

# 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

ワークショップ配布資料

2019年 5月25日

## 「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載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続けてきました。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、内水圧載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

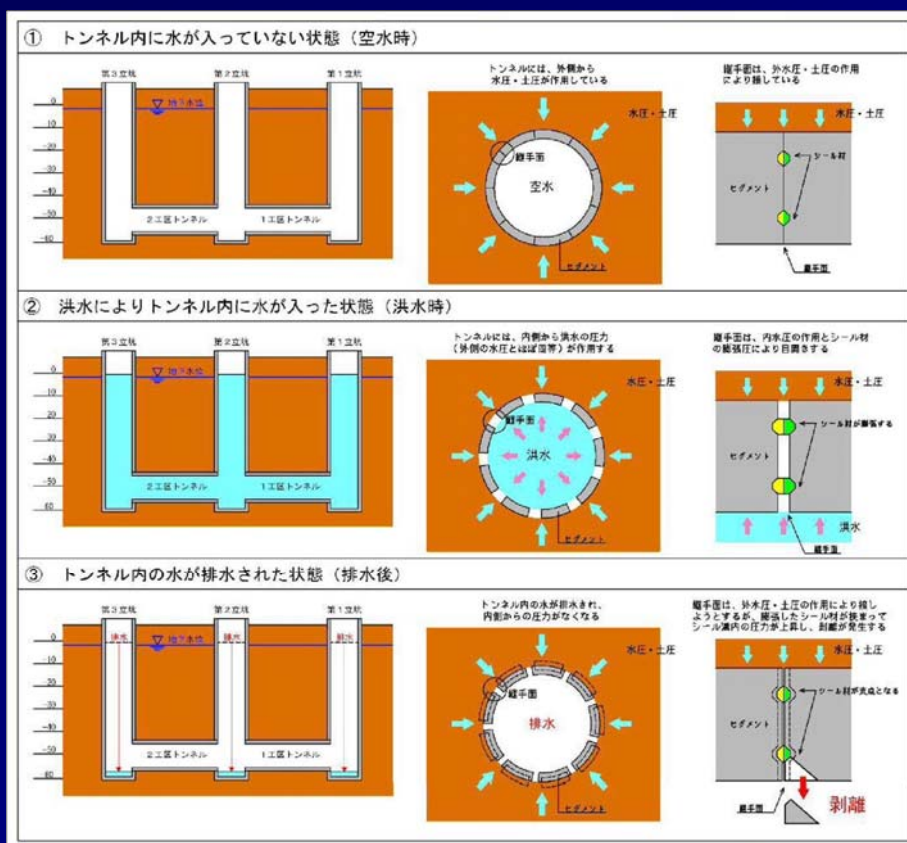
- ➡ 首都圏で供用後、RCセグメントIIに損傷発生
- ➡ セグメント端面の浅い剥離が主、深い剥離もあり
- ➡ 内径10m以上
- ➡ 合成セグメント被害なし

## □ 原因: 外水圧に匹敵する内水圧の繰り返し载荷

- ➡ 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も頂部に損傷発生

・ 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ト株式会社  
 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（载荷-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。

