 箇所のうち 6 箇所から回答が得られたため、回答内容を整理したものを次回研究会で提示することとなった。

(2) 横浜市からの回答で、“トンネル内の損傷有り”との回答が得られたため、現地調査やヒアリングを管理者に依頼することとなった。

4. その他

- ・ ワークショップは、2019 年 5 月に開催される土木学会関西支部年次学術講演会で開催することで関西支部に申し込む。
- ・ 関西支部年次学術講演会概要集への投稿はしないこととする。
- ・ 土木学会全国大会への投稿は実施する方向で検討することとした。

5. 今後の予定

次回、幹事会、研究会の開催は下記で予定する。

- ・ 第 8 回幹事会 2019 年 2 月 6 日 (水) 14:00～
- ・ 第 11 回研究会 2019 年 2 月 27 日 (水) 14:00～

場所は何れも中央復建コンサルタンツ(株)本社

以上

内水圧が作用する地下貯留トンネルの力学挙動に関する調査・研究

－ 第8回幹事会 議事録 －

■ 開催概要

日 時：2019年2月6日（水）14:00～17:00

場 所：中央復建コンサルタンツ株式会社大阪本社

出 席：東田代表、山本幹事長、今井幹事、井上幹事、團幹事、岩田委員、
島津委員、吉田委員

配布資料：

①第10回研究会議事録案

②WG 3 内圧の有無による挙動に関する解析

③WG 3 FEM解析と梁バネモデルFRAME解析を用いた解析方法に関する資料

③WG 4、5 調査結果の集計

④WG 5 研究項目（案）

■ 議事概要

1. 第10回研究会議事録案

山本幹事長より第10回研究会議事録案の内容について説明があり、了承された。

2. WG 4、5の調査結果の集計と今後の活動

(1)山本幹事長より、WG 4、5で実施したアンケート調査の集計結果が提示され、討議の上、以下を決定した。

- ・ 「損傷あり」との回答があった横浜市今井川調節池については、文献や公表資料による施設内容の調査実施と併せて、現地調査やヒアリングの可能性を管理者に確認する。現地調査やヒアリングが可能な場合は3月末を目途に実施するが、不可能な場合は損傷内容が把握できる資料の貸与依頼や損傷内容の詳細に関する再アンケートを実施する。
- ・ 福岡市比恵9号幹線のアンケート回答で、「圧力管でない」との記述があったため、運用方法を再確認する。

3. WG 5の研究項目（案）について

(1)山本幹事長よりWG 5の研究項目（案）が提示され、討議の上、以下を決定した。

- ・ 研究項目は概ね提示の通りとするが、研究内容が把握できる様に内容の具体化を早期に行う。
- ・ 「点検に関する提言」は「点検・調査に関する提言」に修正する。

- ・ 下水道等で規定されている点検・調査項目に関する資料を今井幹事より提供してもらう。

4. WG3の今後の研究について

(1) 東田代表より、研究会でこれまで実施してきた解析的研究では、トンネル頂部付近で生じると想定される正曲げ(内側引張り)条件の継手部の損傷を説明できないとの指摘があり、これに対して以下の議論があった。

- ・ 内水圧作用時のトンネルの挙動を明確にすることは時間的に困難であり、これまでの解析的研究で示された側部(負曲げ、内側圧縮)の損傷原因を研究成果として取りまとめる選択肢もあるとの意見があった。
- ・ トンネル形状の初期状態が縦長であれば、内水圧作用によるトンネル頂部付近の損傷を説明できる可能性があるとの意見があり、実際にセグメントが縦長に組まれた事例や測定データがあるのでこれらを収集することとした。
- ・ 損傷箇所は、これまで調査した環七地下調整池、および首都圏外郭放水路の各工区ごとに異なっているので、損傷箇所をトンネルの頂部や側部に限定するのは一面的ではないかとの意見があった。

(2) 島津委員より、首都圏外郭放水路を対象として、地盤の変形係数 E_s を2800Nとし、曲げ剛性 η を1.0、0.6、0.2の3ケースに変化させて実施したFEM解析の結果(変形図とたわみ量)が提示され、トンネルの鉛直たわみ量は E_s を700Nとして実施した以前のFEM解析の結果よりも1/2～1/3程度小さくなり、梁バネモデルのFRAME解析の結果に近づいたとの説明があった。

(3) 東田代表より、内圧トンネルの変形挙動に関する思考実験の内容が示され、内圧トンネルに作用する土圧と変形挙動を定量的に明らかにすることを目的として以下を実施することとした。

- ・ η を変化させたFEM解析で得られた垂直土圧を荷重として梁バネモデルに入力して鉛直たわみ量を求め、FEM解析と梁バネモデルで鉛直たわみ量がほぼ一致するまで η と垂直土圧を変化させる収束計算を実施する。
- ・ 梁バネモデルは、軸力変動に伴うセグメント継手の回転ばね定数の変化を扱える総研法を用いる。ただし、地盤の反力バネは無しとし、外力(土圧、水圧、自重)は一括載荷とする。
- ・ 解析は、團幹事、島津委員、松本委員を中心に、代表や他幹事が内容を確認しながら実施することとする。

5. 今後の研究会の日程について

以下の日程を決定した。

	日時	場所	備考
第11回研究会	2月27日（水）14時～	CFK大阪本社	
WS 開催	5月25日（土）時間未定	（大阪大学）	
報告書提出	6月25日		

以 上

内水圧が作用する地下貯留トンネルの力学挙動に関する調査・研究

－ 第 9 回幹事会 議事録 －

■ 開催概要

日 時：2019年3月11日（月）14:00～17:30

場 所：中央復建コンサルタンツ株式会社大阪本社

出 席：東田代表、山本幹事長、今井幹事、井上幹事、團幹事、岩田委員、
三品委員、島津委員、吉田委員

配布資料：

- ①第 8 回幹事会議事録案
- ②WG 3 研究状況資料
- ③WG 4、5 追加調査計画
- ④報告書目次（案）
- ⑤WS 発表資料プログラム（案）
- ⑥研究会・幹事会予定表

■ 議事概要

1. 第8回幹事会議事録案の確認

山本幹事長より第8回幹事会議事録案の内容について説明があり、了承された。

2. WG 4、5 の追加調査計画について

山本幹事長より、WG 4、5 の追加調査計画の資料として、横浜市今井川調節池のヒアリング項目、福岡市比恵幹線への再質問項目の説明があり、了承された。横浜市の現地調査・ヒアリングは、先方から候補日の連絡があり次第、日程調整を行うものとし、福岡市には再質問をメールや電話連絡で実施することとした。

3. 報告書目次（案）について

山本幹事長より今年度の報告書目次案が提示され、討議の上、以下を決定した。

- ・ 報告書の構成については議論に基づいて目次案を修正し、山本幹事長より幹事会出席メンバーに配信、確認、再修正の上、次回研究会で提示する。
- ・ 昨年度の調査・研究内容は概要のみを記載する。

4. WS 発表資料プログラム（案）について

WS のプログラムについて討議の上、以下を決定した。

- ・ プログラムおよび発表者項目は、「開会挨拶・活動報告（東田代表）」、「損傷原因の

分析（團幹事、松本委員）」、「損傷対策の提案（井上幹事）」、「管理運営方法の提案（山本幹事長）」、「シールド管渠の力学的挙動に関する考察（東田代表、島津委員）」、「ディスカッション（出席者）」、「閉会挨拶（東田代表）」とする。

- ・ 最終のプログラム案を山本幹事長より幹事会出席メンバーに今週中に配信し、確認、修正を行い、次回研究会で確認の上、4/10までに土木学会関西支部に提出する。

5. WG3の研究について

(1) 團幹事より、損傷要因の検討資料について説明があり、以下の決定と討議を行った。

- ・ 損傷要因のうち施工時の影響については、トンネル頂部で剥離損傷が発生する現象とそれ以外の要因による剥離現象を初期不整の程度や施工条件を考慮して再整理することとした。
- ・ 鉄道総研法の回転ばね定数を用いて、解析時点を空水時と異常水圧作用時の2通り、荷重載荷方法を一括載荷と段階載荷の2通りに変化させて実施した4ケースのフレーム解析の結果が報告されたが、荷重載荷方法を変化させた場合の作用荷重が一致していないとの指摘があったことから、荷重条件を確認することとした。
- ・ 「内水圧が作用するトンネル覆工構造設計の手引き」をベースとしたフレーム解析の結果を用いて、空水時の軸力増分をシール材のみが支持するとセグメントが損傷に至る可能性が示されたのに対し、解析結果は採用した手法によって変動するので、定量的な説明ではなく、定性的な現象の説明に留めた方が良いとの意見があった。

(2) 東田代表、團幹事、島津委員より、内圧トンネルに作用する土圧と変形挙動の明確化を目的としたFEM解析と梁バネモデル解析のコラボレーションについて説明があり、FEM解析の曲げ剛性 η ～荷重関係の算定が完了したので、FEM解析で求めた荷重を梁バネモデルに与えてトンネルの鉛直たわみ量を求め、FEM解析と梁ばねモデル解析で求めた鉛直たわみ量が一致した時の荷重とトンネル変形を解とする収束計算を進めることとした。

6. 今後の研究会の日程について

以下の日程等を決定した。

	日時	場所（予定）	備考
WS開催	5月25日（土）時間未定	（大阪大学）	
報告書提出	6月25日		

7. その他

会計報告の予算差引簿、研究会・幹事会の議事録を土木学会関西支部に早急に提出することとした。

以 上

付録 2

ワークショップ配布資料

「内水圧が作用する地下貯留トンネルの力学挙動に関する調査・研究」 ワークショップ 開催のご案内

近年、大都市では、豪雨に伴って発生する局所的な浸水被害に対処するため、地下貯留シールドトンネル（地下河川、放水路等）が建設されています。完成後の地下貯留シールドトンネルでは、その使用目的から長期にわたる高度な耐久性・機能性が要求されます。

首都圏では、供用中の二次覆工を省略した地下貯留シールドトンネルの中で、供用開始後、RC セグメントにコンクリートの剥離、ひびわれ、漏水などの損傷が生じている事例が報告されており、その原因として、外水圧に匹敵する内水圧の载荷除荷に伴う覆工の軸力変動、シールド材の膨張、シールド溝の設置位置の影響などが指摘されています。一方、関西でも、地下河川、雨水増補幹線、貯留管（滞水池）の建設が進められていますが、供用後のトンネル覆工の損傷実態、損傷原因、損傷に対する対策については未解明な部分が残っているのが実情です。

そこで、本研究グループでは、内水圧が繰り返し作用する地下貯留シールドトンネルについて、損傷実態の把握、損傷原因となる力学挙動の解明、および対策手法の開発を行うことを目的として、平成 29 年度から研究活動を行ってきました。その結果、地下貯留トンネルの損傷形態は RC セグメントの端面におけるコンクリートの剥離が主であるが、主鉄筋に達する深い剥離も生じていること、内水圧载荷回数が増大に伴って損傷箇所が増えていること、合成セグメントでは損傷事例がないこと、また関西ではこれまでの実績の 2 倍を超えるような最大内水位が作用する大深度地下貯留トンネルの築造が計画されていることなどが分かってきました。

本ワークショップでは、損傷原因と対策、貯留施設の管理運営方法、およびシールド管渠の力学挙動について議論したいと考えています。多数のご参加を頂きますよう、ご案内申し上げます。

記

開催日時：平成 31 年 5 月 25 日(土) 14:30～16:30

開催会場：大阪大学 吹田キャンパス 工学部 M1-211 教室（第 6 部門 VI-1 会場）

<https://www.eng.osaka-u.ac.jp/ja/access.html>

<http://www.osaka-u.ac.jp/ja/access/suita/suita.html>

土木学会関西支部の WEB サイトも参照ください

<https://www.jsce-kansai.net/?p=2724>（平成 31 年度年次学術講演会 開催案内）

プログラム(敬称略)：

14:30～14:45	開会挨拶・活動報告	代表者 大阪市立大学客員教授 東田 淳
14:45～15:15	損傷原因の分析	中央復建コンサルタンツ(株) 團 昭博・松本貴士
15:15～15:30	損傷対策の提案	中央復建コンサルタンツ(株) 井上裕司
15:30～15:45	管理運営方法の提言	中央復建コンサルタンツ(株) 山本和広
15:45～16:05	内水圧が作用するシールド管渠の力学挙動に関する考察	大阪市立大学客員教授 東田 淳 (株)アサノ大成基礎エンジニアリング 島津多賀夫
16:05～16:25	ディスカッション	(聴講者・研究会メンバーによる意見交換)
16:25～16:30	閉会挨拶	幹事長 中央復建コンサルタンツ(株) 山本和広

※都合により講師や順序などに変更の生じる場合がございますので、予めご了承ください。

20190525

関西支部年次学術講演会ワークショップ

共同研究グループ 「内水圧が作用する地下貯留トンネルの 力学挙動に関する調査・研究」 2018年度活動報告

代表者 大阪市立大学 客員教授 東田 淳

①

構成員 (17名)

代 表	東田 淳	Buried Pipe Research Center、大阪市立大学客員教授
幹 事	井上 裕司	中央復建コンサルタンツ（株）
幹 事	今井 一彦	（株）建設技術研究所
	岩田 和実	ジオスター（株）
	大杉 朗隆	大阪市
	神谷 拓生	西松建設（株）
	島津多賀夫	（株）アサノ大成基礎エンジニアリング
幹 事	團 昭博	中央復建コンサルタンツ（株）
	寺田 武彦	中央復建コンサルタンツ（株）
	松本 貴士	中央復建コンサルタンツ（株）
	三品 文雄	エースコンサルタント（株）
	村上 秀作	ジオスター（株）
	安岡 政光	大阪府
	矢野 博彦	積水化学工業（株）
幹事長	山本 和広	中央復建コンサルタンツ（株）
	吉村 洋	（独）国立高等専門学校機構 阿南工業高等専門学校
	楊 雪松	（株）建設技術研究所