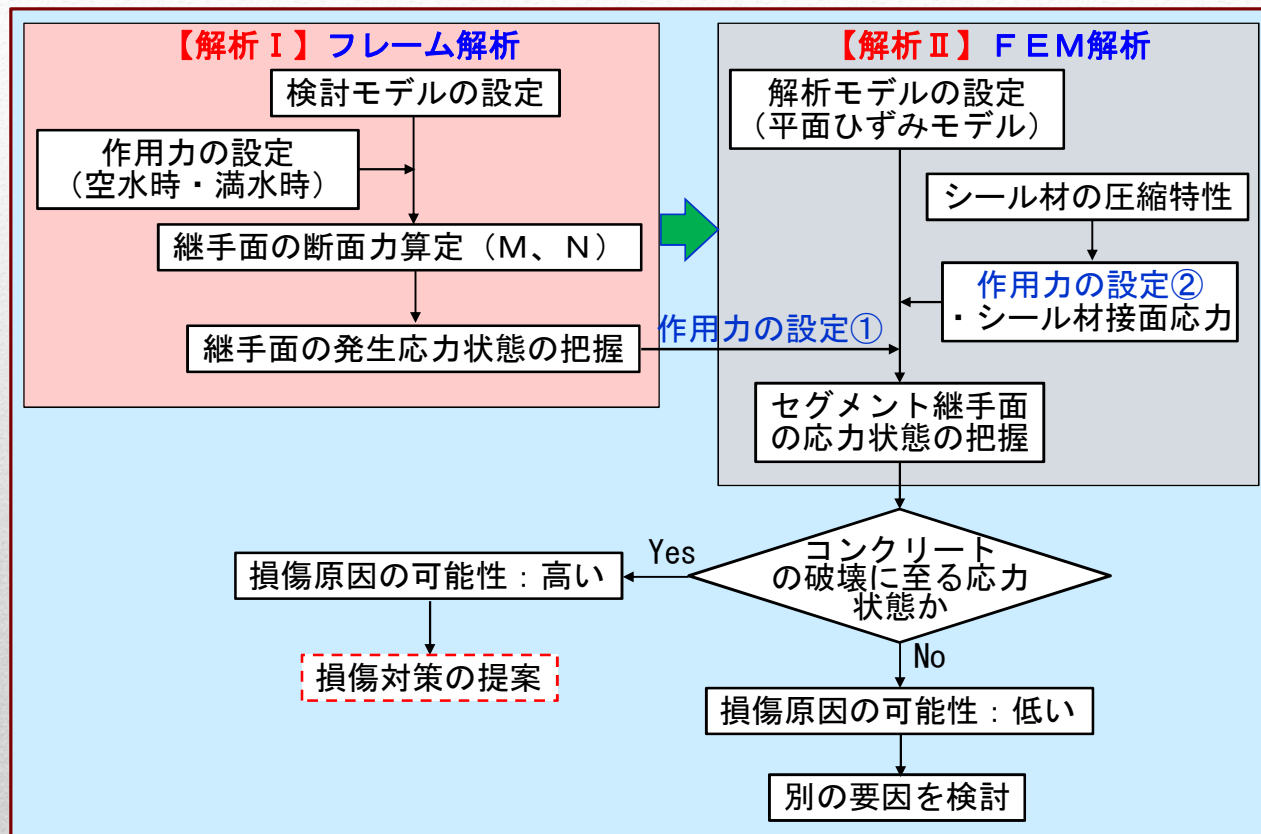
### 【解析Ⅰ】トンネル規模がトンネル断面の変形に与える影響の評価

- ・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

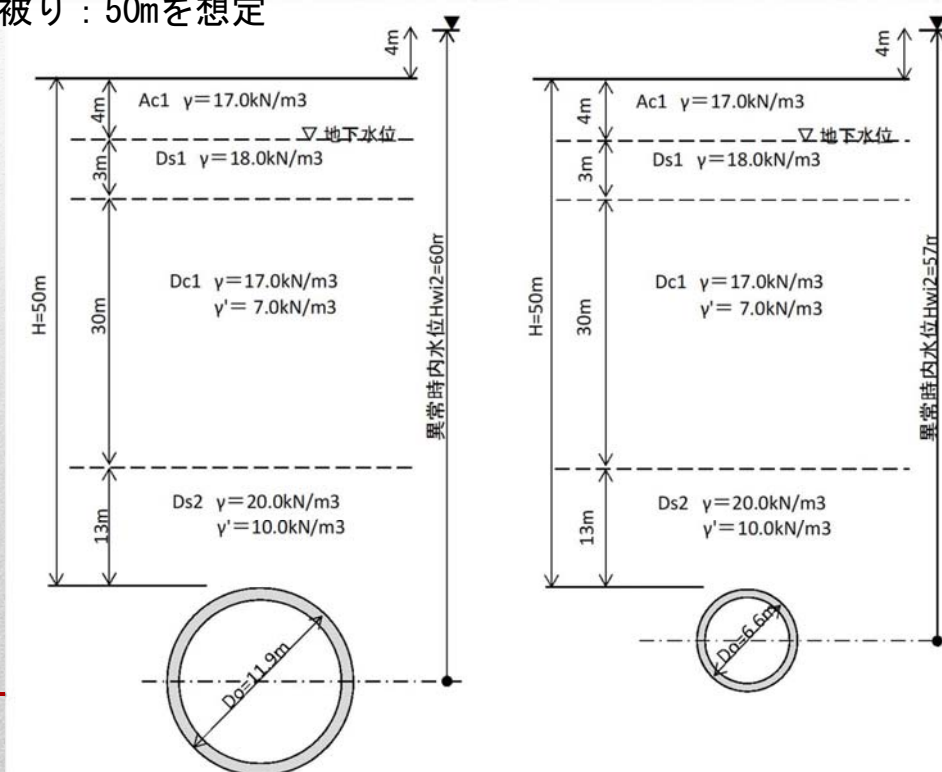
- ・作用外力の過程で発生するセグメント継手面の応力分布やシール材の