活動期間2017, 2018年度の2年間

②

背景

□大都市の局所的浸水被害の多発

- 地下貯留シールドトンネルが建設・運用
- 関西でも地下河川、雨水増補幹線、貯留管(滞水池)が建設・運用
- 寝屋川地下河川(大深度地下70m)の築造が計画

□二次覆工省略型内水圧トンネル

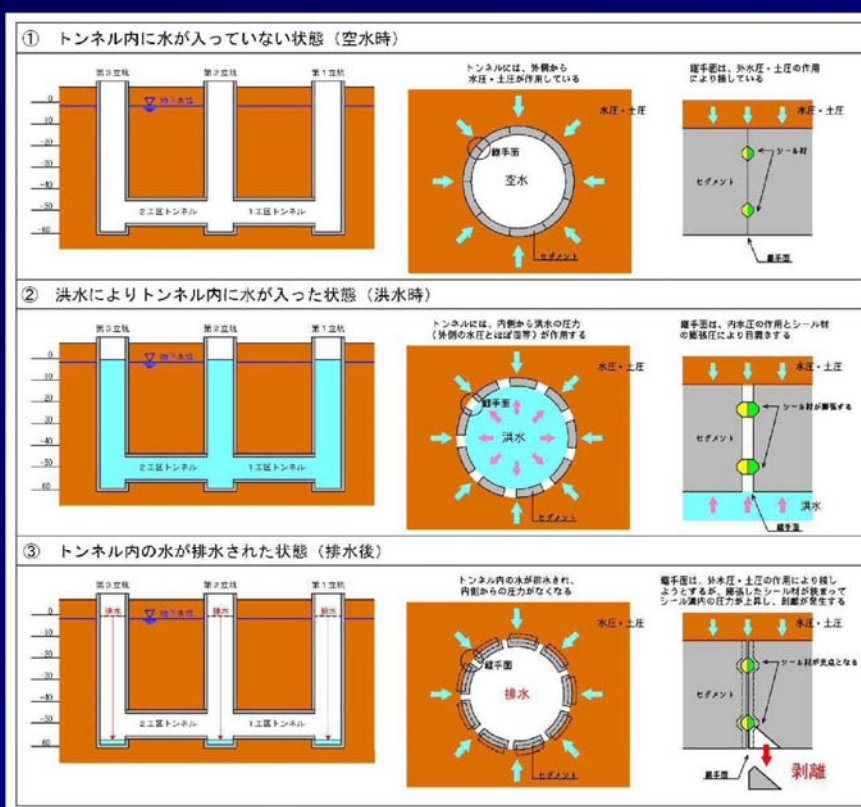
- 首都圏で供用後、RCセグメントIIに損傷発生
- セグメント端面の浅い剥離が主、深い剥離もあり
- 内径10m以上
- 合成セグメント被害なし

□原因: 外水圧に匹敵する内水圧の繰り返し載荷

- 覆工の軸力減少・増大の繰り返し? シール材の膨張? シール溝の設置位置? トンネルの変形? 施工時の初期不整・曲線施工? トンネル径?

③

過去に推定された損傷メカニズム(外郭放水路)



空水時

継手は土圧
と外水圧の
作用により隙
間なし

洪水時

内水圧負荷
により継手が
開き、シール
材膨張

排水時

膨張したシール材が支点となり剥離発生

④

研究会の活動目的

- 供用後のトンネル覆工の損傷実態、損傷原因、損傷に対する対策

➡ 未解明な部分が残っているのが実情

- 研究会の活動目的

➡ 内水圧が繰り返し作用する地下貯留シールドトンネルについて、損傷実態の把握、損傷原因となる力学挙動の解明、および対策手法の提案を行う

2017年度の活動のまとめ #1

- 研究会5回、幹事会4回開催

➡ 神田川・環七地下調整池、大阪府地下河川、首都圏外郭放水路、大阪市北浜逢坂貯留管の現地見学・ヒアリング

⑤

2017年度の活動のまとめ #2

- セグメントの損傷は以下に限定

➡ RCセグメント(合成セグメントなし)

➡ 神田川と外郭放水路で損傷発生(内径12.5m, 10.6m)

- 関係する要因(首都圏外郭放水路を主とした場合)

➡ 損傷の個所数・位置に工区で差

・ 第2工区で大量発生(7000カ所、位置ランダム)

・ 第1、3工区はウレタン系シール材使用箇所では頂部に損傷発生

・ 第1工区は急曲線区間に限定(140カ所)

➡ 損傷数はシール材の膨張スピードと体積充填率で差

➡ シール溝の設置位置(内面との離隔)によって差

➡ セグメントタイプ(Kとそれ以外のB,A)によって差

➡ 損傷発生は年数とともに継続

⑥

2018年度の活動 #1

□ 第6回研究会(5/31)

➡WG③損傷原因分析、WG④損傷対策検討、WG⑤管理運営方法提言の活動方針

□ 第7回研究会(7/11)

➡2017年度報告書の内容確認

□ 第8回研究会(9/5)

➡WG③:

- ・シール材への軸力集中(従来の見解)の他にセグメントの局所的接触(本研究会の着眼点)の影響を定量化の方針
- ・「内水圧設計手引き」に基づくフレーム解析と継手のFEM解析により継手面の応力状態把握→損傷原因推定
- ・土・構造物の相互作用を考慮したFEM解析の紹介

➡WG④⑤:

- ・損傷対策と管理運営に関する調査計画
- ・管理者への質問内容

⑦

2018年度の活動 #2

□ 第9回研究会(10/31)

➡WG③:

- ・「神田川設計基準」(水圧を法線方向に載荷)による外郭放水路のフレーム解析例
- ・外郭放水路の継手FEM解析例

➡WG④⑤: 調査計画・管理者への質問内容

□ 第10回研究会(12/19)

➡WG③:

- ・外郭放水路のフレーム解析により、満水時から空水時に頂部内面でセグメントが接触の可能性
- ・継手FEM解析により、側部ではシール材の反発力によりセグメント内面が剥離、頂部では内側シール溝よりも内面側でセグメントの接触により剥離発生の可能性
- ・荷重をFEM解析、構造を梁ばねモデルで与えるコラボ手法の提示

➡WG④⑤: 管理者からの回答(1カ所損傷有り、内径約11m) ⑧

2018年度の活動 #3

□ 第8回拡大幹事会(2019/2/6)

➡WG③:

- ・トンネル頂部の内面接触の可能性について、トンネルの組み立て時の形状について調査の必要性について討議
- ・外郭放水路の**FEM解析**結果の提示
- ・コラボの思考実験に基づく解析の進め方について討議

➡WG④⑤:今後の活動について討議

□ 第9回拡大幹事会(2019/3/11)~

➡WSプログラム、報告書目次案の確認

➡WG③:

- ・「神田川設計基準」によるフレーム解析により、空水時の軸力増分をシール材のみで支持すると損傷の可能性
- ・「神田川設計基準」の問題点について討議
- ・外郭放水路のコラボ計算の結果提示

⑨

本日の報告

□ 損傷原因の分析

- ・フレーム解析とFEM解析による継手の応力状態の把握
- ・側部はシール材の膨張圧力により剥離の可能性
- ・頂部は貯留時に吸水膨張した内側シール材を支点とする変動軸力により剥離の可能性

□ 損傷防止対策の提案

- ・シール材 ・セグメント構造

□ 管理運営方法の提言

- ・点検 ・維持管理施設整備 ・施設運用方法(**水位管理**)

□ 内水圧が作用するシールド管渠の力学挙動の考察

- ・コラボ解析による外郭放水路の挙動予測

⑩

内水圧が作用する地下貯留トンネルの 力学挙動に関する調査・研究

損傷原因の分析

中央復建コンサルタンツ株式会社
團 昭博・松本貴士

損傷実態の調査結果【昨年度報告】

■現地調査箇所

施設	環七地下河川		外郭放水路		古川	北島	北浜
	第1期	第2期	第1～3工区	第4工区	—	—	—
内径	12.5m	12.5m	10.6m	10.6m	7.5m	5.4m	6.0m
種類	RC	合成	RC	DRC	合成	合成	RC
剥離	有	無	有	無	無	無	不明

■実態調査により確認された損傷の状態

- ①内径 10m 以上の RC セグメントで剥離損傷が発生。
- ②セグメントの鉄筋やシール材が露出する深い剥離が多い。
- ③シール材の深さに達していない浅い剥離も比較的多い。

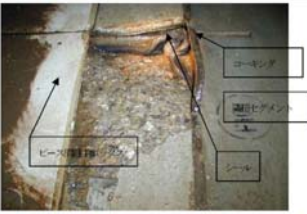


シール材が露出する剥離



比較的浅い軽微な剥離

確認されたセグメント損傷と分析対象損傷【昨年度報告】

No	損傷の状況	想定される損傷の要因	対象
1	リング継手面に発生した剥離 	トンネル施工中にジャッキ推力やシール材の反発力等の作用により発生した潜在的なひび割れが、供用（貯留）に伴い進展し剥離に至った	×
2	セグメント継手面に発生した剥離 	トンネル内への一時貯留に伴う内水圧の繰り返し作用（載荷-除荷の繰り返し）により継手面が変形し、局所的な剥離に至った	●
3	亀甲状のひび割れがトンネル内面の広範囲に発生 	・貯留と排水の繰り返しに伴うセグメント内面の乾燥収縮。 ・連結管からの流入水の衝撃力がセグメント内面に繰り返し作用。	×
4	継手ボックス等からの漏水 —	シール材の設置不良、継手金物周りの水みちからの漏水	×

数値解析方針

■ 目的

トンネル構造への影響を及ぼす可能性の高い、**深い剥離損傷を対象**とし、RCセグメントの剥離損傷メカニズムを確認する。

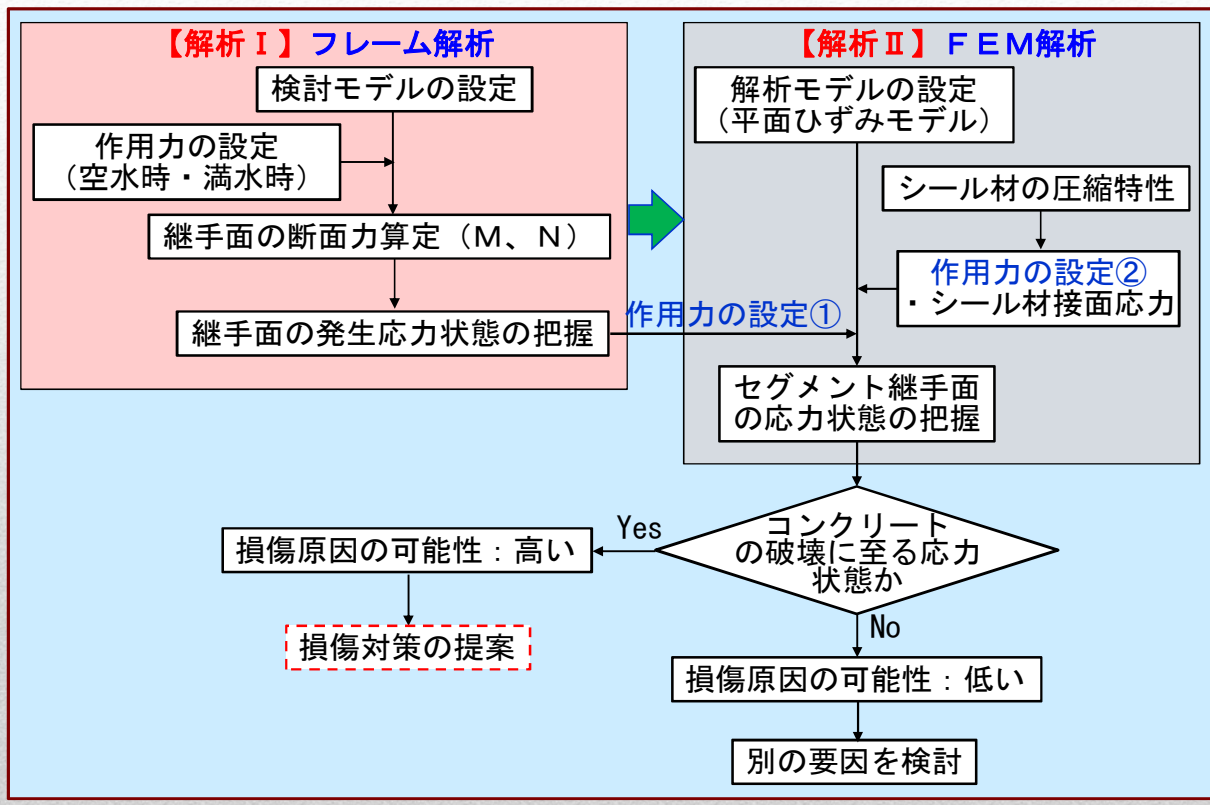
【解析Ⅰ】トンネル規模がトンネル断面の変形に与える影響の評価

- ・作用外力の履歴に対し、**トンネル規模の違いがトンネル断面方向の変形に与える影響**を、**フレーム解析**により確認する。

【解析Ⅱ】セグメントの剥離損傷に必要な作用荷重形態の評価

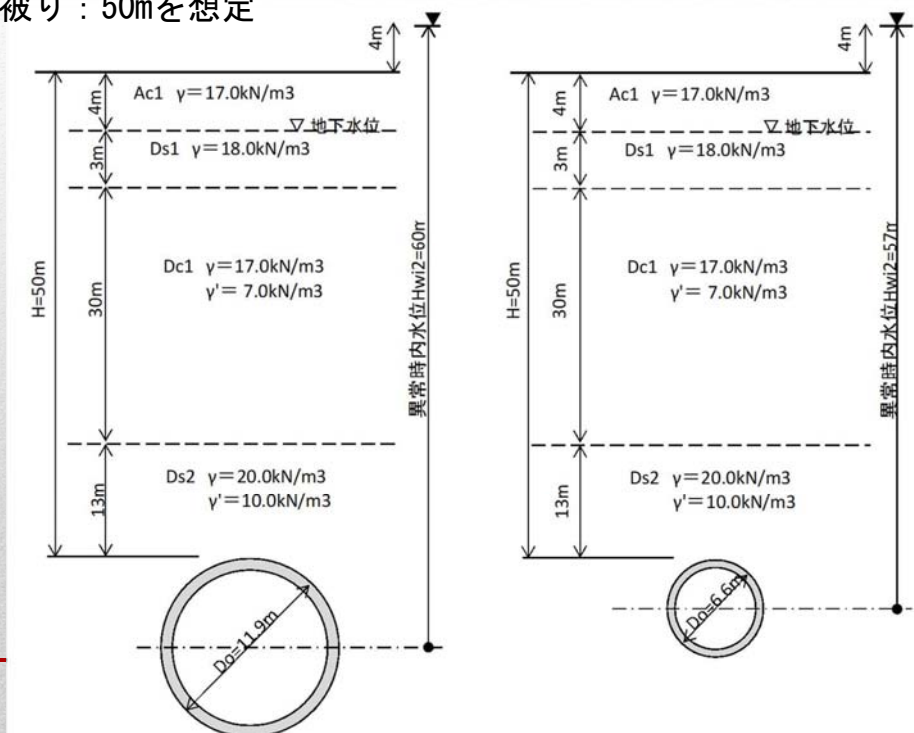
- ・作用外力の過程で発生するセグメント継手面の応力分布やシール材の膨張圧等を用いて、**二次元FEM解析**により**剥離損傷**の再現を試みる。