膨張圧等を用いて、**二次元FEM解析**により**剥離損傷**の再現を試みる。

# 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

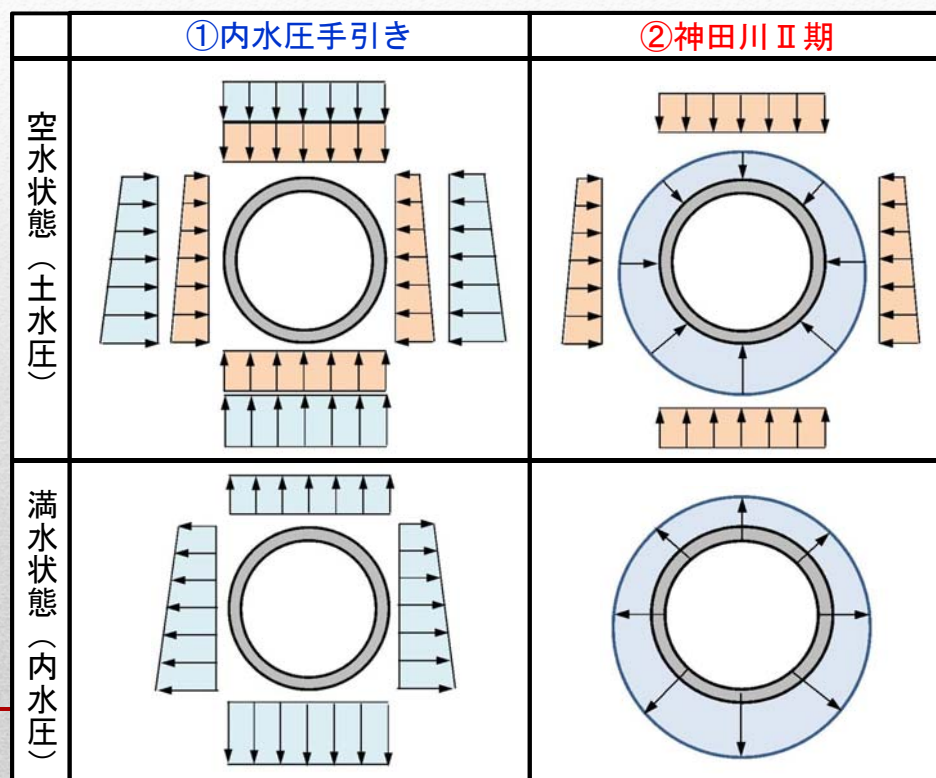
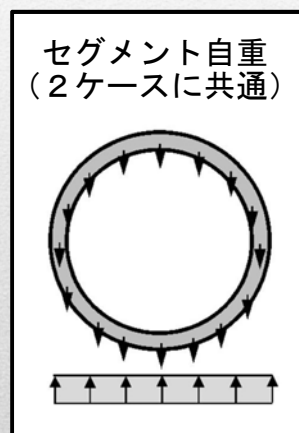
- トンネル構造諸元は、貯留型トンネルの事例を参考に設定

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	$\theta A$ (deg)	40	68.571
		$\theta B$ (deg)	40	68.571
		$\theta K$ (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
ボルト本数(継手角度)	$\alpha$	36(10°)	21(11.5°)	
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
材料諸元	コンクリート設計基準強度	$f_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	48	←
	許容圧縮応力度	$\sigma_{ca}$ (N/mm <sup>2</sup> )	18	←
	鉄筋材質		SD345	←
	許容引張応力度	(N/mm <sup>2</sup> )	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

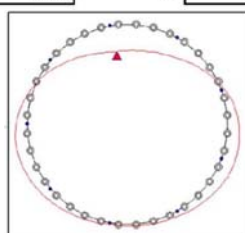
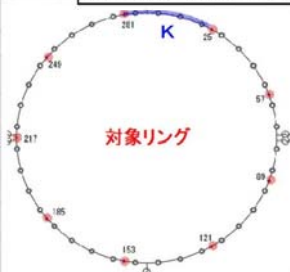




## フレーム解析：解析結果①大口徑

- ・ 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 $\sigma_c$ 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。

継手部発生応力	節点番号	【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	
		$\sigma_c$ N/mm2	$\sigma_t$ N/mm2	$\sigma_c$ N/mm2	$\sigma_t$ N/mm2	$\sigma_c$ N/mm2	$\sigma_t$ N/mm2	$\sigma_c$ N/mm2	$\sigma_t$ N/mm2
	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



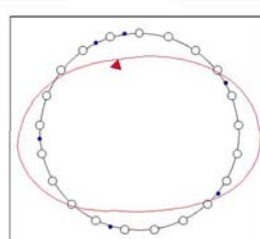
②神田川Ⅱ期

【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

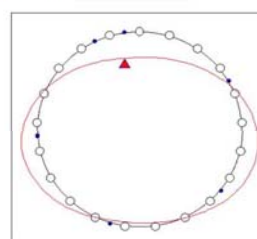
## フレーム解析：解析結果②中口径

- ・ 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 $\sigma_c$ の変動は小さく、大口徑ほど顕著ではない。
- ⇒内水圧が作用しても、大口徑のような圧縮応力の増加は確認できない。

継手部発生応力	節点番号	【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	
		$\sigma_c$ N/mm2	$\sigma_t$ N/mm2	$\sigma_c$ N/mm2	$\sigma_t$ N/mm2	$\sigma_c$ N/mm2	$\sigma_t$ N/mm2	$\sigma_c$ N/mm2	$\sigma_t$ N/mm2
	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
	165	7.7	全圧縮	5.9	106.6	7.3	全圧縮	4.6	71.9
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