数値解析による原因究明アプローチ



フレーム解析：検討モデル

- ・トンネル規模：①大口径トンネル、②中口径トンネル
- ・土被り：50mを想定



フレーム解析:トンネル構造

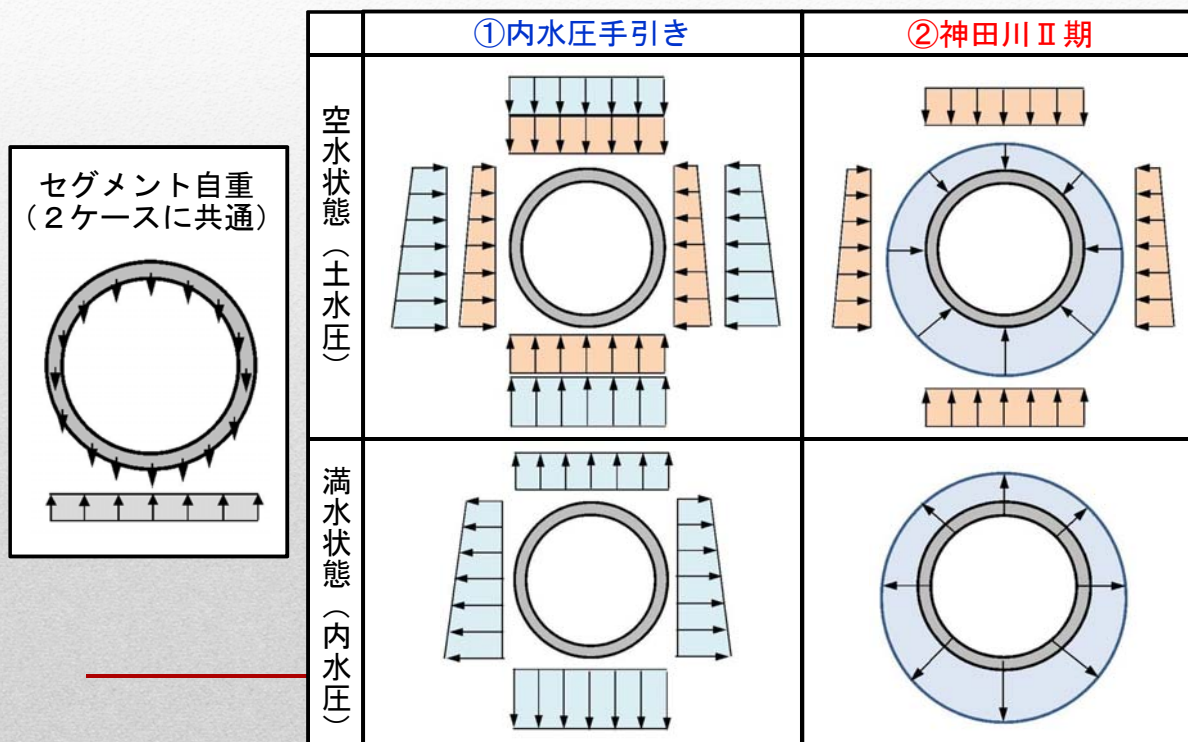
- トンネル構造諸元は、貯留型トンネルの事例を参考に設定

表 フレーム解析モデル条件

項 目		ケース		case1 大口徑	case2 中口径
トンネル諸元	トンネル内径	Di	(m)	10.6	6.0
	トンネル外径	Do	(m)	11.9	6.6
	セグメント厚さ	h	(m)	0.65	0.3
	幅	B	(m)	1.2	1.5
	分割数	n		等9	6(5+K)
	分割角度	θA	(deg)	40	68.571
		θB	(deg)	40	68.571
		θK	(deg)	40	17.143
	セグメント種別			RC	RC
	継手形式			高剛性継手	コーンコネクター
解析モデル	ボルト本数(継手角度)	α		36(10°)	21(11.5°)
	リング数	R	ring	3(0.5-1-0.5)	←
	要素分割数	n		288	126
	要素長		(m)	0.123	0.157
材料諸元	コンクリート設計基準強度	f'ck	(N/mm ²)	48	←
	許容圧縮応力度	σ_{ca}	(N/mm ²)	18	←
	鉄筋材質			SD345	←
	許容引張応力度		(N/mm ²)	200	←

フレーム解析:解析ケース

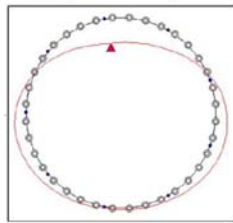
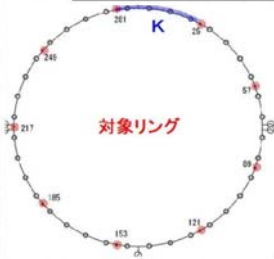
- 地下水圧と内水圧の作用形状を変化させた2ケースを実施



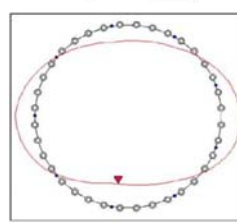
フレーム解析: 解析結果①大口径

- ・ 空水状態：軸力が支配的（全圧縮応力状態）
- ・ 満水状態（内水圧作用）：曲げモーメントが支配的（引張応力が発生）
- ・ スプリングライン付近の継手の圧縮応力 σ_c は、水圧の作用形状によらず内水圧の作用により増加する。

		【地下水圧・内水圧の作用: 内水圧手引き】				【地下水圧・内水圧の作用: 神田川Ⅱ期】			
		空水状態		満水状態		空水状態		満水状態	
継手部 発生応力	節点番号	σ_c N/mm ²	σ_t N/mm ²	σ_c N/mm ²	σ_t N/mm ²	σ_c N/mm ²	σ_t N/mm ²	σ_c N/mm ²	σ_t N/mm ²
	25	8.6	全圧縮	4.2	82.8	10.2	全圧縮	5.1	39.6
	57	10.1	全圧縮	13.7	217.8	9.7	全圧縮	5.5	全圧縮
	89	8.6	全圧縮	4.8	5.6	13.4	全圧縮	15.0	137.7
	121	9.1	全圧縮	4.0	30.8	10.6	全圧縮	5.4	37.4
	153	10.3	全圧縮	6.7	110.2	14.8	全圧縮	13.6	304.1
	185	7.0	全圧縮	1.4	全圧縮	9.8	全圧縮	4.9	全圧縮
	217	10.2	全圧縮	11.8	157.2	12.6	全圧縮	12.6	84.7
	249	7.7	全圧縮	5.4	43.7	8.1	全圧縮	1.7	全圧縮
	281	11.3	全圧縮	10.6	318.2	11.5	全圧縮	8.7	161.5
鉛直変形量 $\sigma_v = \sigma_{v1} + \sigma_{v2}$		13.10	→	12.94	(-0.16mm)	17.54	→	16.91	(-0.63mm)
水平変形量 $\sigma_h = \sigma_{h1} + \sigma_{h2}$		9.79	→	12.18	(2.39mm)	13.90	→	15.83	(1.92mm)



①内水圧手引き



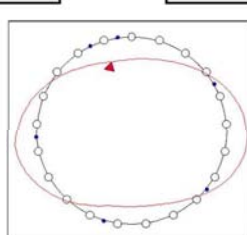
②神田川Ⅱ期

【凡例】
 黒字 : 正曲げ(外面側圧縮)
 赤字 : 負曲げ(内面側圧縮)
 赤字 : 空水状態から圧縮応力増加

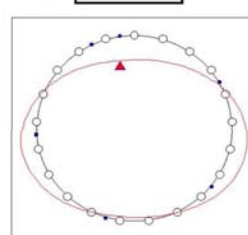
フレーム解析: 解析結果②中口径

- ・ 空水状態：軸力が支配的（全圧縮応力状態）
 - ・ 満水状態（内水圧作用）：曲げモーメントが支配的な状態に移行するも圧縮応力 σ_c の変動は小さく、大口径ほど顕著ではない。
- ⇒内水圧が作用しても、大口径のような圧縮応力の増加は確認できない。

		【地下水圧・内水圧の作用: 内水圧手引き】				【地下水圧・内水圧の作用: 神田川Ⅱ期】			
		空水状態		満水状態		空水状態		満水状態	
継手部 発生応力	節点番号	σ_c N/mm ²	σ_t N/mm ²	σ_c N/mm ²	σ_t N/mm ²	σ_c N/mm ²	σ_t N/mm ²	σ_c N/mm ²	σ_t N/mm ²
	29	6.9	全圧縮	1.4	全圧縮	6.4	全圧縮	2.8	62.6
	61	7.2	全圧縮	1.8	全圧縮	6.6	全圧縮	1.0	全圧縮
	93	8.3	全圧縮	7.5	131.2	7.6	全圧縮	3.3	10.7
	125	8.4	全圧縮	6.1	63.6	7.5	全圧縮	6.2	136.2
	157	6.7	全圧縮	1.2	全圧縮	6.4	全圧縮	1.0	全圧縮
鉛直変形量 $\sigma_v = \sigma_{v1} + \sigma_{v2}$		11.06	→	9.90	(-1.16mm)	8.37	→	7.22	(-1.16mm)
水平変形量 $\sigma_h = \sigma_{h1} + \sigma_{h2}$		8.38	→	9.54	(1.16mm)	5.91	→	7.07	(1.16mm)



①内水圧手引き



②神田川Ⅱ期

【凡例】
 黒字 : 正曲げ(外面側圧縮)
 赤字 : 負曲げ(内面側圧縮)
 赤字 : 空水状態から圧縮応力増加

フレイム解析：解析結果の考察

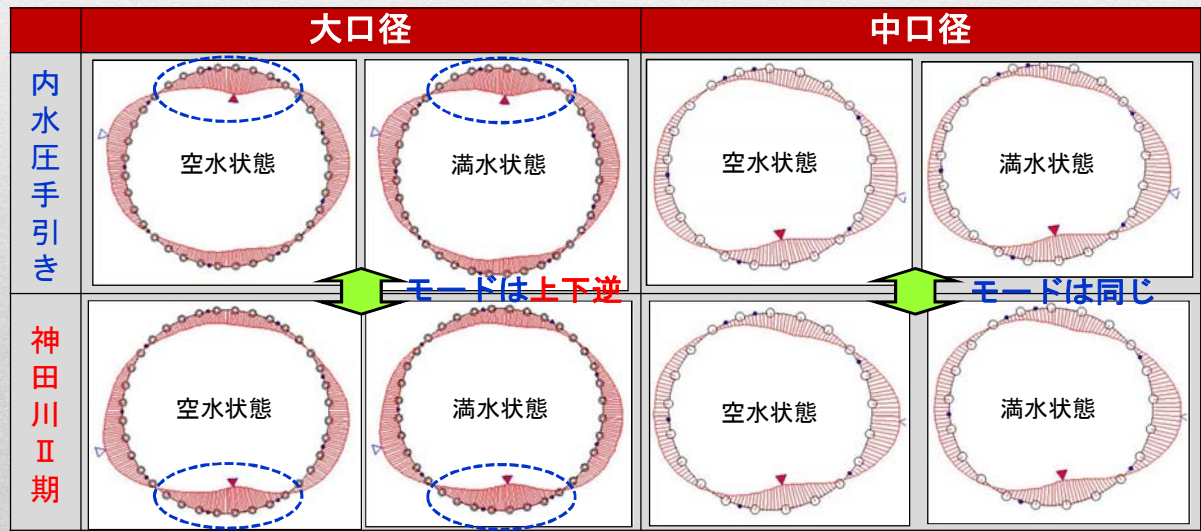
■セグメントリングの挙動（変位・変形）

大口径は、水圧の作用形状の違いにより上下逆のモードになるが、中口径は水圧の形状によらず同様の傾向を示す。

■継手面の応力状態

内水圧作用時の曲げ応力は大口径のほうが増加しやすい（ σ_c , σ_t ：大）

∴内水圧の作用がトンネルに及ぼす影響は、**大口径>>中口径**



FEM解析：解析条件

大口径トンネルを対象に、セグメント継手面の応力状態を再現した剥離損傷の可能性をFEMにより検討

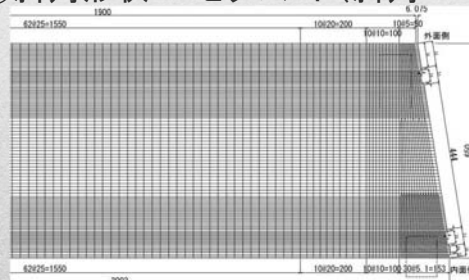
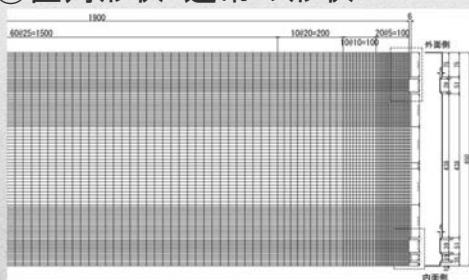
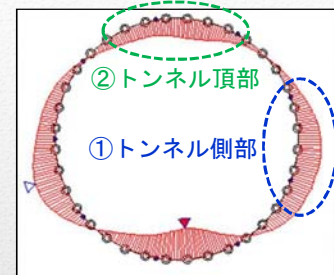
■解析パラメータ

(1) 損傷対象位置：2種類

- ①トンネル側部付近（負の曲げモーメント発生状態）
- ②トンネル頂部付近（正の曲げモーメント発生状態）

(2) 継手面の形状：2種類

- ①直角形状：通常形状
- ②斜角形状：Kセグメント（斜角 $\theta = 9^\circ$ ）



(3) 継手面の応力状態：2種類

- ①空水状態（土水圧作用）
- ②満水状態（内水圧作用：異常時内水位）

(4) シール材の作用力：圧縮特性を考慮した4種類

FEM解析：作用力

- ①継手面の発生応力
- ②シール材の膨張圧の組合せ

トンネル側部(負曲げ)

case1 空水状態	L	σ	σ_c	模式図
	mm	N/mm ²	N/mm ²	
	0		2.40	
	275	-105.84	7.06	
	535	-171.88	11.46	
	650	13.41	13.41	

case2 滴水状態 内水圧作用時	L	σ	σ_c	模式図
	mm	N/mm ²	N/mm ²	
	0	227.70		
	275	137.72		
	417.2		0	
	535	-114.07	7.60	
	650	15.03	15.03	

トンネル頂部(正曲げ)

case1 空水状態	L	σ	σ_c	模式図
	mm	N/mm ²	N/mm ²	
	0	11.483	11.48	
	275	-109.87	7.32	
	535	-50.90	3.39	
	650		1.65	

case2 滴水状態 内水圧作用時	L	σ	σ_c	模式図
	mm	N/mm ²	N/mm ²	
	0	8.75	8.75	
	239.8	0.00	0.00	
	275	19.26		
	535	161.50		
	650			

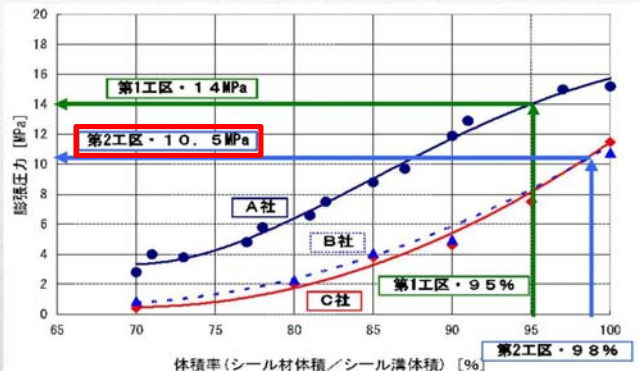


図-4 シール最大膨張圧(促進)試験結果

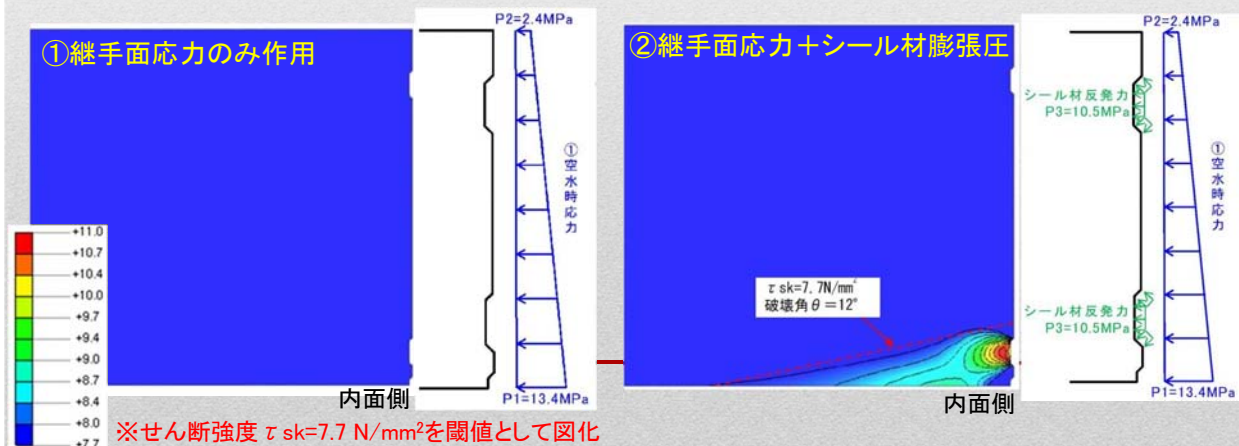
※) 高柳、山藤、佐々木、佐藤：内水圧が作用するセグメントの剥離現象の考察—外郭放水路第一工区トンネル・第二工区トンネル—、トンネルと地下、第37巻3号、pp53-59、2006. 3.

FEM解析：結果(1) トンネル側部①

- せん断強度 τ_{sk} を閾値として表示 : $\tau_{sk} = 0.58f_{ck}^{2/3} = 7.7 \text{ N/mm}^2$

①空水状態

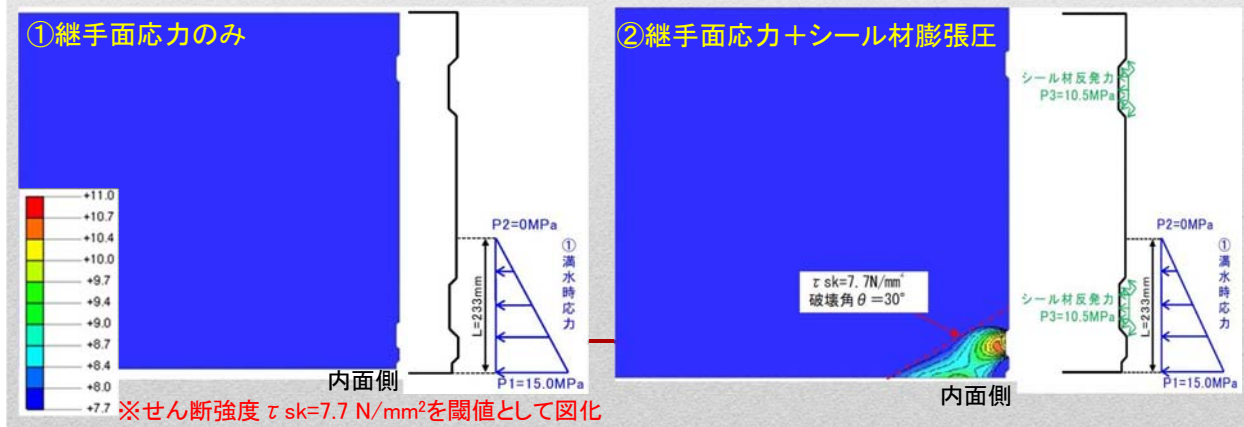
- フレーム解析により得られた継手面の応力分布を作用力とした場合、空水状態では剥離に至る応力は確認されない。
- 継手面の応力分布に加えてシール材の膨張圧力を考慮すると、内面側にせん断強度を超過する応力状態が確認される。
- せん断破壊面の角度は12°程度となり、損傷事例と概ね一致。



FEM解析：結果(1) トンネル側部②

②満水状態

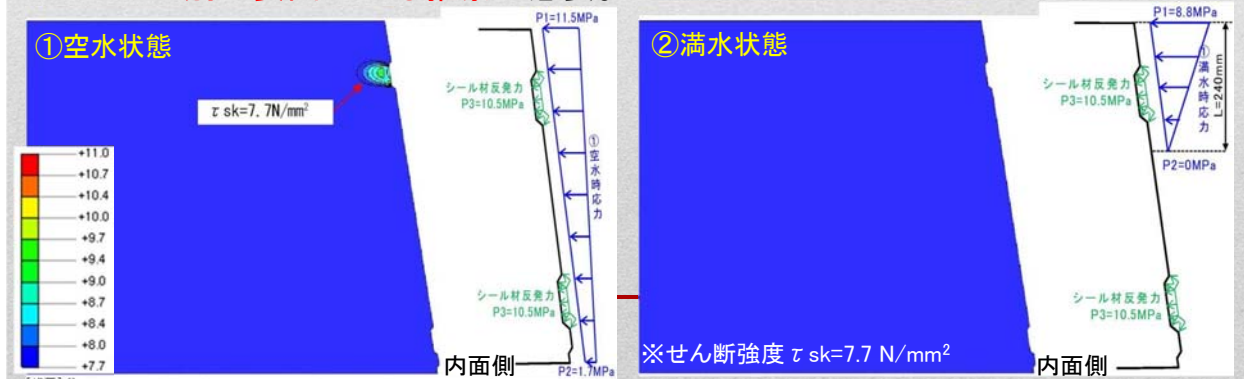
- ・ フレーム解析の継手面応力状態を作用力とした場合、満水状態においても剥離に至る応力状態は確認されない。
- ・ 継手面の応力分布に加えてシール材の膨張圧力を考慮すると、トンネル側部において内面が剥離に至る応力状態が確認される。
- ・ **せん断破壊面の角度は 30° 程度となり、損傷事例とは若干異なる。**
- ・ **シール材の膨張圧力を考慮すれば、設計荷重条件下においてトンネル側部の剥離現象を再現できる。**



FEM解析：結果(2) トンネル頂部①

- ・ 斜角形状モデルに対し、継手面の応力分布とシール材膨張圧を作用。
- ・ 継手面形状（直角vs斜角）の違いによる応力の差は、10%未満と小さい。
- ・ ①空水状態では、シール材の反発力を考慮すると外面側においてせん断強度を超過する応力状態が確認されるものの、その範囲は外面にまで達しておらず損傷には至らないと考えられる。
- ・ ②満水状態では、シール材の膨張圧力を考慮しても、内外面ともにせん断強度を超過する応力状態は認められない。
- ・ **シール材の膨張圧力を考慮しても、トンネル頂部付近で発生した剥離現象を再現できない。**

⇒ 別の要因による推察が必要。



FEM解析・考察

■トンネル側部

- ・土水圧や内水圧の作用に加えて**シール材の膨張圧力を考慮**すると、内面側にはせん断強度を超える応力が発生し、剥離損傷を再現できる。
- ⇒貯水時にシール材が吸水膨張すると、排水後（空水状態）に継手面の封入による反発力が増加し、発生応力は増加しやすくなる。

■トンネル頂部

- ・トンネル頂部は**正曲げの応力状態**にあるため、通常の荷重条件下において**シール材の膨張圧力を考慮してもトンネル内面側の剥離現象を再現できない。**
- ⇒**別の要因による推察**が必要。



■課題

- ・トンネル頂部付近の損傷原因は解析で立証できないため、他の要因を抽出する必要がある。

その他の損傷原因

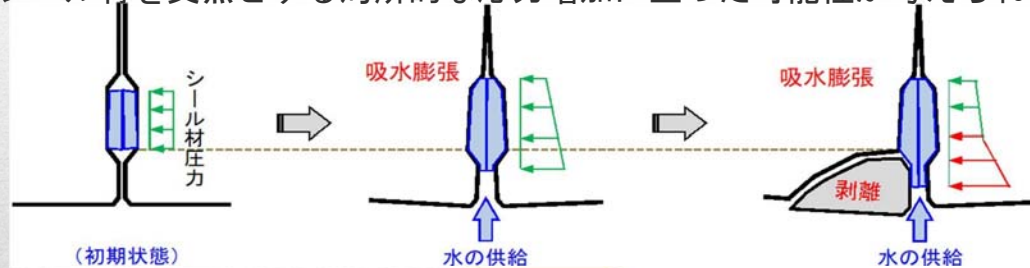
土水圧や内水圧等の作用力以外に、セグメントの損傷に影響を及ぼす可能性のあるものとして、例えば以下の要因が挙げられる。

表 想定されるその他の損傷要因

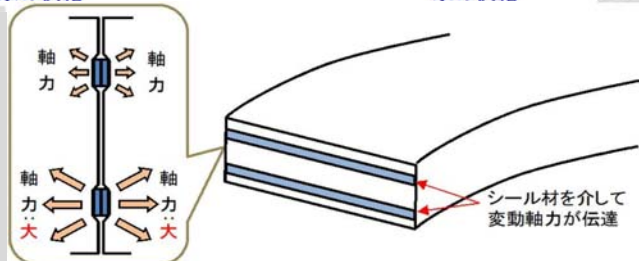
分 類	
シール材の影響	シール材膨張の影響
	シール材の膨張速度
	変動軸力がシール材を介して作用する場合の影響
シール溝の影響	シール溝の設置位置と形状
施工時の影響	セグメント組立ての影響
	曲線施工の影響

その他の損傷原因①:シール材の影響

- ・ 既往の研究において、シール材の**接面応力は時間の経過とともに長期間にわたり上昇し、膨張圧は水の供給側が高い**ことが報告されている。
- ・ フレーム解析結果より、大口径のトンネル頂部の継手応力は**満水時に内側引張となり内面側に目開きが起きる状態**となっている。
- ・ 貯水の度にシール材は吸水膨張し続け、**シール材がシール溝からはみ出してシール材を支点とする局所的な応力増加に至った可能性**が考えられる。



- ・ トンネル内が満水状態から空水状態となる過程で発生する**軸力の変動が、吸水膨張した内面側のシール材を支点として継手面に伝達**され、剥離損傷に至った可能性が考えられる。



この現象は頂部に限らず、すべての位置に生じる可能性がある。

その他の損傷原因②:施工時の影響

- ・ シールドトンネルの真円度の測定事例より、**曲線部区間ではトンネルの断面形状が縦型に変形**した事例が報告されている。
- ・ この場合、トンネル頂部付近ではトンネル内面側が**圧縮応力（負曲げ）の状態**となりやすく、縦型変形の状態では貯留・排水が繰り返されると、頂部付近の継手面で内面側が剥離損傷に至る可能性が考えられるが、その**根拠を明確に示すデータが乏しい**。
- ・ また、損傷が確認された曲線部では縦型変形や横型変形の有無に拘わらず、損傷が発生している例があることから、縦型変形が損傷の主要要因とは考えられない。