## フレーム解析：解析結果の考察

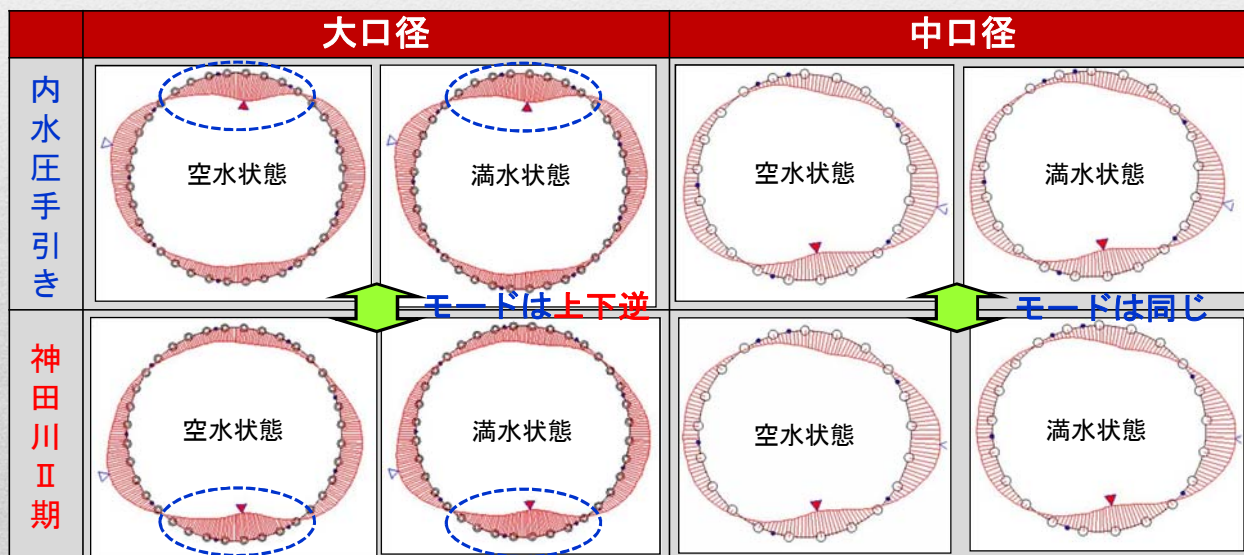
### ■セグメントリングの挙動（変位・変形）

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（ $\sigma_c$ ,  $\sigma_t$ ：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

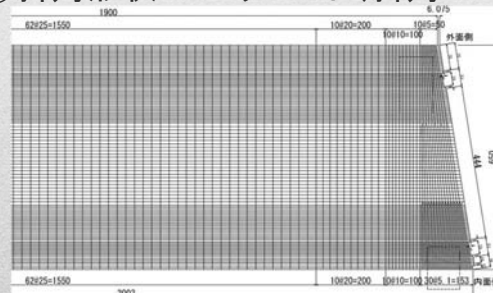
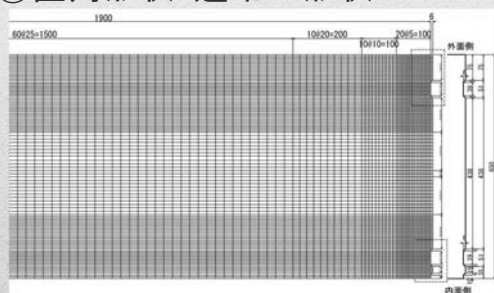
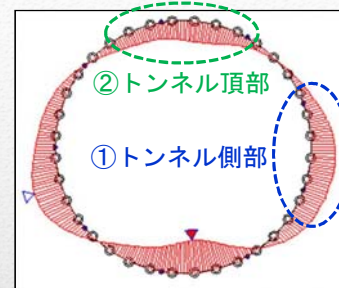
### ■解析パラメータ

(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)シーリング材の作用力：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	$\sigma$	$\sigma_c$	模式図
	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
	0		2.40	
	275	-105.84	7.06	
	535	-171.88	11.46	
	650	13.41	13.41	

case2 満水状態 内水圧 作用時	L	$\sigma$	$\sigma_c$	模式図
	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
	0	227.70		
	275	137.72		
	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	$\sigma$	$\sigma_c$	模式図
	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
	0	11.483	11.48	
	275	-109.87	7.32	
	535	-50.90	3.39	
	650		1.65	

case2 満水状態 内水圧 作用時	L	$\sigma$	$\sigma_c$	模式図
	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	
	0	8.75	8.75	
	239.8	0.00	0.00	
	275	19.26		
	535	161.50		