施工時の影響は損傷の一因となり得るが、主要要因とは考えられない。

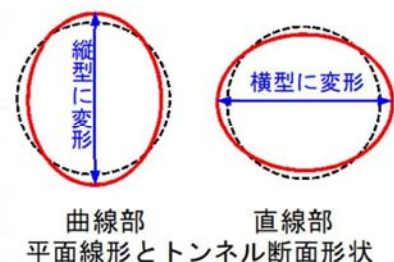
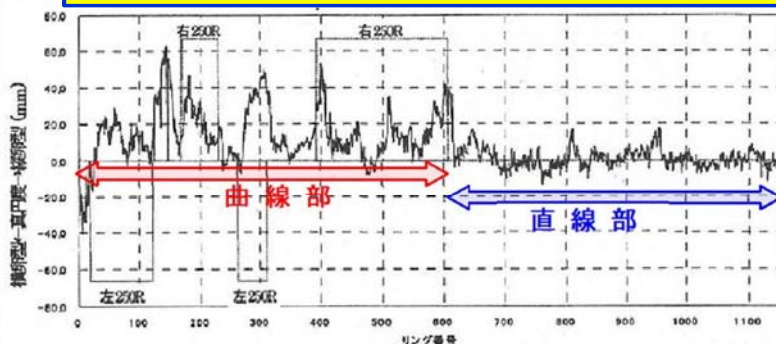


図-26 真円度測定結果一覧表

その他の損傷原因のまとめ

表 その他の要因によるトンネル内面損傷の可能性

分 類		損傷要因の可能性
シール材 の影響	シール材膨張の影響	貯留時のシール材の吸水膨張等によりシール溝からはみ出し、それを支点とする局所的な作用により、端部の損傷に至る可能性あり。 満水・空水の過程で発生する変動軸力が継手面全体ではなく内面側のシール材を介して局所的に作用し、端部の破壊に至る可能性あり。
	シール材の膨張速度	貯留時の内水供給によるシール材の膨張スピードが速く、その影響により損傷が早期に現われる可能性あり。
シール溝 の影響	シール溝の設置位置と形状	シール溝の位置がセグメント内面に近く、シール材体積率（＝シール材体積/シール溝体積）が大きいシール材の使用により損傷に至る可能性あり。
施工時 の影響	セグメント組立ての影響	損傷が確認された曲線部では縦型変形や横型変形の有無に拘わらず、損傷が発生している例があることから、縦型変形が損傷の主要要因とは考えられない。
	曲線施工の影響	

内水圧が作用する地下貯留トンネルの 力学挙動に関する調査・研究

損傷対策の提案

中央復建コンサルタンツ株式会社
井上裕司

損傷の状況と傾向

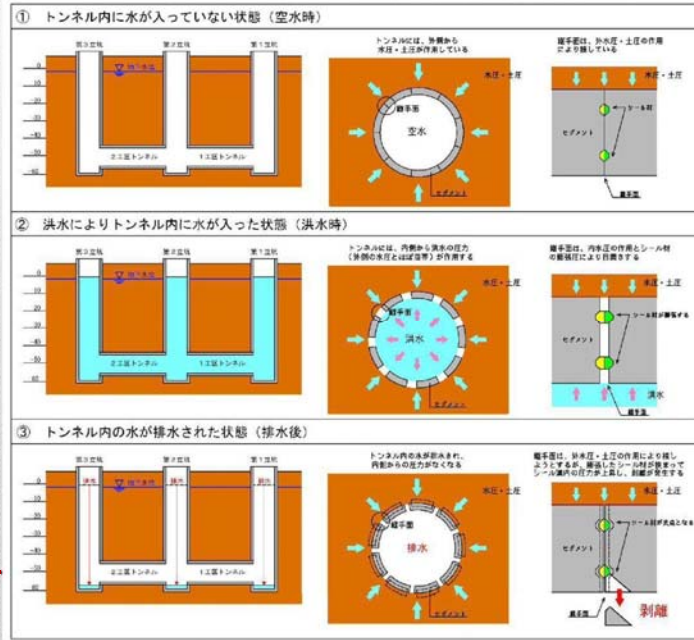
- セグメントの剥離損傷は内水圧が作用するシールドトンネル特有の損傷である。
- セグメントの剥離損傷が確認されている内水圧トンネルは、内径10m程度の大断面シールドトンネルのRCセグメントに限定されている。
- 同規模のトンネルでも工区によって剥離損傷の発生割合は大きく異なっている。



※上段：外郭放水路（左と中：第3工区、右：第2工区）、下段：環七地下調節池

過去に推定された損傷メカニズム

- セグメントの剥離損傷は、洪水時のトンネル内水位の上昇に伴ってセグメントの隙間に水が浸透して止水材が膨張し、その後膨張した止水材が支点となりトンネル軸力を受け持つためと推定された。

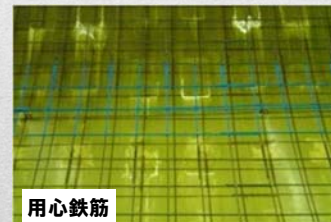


- シール材に至らない剥離損傷も生じたのはなぜか？
- 工区によって損傷の発生に大きく異なったのはなぜか？

出典：高柳他：内水圧が作用するセグメントの剥離現象の考察、トンネルと地下第37巻3号，pp53-59，2006

事後対策事例

- 外郭放水路では、供用開始直後からセグメントの剥離損傷が多発したため、供用後に二次覆工による事後対策を実施。



外郭放水路の現地調査における撮影写真。

- 内水圧が作用するシールドトンネルでは、セグメントに剥離損傷を生じさせないための事前対策（設計）が必要。

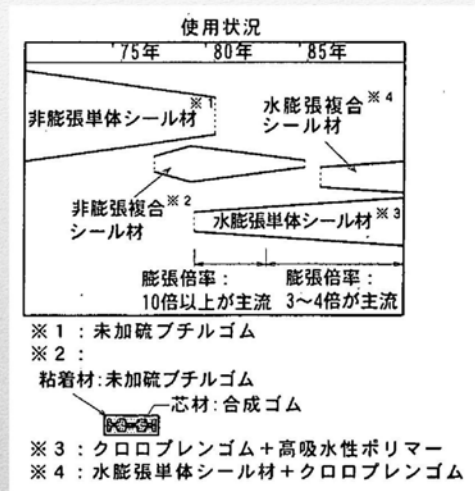
想定される損傷要因

- 本報告(報告書第3章)では、「止水材の性質」と「セグメントの構造」に対して、損傷を防止するための対策を整理する。

損傷の発生要因	解説	本報告対象
①過剰な内水圧	トンネルの内側に過剰な水圧(内水圧)が作用することにより、トンネルの形状が変化し、局部接触によりセグメントが損傷する。	×：次の「既往の管理運営方法の調査」にて報告する。
②トンネルの剛性	トンネル径が大きくなるとセグメント数の増加等により、トンネルの剛性が低下して変形し、局部接触によりセグメントが損傷する。	×：前の「損傷原因の分析」の対象とし、本報告の対象外とする。
③止水材の性質	膨張率の高い止水材や変形性能の小さい止水材を用いることにより、セグメントに局部的な力が作用してセグメントが損傷する。	○：損傷防止に必要な止水材の性質を整理する。
④セグメントの構造	セグメントの端部や止水材の位置に局部的な力が作用した時、コンクリートの内部にせん断応力に抵抗する鉄筋が配置されていないため、せん断応力に抵抗できずにセグメントが損傷する。	○：損傷防止に必要なRCセグメントの構造を整理する。
⑤施工時の損傷や初期不整	セグメントの搬送や組み立て等の施工時に、セグメントに軽微な損傷が生じる若しくはセグメント内部に初期応力が生じる等の原因によりセグメントが損傷する。	×：剥離損傷の主要要因とは言えないため、本報告の対象外とする。

止水材の種類

- セグメントの止水材は、非膨張シール材と水膨張シール材に大別されるが、近年はほぼ全て水膨張シール材が用いられている。
- 水膨張シール材は製品によって構造や性能が異なる。



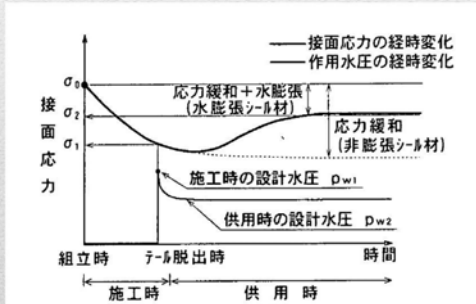
出典：大塚他：シールド工事に用いるセグメントの水膨張シール材による止水設計法について、土木学会論文集No. 651/VI-47, pp61-79, 2000



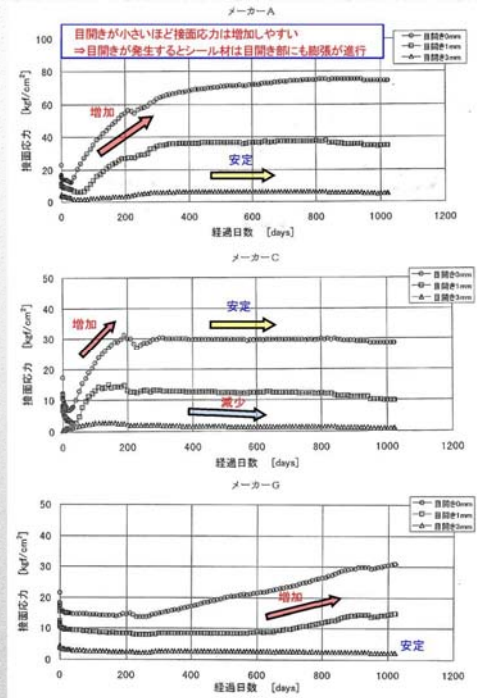
出典：王子ゴム化成株式会社：水膨張性義務シール材カタログ アクアケル (AQUAQUELL)

水膨張シール材の挙動

- 水膨張シール材の接面応力はテール脱出まで低下し、テール脱出後に水分供給による膨張により回復する。
- 水膨張シール材の接面応力の増加量や増加スピードは、メーカーによって異なる。



出典：大塚他：シールド工用セグメントの水膨張シール材による止水設計法について、土木学会論文集No. 651/VI-47, pp61-79, 2000



出典：社団法人日本トンネル技術協会：セグメントシール材による止水設計手引き（東京電力株式会社委託），pp.177-178, 1997.1.

損傷防止対策(シール材の膨張圧)

シール材の膨張圧と剥離損傷

工区	第1工区		第2工区	第3工区	
シールメーカー	A社	B社	B、C、D社	A社	B、C、E社
シール膨張圧 (N/mm ²)	14.0	8.5	10.5	14.0	10.5
剥離損傷	少	無	多	無又は少	無又は少

※国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所提供資料を基に作成。



- 膨張圧8.5N/mm²のシール材を使用した区間ではセグメントの剥離損傷が発生していない。
- 第2工区では膨張圧10.5N/mm²でも損傷が多かったが、第1工区では膨張圧14.0N/mm²でも損傷が無又は少である。

損傷防止対策(シール材の体積率)

シール材の体積率と剥離損傷

工区	第1工区	第2工区	第3工区
シールメーカー	A、B社	B、C、D社	A、B、C、E社
体積率	95%	97%	92%
剥離損傷	無又は少	多	無又は少

※国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所提供資料を基に作成。

※体積率は、シール断面積÷溝断面積。



- 体積率95%以下の第1工区と第3工区は剥離損傷が無又は少である。
- 体積率97%の第2工区は剥離損傷が多い。

損傷防止対策(セグメントのシール溝縁端距離)

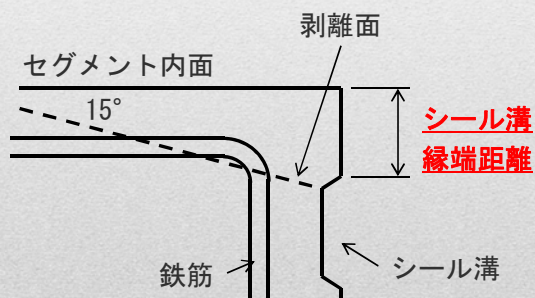
セグメントのシール溝縁端距離と剥離損傷

工区	第1工区	第2工区	第3工区
シール溝縁端距離	58mm	35mm	63mm
剥離損傷	無又は少	多	無又は少

※国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所提供資料を基に作成。



- シール溝縁端距離が約60mmの第1工区と第3工区は剥離損傷が無又は少である。
- シール溝縁端距離が約35mmの第2工区は剥離損傷が多い。



損傷防止対策(セグメントの鉄筋かぶり厚)

セグメントの鉄筋かぶり厚と剥離損傷

工区	第1工区	第2工区	第3工区
鉄筋かぶり厚	54mm	59mm	55mm(想定)
剥離損傷	無又は少	多	無又は少

※国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所提供資料を基に作成。



- セグメントの鉄筋かぶり厚が約55mmの第1工区と第3工区は剥離損傷が無又は少である。
- セグメントの鉄筋かぶり厚が約60mmの第2工区は剥離損傷が多い。



損傷防止対策のまとめ

止水材によるセグメント剥離損傷の防止対策

(シール材の膨張圧)

- 膨張圧が 8.5N/mm^2 以下のシール材を用いた区間ではセグメントの剥離損傷が発生していなかったことから、セグメントの剥離損傷を防止するためにはシール材の膨張圧を 8.5N/mm^2 以下に抑えることが望ましい。

(シール材の体積率)

- シール材の体積率がセグメントの剥離損傷に与える影響は小さいと想定されるが、セグメントの剥離損傷を抑制するためにはシール材の体積率を95%未満に抑えることが望ましい。

損傷防止対策のまとめ

構造によるセグメント剥離損傷の防止対策

(セグメントのシール溝縁端距離)

- シール溝縁端距離はセグメントの剥離損傷に与える影響が大きく、セグメントの剥離損傷を防止するためにはシール溝縁端からの剥離面と鉄筋が交差するように配筋することが重要と想定され、このように鉄筋を配置するためにはシール溝縁端距離を60mm以上確保することが望ましい。

(セグメントの鉄筋かぶり厚)

- 内水圧トンネルでは耐久性を確保するために一定の鉄筋かぶりが必要となるが、シール溝縁端からの剥離面と鉄筋が交差するような配筋にするため、鉄筋かぶり厚がシール溝縁端距離より大きくなることは避ける必要がある。

内水圧が作用する地下貯留トンネル の力学挙動に関する調査・研究

管理運営方法の提言

中央復建コンサルタント株式会社
山本和広

施設調査結果その1 (施設諸元)

調査年	施設名 事業者	供用開始年	区分	貯留方式	内径 (m)	土被り (m)	標準部 セグメント	セグメント 厚さ (mm)	二次覆工 の有無
2017	神田川・環状七号 地下調節池 東京都建設局	I 期 H9年	河川	完全貯留	12.5	34～43	コンクリート 合成	600	無し
		II 期 H17年						350	
	首都圏外郭放水路 国土交通省関東地方整備局	1工区 H18年	河川	流下型貯留	10.6	50	コンクリート	600	無し
		2工区						650	
		3工区						600	
	寝屋川北部地下河川 大阪府寝屋川水系改修工営所	古川 調節池 H15年	河川	完全貯留 (暫定運用 時)	7.5	30～40	合成	370	無し
		北島 調節池 H22年			5.4			250	
2018	北浜逢坂貯留管 大阪市建設局	西天満 ～逢坂 H27年	下水道合 流雨水	完全貯留	6	40～50	コンクリート	300	無し
	施設 A	H13年	下水道分 流雨水	完全貯留	3～9	10～30	コンクリート	275～625	無し
	施設 B	H13年	下水道合 流雨水	完全貯留	8	30～40	コンクリート	300	あり
	施設 C	H20年	下水道合 流雨水	流下型貯留	6	5～20	コンクリート	300	あり
	施設 D	H16年	河川	完全貯留	10	50～100	コンクリート	550	無し
	施設 E	H24年	下水道分 流雨水	完全貯留	3	20～30	コンクリート	250	あり
	施設 F	H24年	下水道分 流雨水	流下型貯留	3～5	10～30	コンクリート	250	あり

施設調査結果その2 (運用、損傷の有無、点検、コメント)

調査年	施設名 事業者	制限水位	損傷の有無	点検方法	点検頻度	将来の対応方法、 改善すべき事項など
2017	神田川・環状七号 地下調節池 東京都建設局	I 期	有り(多数)	目視	5年に1回	ポンプ等機器の更新
		II 期	無し			
	首都圏外郭放水路 国土交通省関東地方整備局	1工区	有り(約140箇所)	目視	年数回	排水ポンプ運転の燃料 費が高価
		2工区	有り(約7000箇所)			
		3工区	有り(数不明)			
	寝屋川北部地下河川 大阪府寝屋川水系改修工営所	古川 調節池	無し	目視	5年に1回	立坑へのエレベータ等 の設置、老朽化対策
		北島 調節池	無し			
	北浜逢坂貯留管 大阪市建設局	西天満 ～逢坂	無し (点検は供用開始 後)	今後検討	供用開始 後1回のみ	維持管理時の堆積物の 除去方法
2018	施設 A	管頂	無し	目視	不定期	未定
	施設 B	管頂	無し	目視	2回/年	—
	施設 C	立坑の地 表面	無し	目視	5年に1回	現在は問題なく運用
	施設 D	管頂	有り	目視	供用開始 後1回のみ	設備の長寿命化計画に 基づいた整備・更新
	施設 E	管頂	無し	未実施	—	排水P点検時に、管渠 の破損や土砂堆積なし
	施設 F	管頂	不明	今後検討	—	比較的新しいため点検 未実施

調査結果: 損傷が発生している施設の特徴

- ・損傷が発生している施設は、調査対象10箇所のうち、**3箇所**(「神田川 I 期」、「外郭放水路」、「施設D」)。
- ・損傷施設は、全て**内径10m以上のコンクリートセグメント(二次覆工なし)**で、供用開始が平成18年以前。
- ・設計内水位は「神田川 I 期」と「施設D」は地表面、「外郭放水路」は地表面+4 m。「神田川 I 期」と「外郭放水路」は設計内水位で運用。
- ・「外郭放水路」は損傷確認後、無筋の二次覆工コンクリート打設。
- ・「神田川 I 期」は損傷確認後、制限水位を管頂で運用。損傷は進行していない模様。
- ・「施設D」の制限水位は管頂であるが、制御方法は未確認。

損傷発生施設の共通事項は、内径10 m以上、コンクリートセグメント使用、地表面またはそれ以上を設計内水圧としている点である。

調査結果：管理方法

- 調査した施設で、内径10m未満のコンクリートセグメント二次覆工なしは2施設であるが、「北浜逢阪貯留管」は比較的新しく点検も1回のみ実施。また、「施設A」は点検頻度が不定期で回数は不明。
- 定期的に点検を行っている施設は、調査対象10箇所のうち5箇所。
- 現地調査・ヒアリングから、堆積物を容易に除去できないことや、換気・照明などの安全対策設備や点検者・機器の搬出入施設の整備が不十分なことから、維持管理・点検が簡単には実施できない施設も見られた。
- また、維持管理・点検の実施や維持管理施設を整備するために要する費用(予算)の確保が困難であるとの意見もあった。

考察

- 損傷が発生していないと回答されている内径10m未満のコンクリートセグメント二次覆工なしの2施設のうち1施設は、比較的新しく点検も1回のみしか実施されていない。もう1施設は、点検頻度が不定期で回数が不明である。
- これらの施設は、**今後損傷が発生する、あるいは発生している可能性は0では無い**ため、点検が必要と考えられる。

管理運営方法の提言(1/3)

＜施設の運用方法(水位管理)＞

- 設計時に、地表面までの水位(異常時水位)による内水圧を考慮してあっても損傷している施設があることから、施設運用時の管理水位の設定に留意することがフェールセーフになる。
- 内水圧負荷による軸力減が損傷の引き金になると想定されることから、可能であれば管理水位を管頂程度までとする。
- 上記により立坑内の貯留量が減るが、総貯留容量に占める立坑貯留量は小さく、貯留機能への影響はほとんどないと考えられる。

＜参考:設計時のセグメント種別の選定について＞

- 損傷が発生している3箇所は、全て内径10m以上のコンクリートセグメント(二次覆工なし)であるが、施工コストのメリットや、スチール系部材の腐食など耐久性を考慮すると、二次覆工や合成セグメントの採用により全てが解決するものではない。

管理運営方法の提言(2/3)

＜維持管理施設の整備＞

- 適切な維持管理施設の配置を施設設計時から考慮することが、効率的な維持管理や点検が可能となる。
◆課題:維持管理施設設置や維持管理の費用(予算)確保
- 大口径トンネルでは、損傷事例からトンネル頂部や側部の点検が可能となる様に配慮する必要がある。
◆リフト付き点検用車両がトンネル内に搬出入可能、通行可能な施設の整備、維持管理作業に必要な換気・照明設備の整備など。

管理運営方法の提言(3/3)

＜点検の必要性＞

法令でも点検の必要性が謳われている。

(例)

下水道法施行令(昭和三十四年政令第百四十七号)

第五条の十二

二 公共下水道等の点検は、公共下水道等の構造等を勘案して、適切な時期に、目視その他適切な方法により行うこと。



管理運営方法の提言(3/3) つづき

＜点検の重要性＞

施設は損傷しない様な設計が実施されていることが前提であるが、想定外の作用などにより損傷が起こっており、損傷を放置すると重大な事故に繋がることになる。

- 高内水圧が作用する貯留管では、剥離、剥落などの損傷が発生する可能性が高くなるため、内水圧が小さい下水道幹線や水路トンネルなどに増して、適切な計画に基づいた点検が必要である。

⇒・通常の施設点検より、点検頻度増や、調査・点検の追加。

(追加調査・点検の例)

- ①供用開始時(竣工時)における施工時補修状況等の調査
- ②初期貯留後調査(初期不良調査)

※対策の緊急性の判断には、損傷発生時期などの記録が必要

- ・剥離、剥落など内水圧の作用による損傷を対象とした点検項目の追加。

- ・点検による小さな損傷の早期発見により対策を行うことで、致命的な損傷を未然に防ぐことができる。(対策費用の最小化)

20190525 土木学会関西支部年次学術講演会ワークショップ

内水圧が作用するシールド管渠の力学挙動に関する考察

大阪市立大学客員教授 東田 淳 / アサノ大成基礎設計 島津多賀夫

□「梁ばねモデルによる設計法」と問題点

- 内圧トンネル設計手引き (1999 先端建設技術センター)
- 鉄道総研法 (1999, 2001, 2002 鉄道総合技術研究所)
- 神田川Ⅱ期設計基準 (2000 土木施工41巻6号 鉄道総研法を準用)

(東田報告)

□「弾性FEMによる設計法」と問題点

□両設計法のコラボレーションのアイディア

□コラボ解析の手法

□コラボ解析による首都圏外郭放水路の挙動予測

(島津報告)

□コラボ解析の結果に基づくセグメント損傷の原因推定

1

梁ばねモデルによる設計法

内圧トンネル設計手引きの問題点

- ・設計土圧を**管渠の変形と無関係**に与えている
- ・相互作用を**ばね反力**で考慮している
- ・土圧、外水圧、内水圧、自重反力を**鉛直・水平成分**で与えている
→管面にせん断土圧発生**≠実際の滑動条件**
- ・内水圧変動による軸力変動を考慮していない
→**実際は軸力変動によって継手剛性が変化**

鉄道総研法

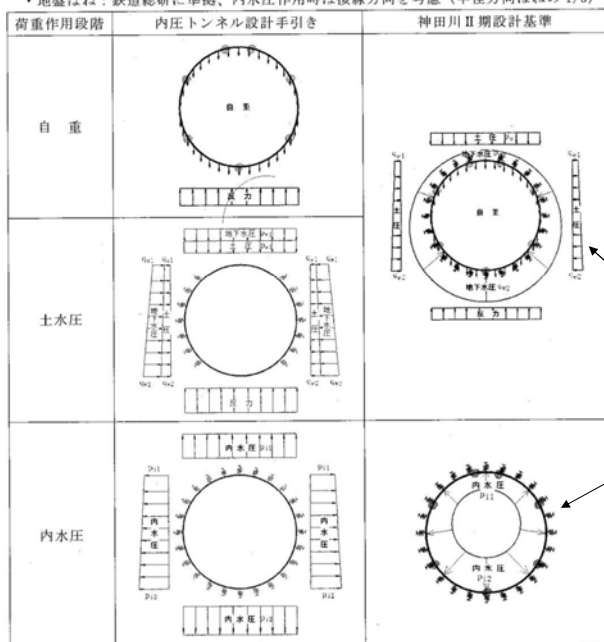
- ・外水圧を法線方向で与える ○
- ・自重反力を地盤ばねで受ける ×(後述)
- ・セグメント回転ばねの軸力依存性を考慮
→**軸力によって継手剛性を変化** ○

神田川設計基準 (鉄道総研法+内水圧)

- ・**内水圧载荷に伴う軸力変動**によって回転ばねの剛性を変化○

【参考】神田川地下調整池Ⅱ期⁹⁾

- ・セグメント継手回転ばね定数：非線形（バイリニア）。
- 軸引張力が作用する場合は、軸引張ばねを考慮
- ・リング継手せん断ばね定数：線形（鉄道総研に準拠）
- ・地盤ばね：鉄道総研に準拠、内水圧作用時は接線方向を考慮（半径方向ばねの1/3）