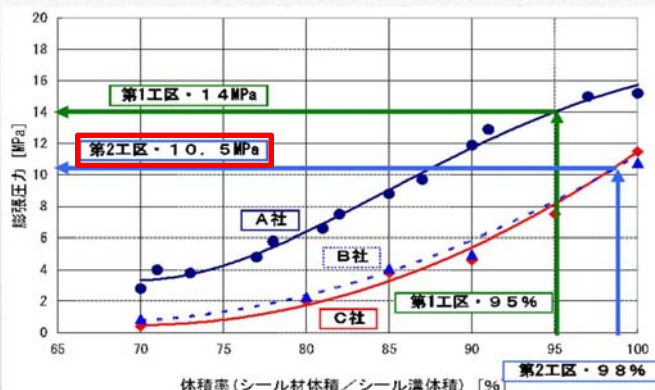


図-4 シール最大膨張圧(促進)試験結果

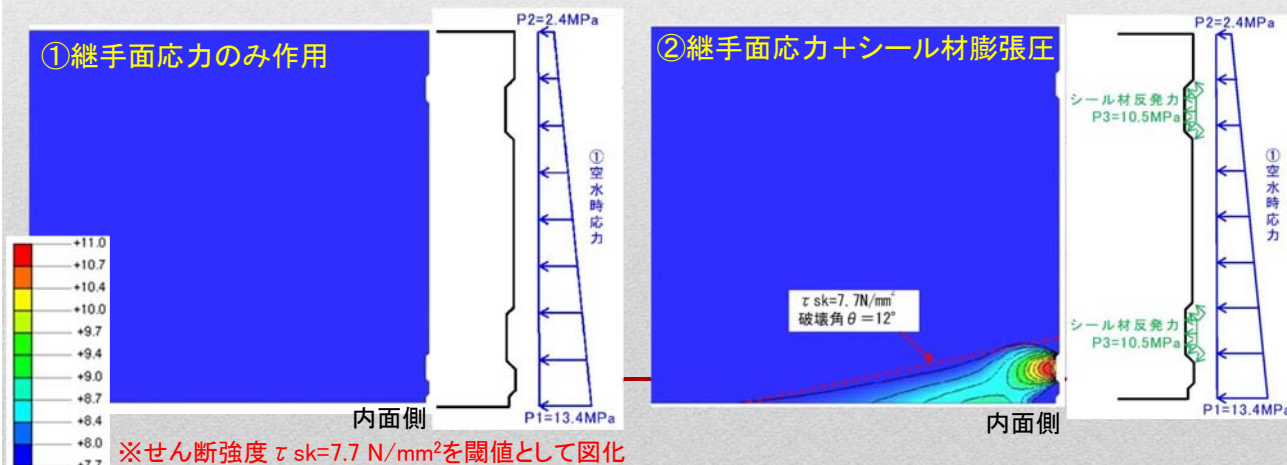
※) 高柳、山藤、佐々木、佐藤：内水圧が作用するセグメントの剥離現象の考察—外郭放水路第一工区トンネル・第二工区トンネル—トンネルと地下，第37巻3号，pp53-59，2006.3.

# FEM解析：結果(1) トンネル側部①

せん断強度  $\tau_{sk}$  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 $12^\circ$ 程度となり、損傷事例と概ね一致。