総研法

+

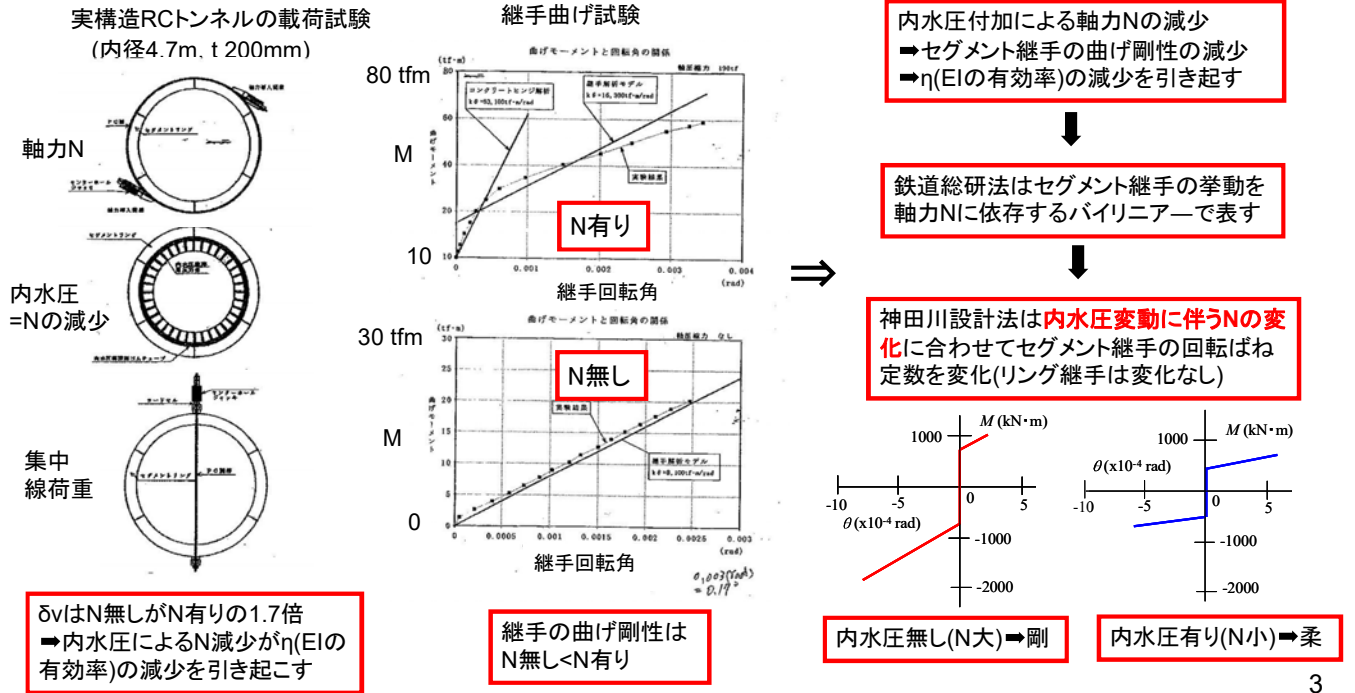
内水圧

II

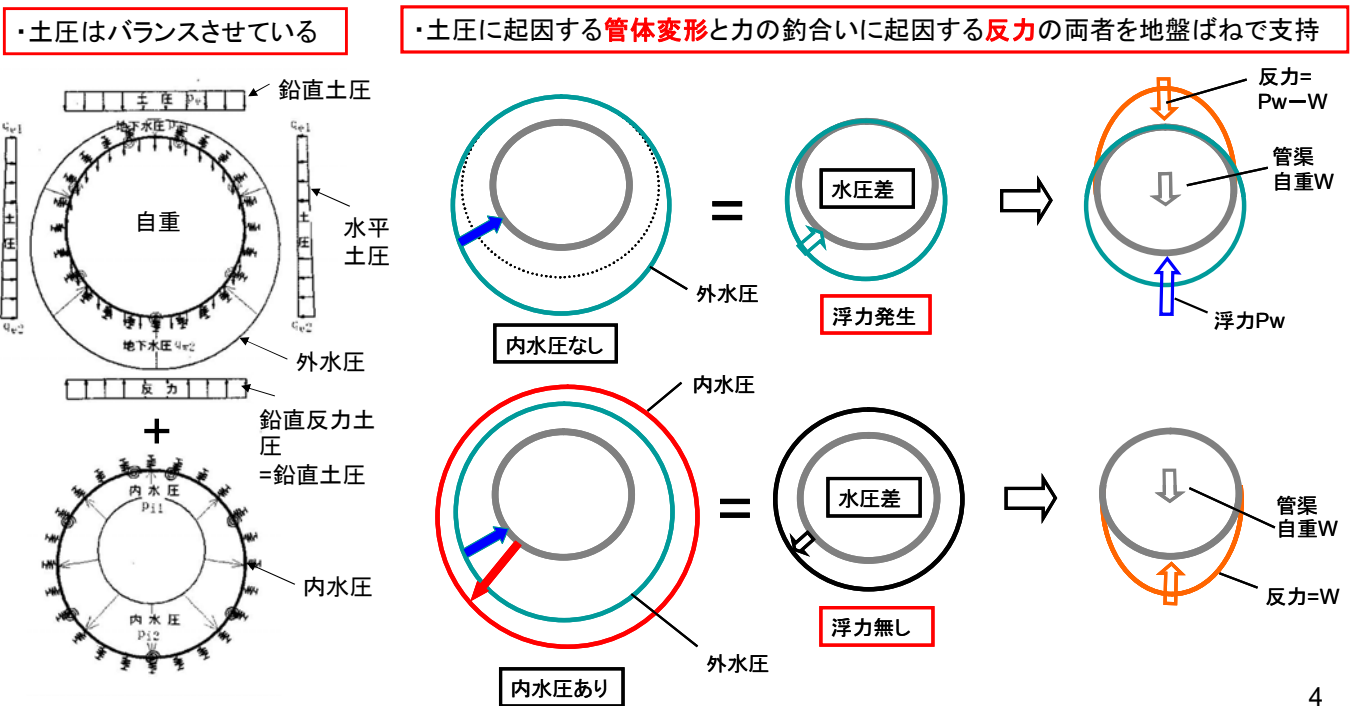
神田川
設計基準

2

内水圧トンネル設計手引きの載荷実験と継手ばね定数の設定方法



神田川設計基準(鉄道総研法+内水圧)



現行設計法(神田川設計基準)の問題点

- 設計土圧を経験的に決定
 - ゆるみ土圧、側方土圧係数 λ 、地盤反力係数(ばね定数) k を経験的に決定
 - 管渠が変形しても設計土圧を変えない⇒ **実際は土と構造物の相互作用により管渠の変形と土圧は連動して変化**
- 剛体変位をばねで支持
 - 設計土圧をバランスさせ、管渠の変形と反力をばねで支持
 - **管渠が純粋せん断変形する時のMuir解から決定した k を、管渠の変形だけでなく、不平衡力(反力=管渠自重と浮力)によって生じる剛体変位に対しても適用**
- 管渠面の開口の扱い方(管渠の変形が内側の範囲はばね無しとする)
 - ばね無しなら開口するはずだが、設計土圧はゼロとしない
- 内水圧が働く場合のせん断ばねの設定
 - 裏込めの完全硬化を考慮してせん断ばね(垂直ばね $\times 1/3$)を考慮
 - **実際の管面の境界条件は滑動条件にごく近い**

5

大阪市大グループによるこれまでの研究の流れ

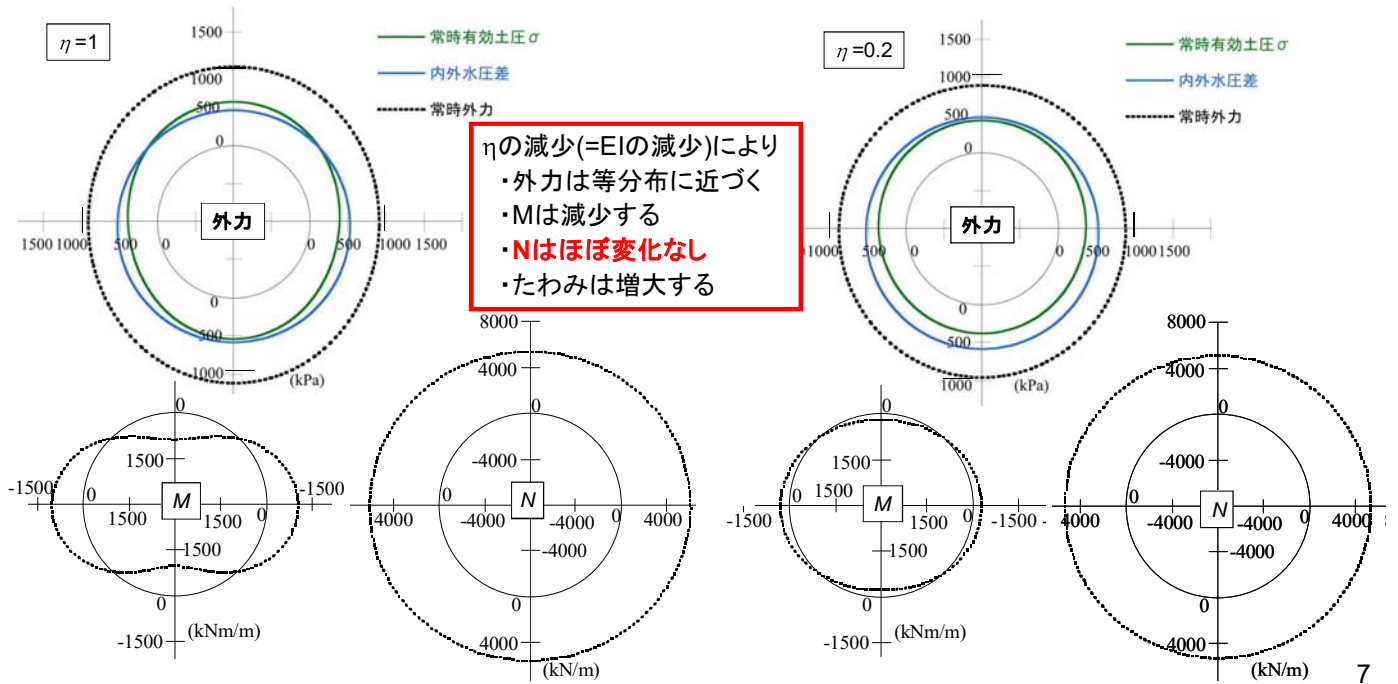
- 弾性FEMによる埋設管渠の設計法を提案
 - 埋設管渠の土圧と変形は、**土と構造物の相互作用**として決まり、**管面の境界条件(滑動)、地盤側方の境界条件(埋設方式によって変化)、管渠と地盤の相対剛性によって支配される**ことを多数の遠心実験により検証
 - 弾性FEMによる解析手法の妥当性を遠心実験との照合により検証
 - 提案設計法は土と構造物の相互作用を正當に評価することを確認
- 提案設計法によってシールド管渠の設計予測を実施
 - 下水道耐震設計例の事例では、RCセグメントが常時で終局強度を超える結果となり、継手を有するセグメント構造を扱えないことが判明

今回提案する手法

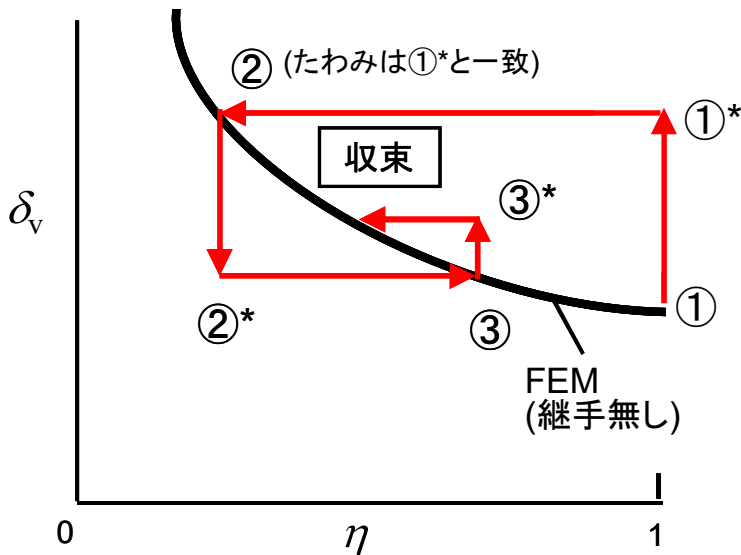
- 提案設計法と梁ばねモデルのコラボレーション
 - 提案設計法により土圧を、梁ばねモデルによりセグメント構造をシミュレートするコラボレーションの手法を思考実験により考案

6

η を変えた時のFEM解析結果(継手無し・内水圧無しの場合)

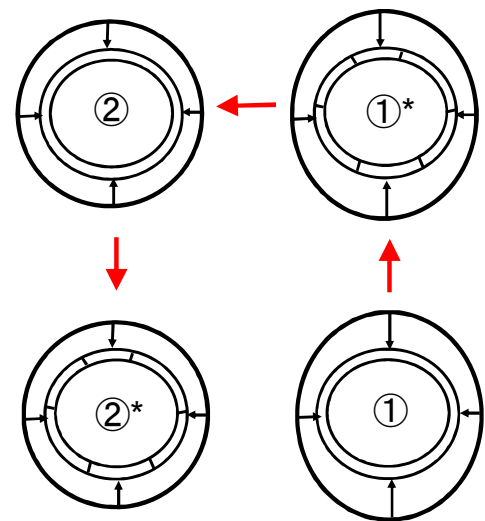


コラボの思考実験



- 数字の★無し: FEM計算の結果
- 数字の★付き: FEMで得られた土圧と水圧を与えた時の梁ばね計算の結果

①よりも**均等土圧に近づく**が、 η 小によりたわみ大となる。



Nは①*とほぼ同じなので、継手の剛性は①*とあまり変わらない。①よりも土圧均等のため、たわみ小となる。

コラボ解析の対象計算ケース

＜外郭放水路第2工区＞

シールド寸法

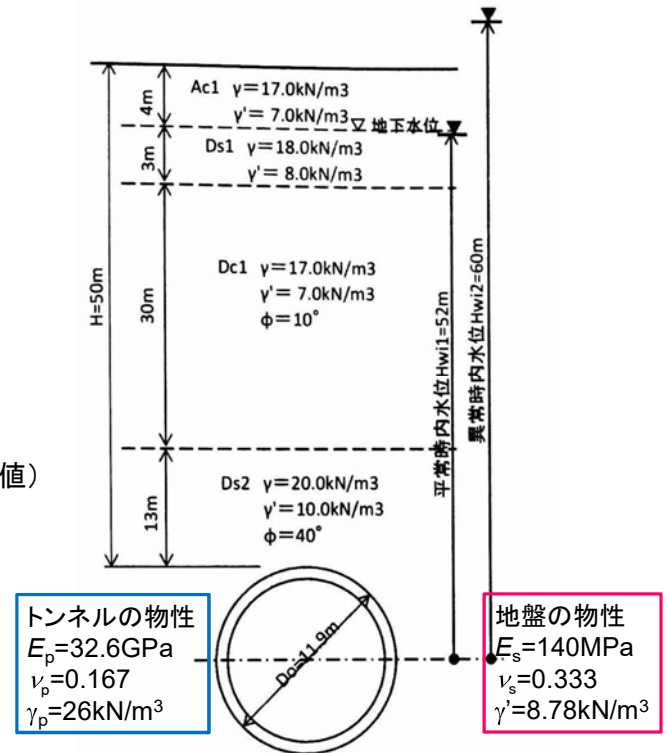
- ・シールド外径 = 11.9m
- ・管厚 = 0.65m

埋設条件

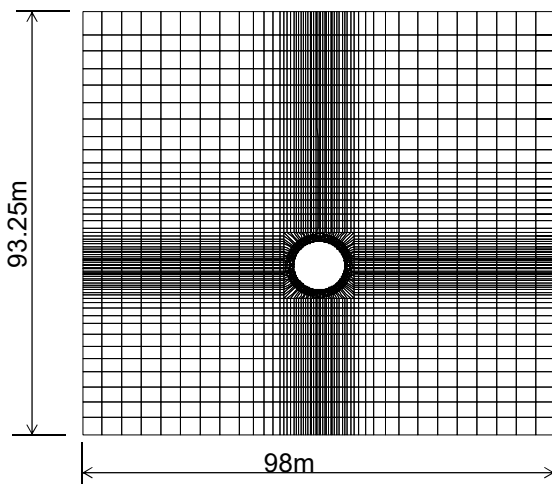
- ・ $H = 50\text{m}$
- ・ $\gamma' = 8.78\text{kN/m}^3$
(均一地盤におきかえ管側までの有効重量の平均値)
- ・ $E_s = 140\text{MPa}$ ($N=50$ として、 $E_s=2800N$)
- ・ $\nu_s = 1/3$

水位

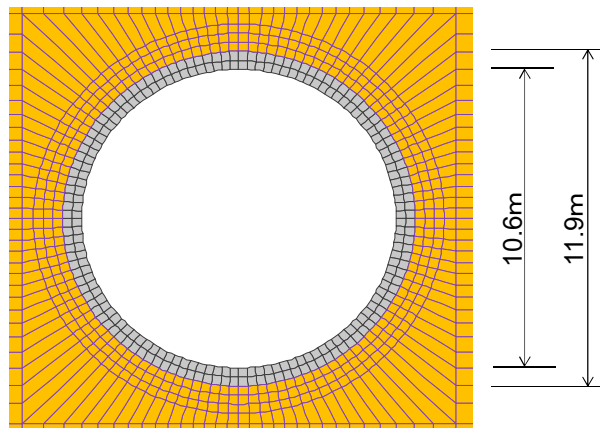
- ・地下水位 = GL-4.00m
- ・内水位 = なしと異常時 (GL+4.05m)



コラボ解析のFEMモデル



(a) FEメッシュ全体



管と地盤の間にはジョイント要素を設置
 管面完全スリップ状態: $k_n=100\text{MPa}$, $k_s=0$

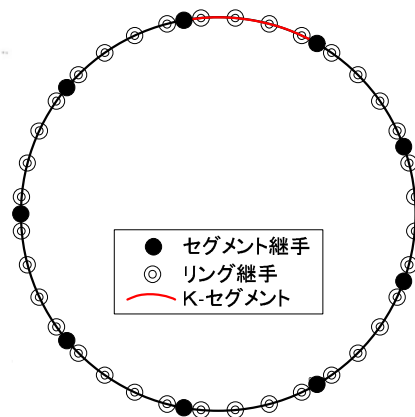
(b) 管周辺のメッシュ拡大図

- ・外水位・内水位による水圧は、管の外表面・内面に分布荷重として作用させた

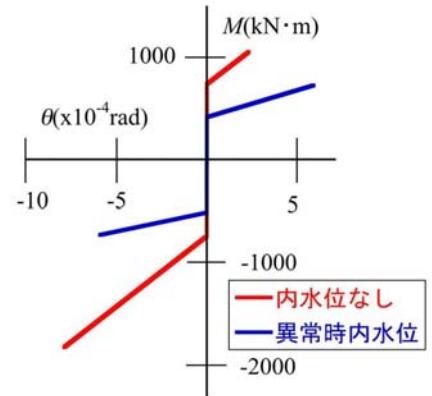
コラボ解析の梁ばねモデル



(a) 構造モデル



(b) 継手位置

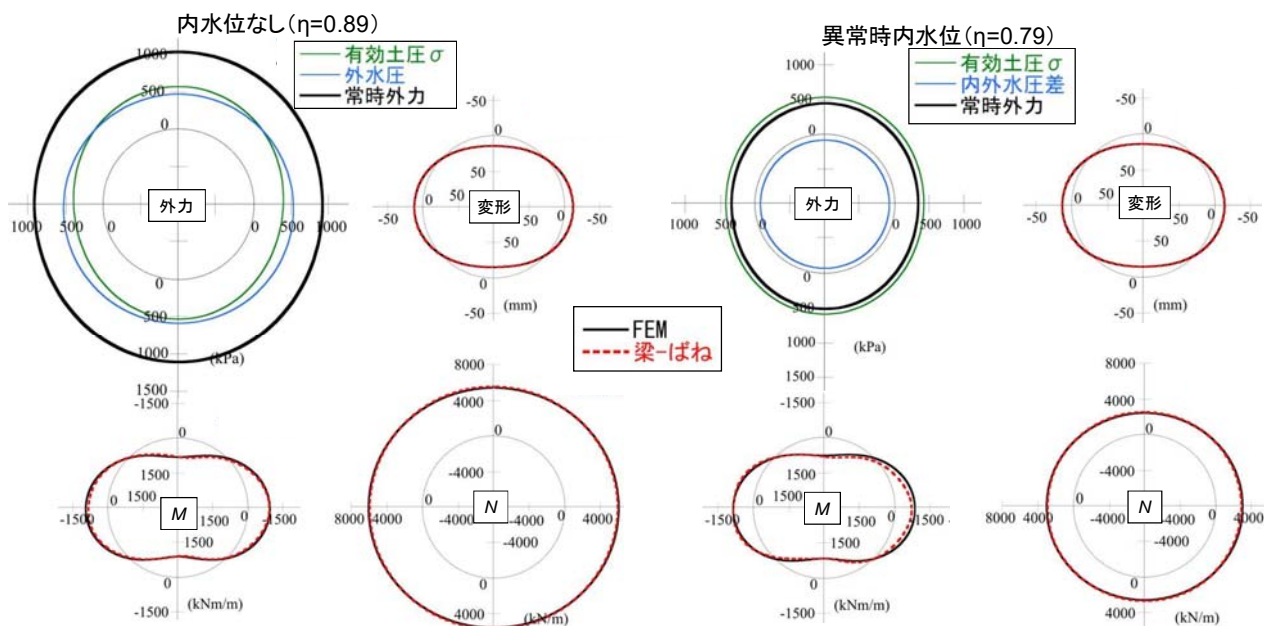


(c) セグメント継手回転ばね

(d) リング継手せん断ばね
 $k_s=100\text{MN/m}$

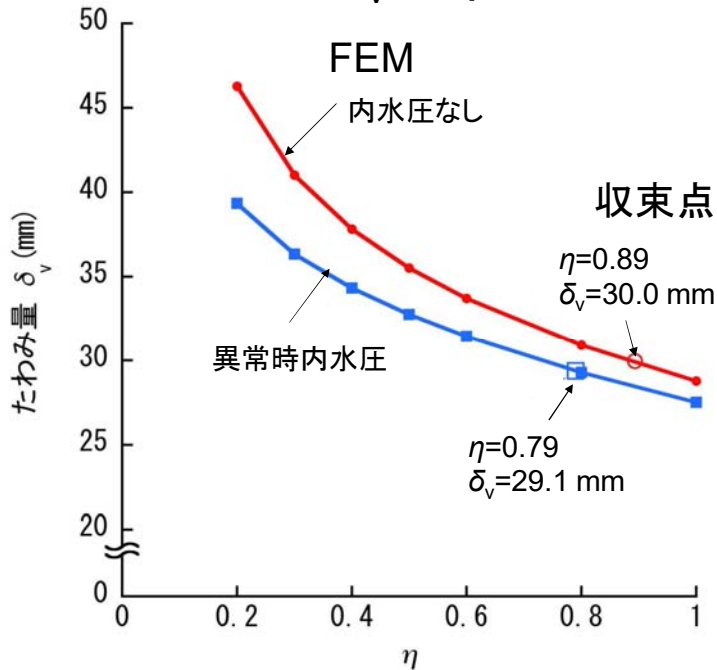
- ・セグメント継手の回転ばねは軸力依存
- ・自重、土圧、外水圧、内水圧は一括載荷

収束時における両モデルの解析結果



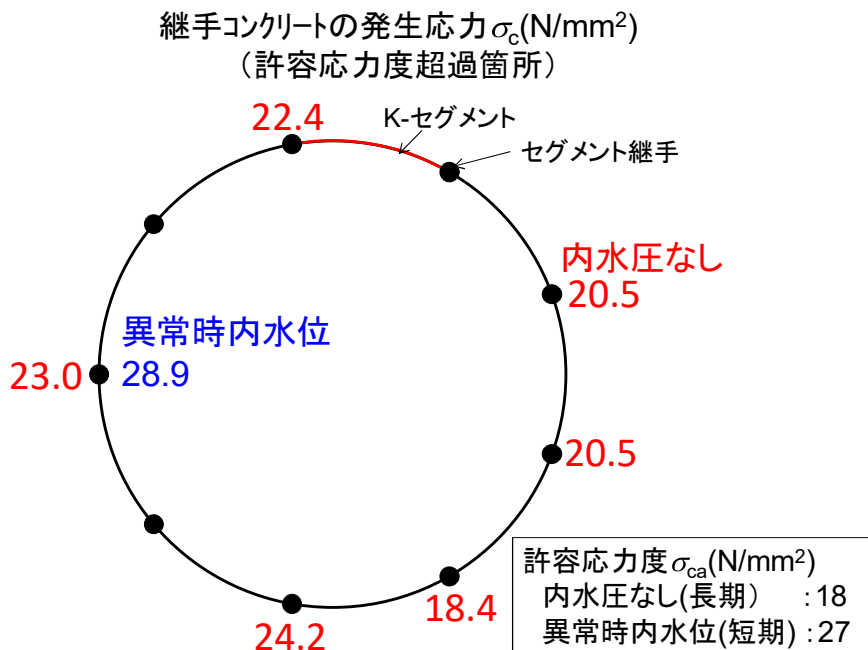
- ・FEMと梁ばねモデルで、外力は同じであり、変形、M、Nはいずれも良く一致
- ・内水圧の有無による外力とNの変化は大きい、変形とMの変化は比較的小さい

FEMによる $\delta_v \sim \eta$ 関係とコラボ計算収束点の $\eta \cdot \delta_v$



- FEMによる同一 η における $\delta_v \sim \eta$ 関係は、内水圧なし>異常時内水位 ($\delta_h \sim \eta$ 関係は逆転)
⇒内水圧作用による軸力 N の減少に伴ってトンネルが全体に膨張
- 収束時の η は、内水位なし>異常時内水位($0.89 > 0.79$)
⇒内水圧作用による外力の変化とセグメント継手ばねの軟化による

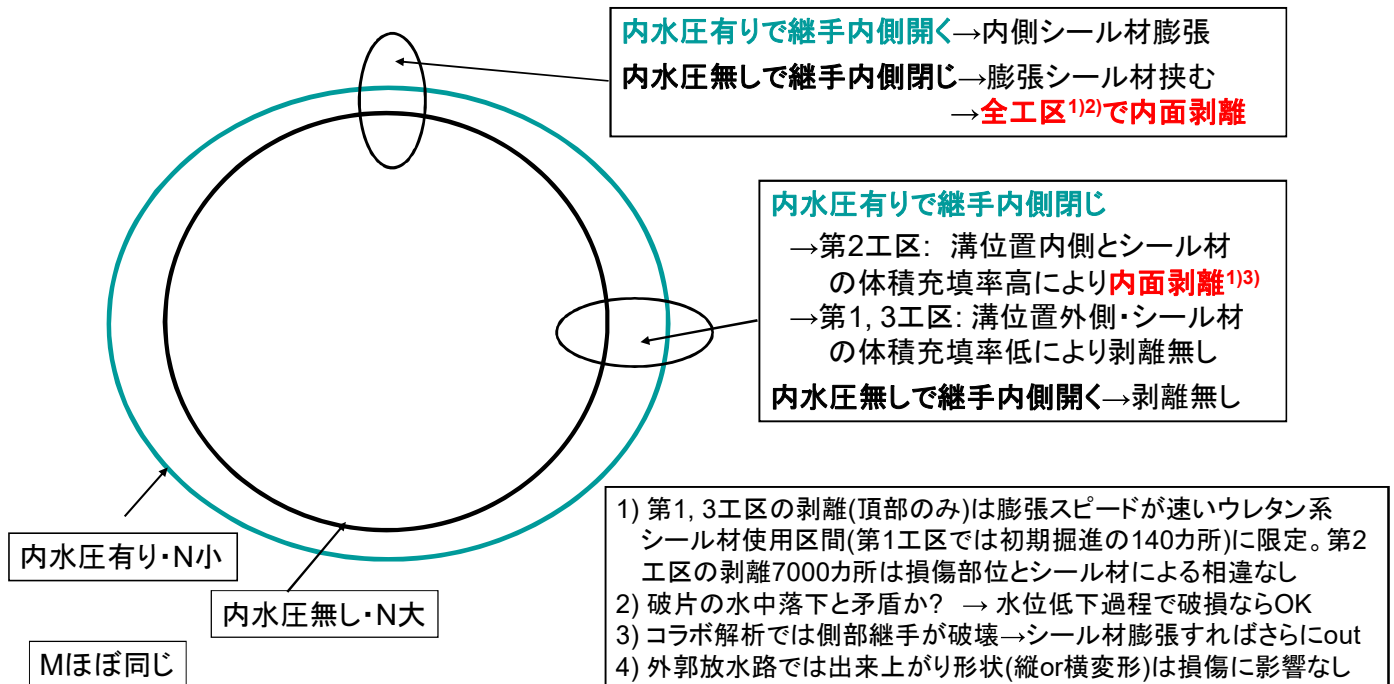
コンクリートが許容応力度を超過した継手位置と発生応力 σ_c



- セグメント本体のコンクリートと鉄筋、ならびに継手ボルトの発生応力は、内水圧の有無にかかわらず、許容応力度以下であった
- 継手コンクリートの発生応力は、内水位なしでは、管頂・管底・管側で、また異常時内水位では、管側の1か所で許容応力度を超過し、損傷の可能性を示す
- ただし、これらの継手の発生応力は、継手の終局耐力よりも小さく、破壊には至らない

コラボ解析の結果に基づく外郭放水路損傷イメージ

2019.5.15 東田



まとめ

- 内水位なしでは頂部・底部・側部の継手で、また異常時内水位では側部の継手で損傷の可能性を示唆する結果を得た。
- しかし、コラボ計算で求められたたわみ量は、実際の計測結果や経験からみて大きすぎると考えられる。
- よって、シールドトンネルに作用する土圧は、今回のコラボ計算で求めた土圧よりも小さい、あるいは等方的に作用すると考えられる。
- 「下水道施設耐震計算例」を対象としたFEM解析の照査でも、シールドトンネルについては、 $\eta \leq 0.6$ とならないと、構造的に安全となる結果が得られなかった。周囲の土質定数を見直し、また裏込注入硬化を考慮しても、検討結果は変わらなかった。
- したがって、シールドトンネルの場合、先行掘削による応力開放、裏込注入などの不確定要素に対して検討の余地があり、これらを解決することが今後の課題となる。