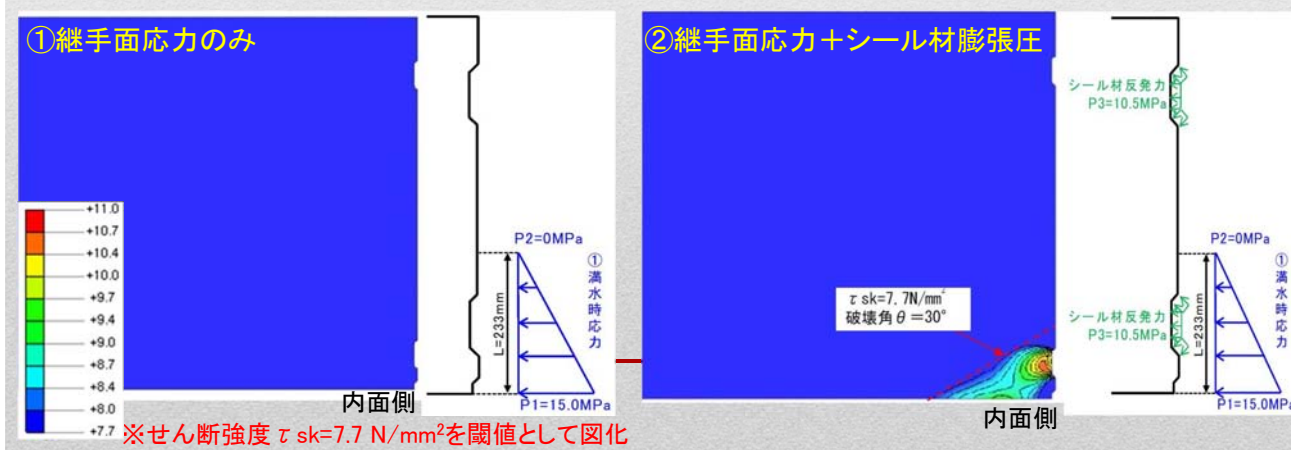


※せん断強度  $\tau_{sk} = 7.7 \text{ N/mm}^2$  を閾値として図化

## FEM解析：結果(1) トンネル側部②

### ②満水状態

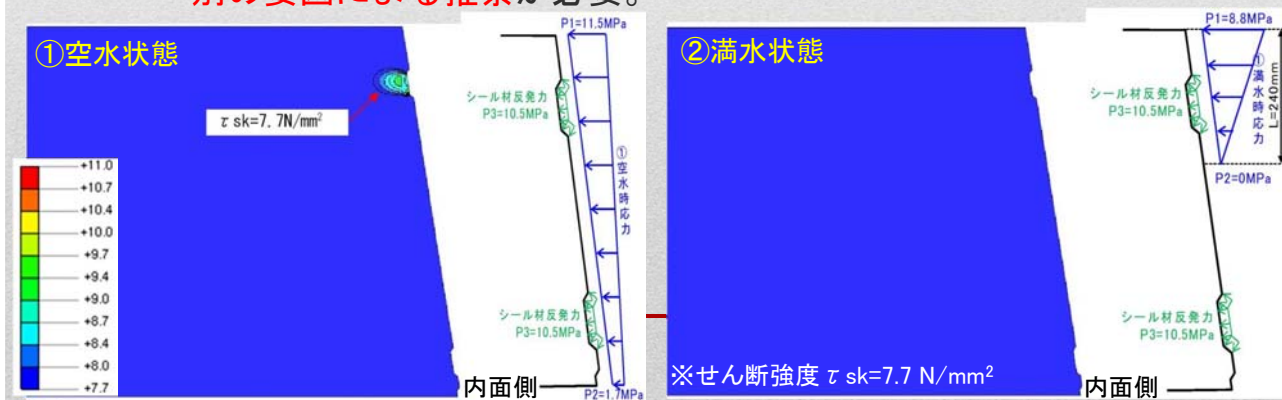
- ・ フレーム解析の継手面応力状態を作用力とした場合、満水状態においても剥離に至る応力状態は確認されない。
- ・ 継手面の応力分布に加えてシール材の膨張圧力を考慮すると、トンネル側部において内面が剥離に至る応力状態が確認される。
- ・ **せん断破壊面の角度は $30^\circ$ 程度となり、損傷事例とは若干異なる。**
- ・ **シール材の膨張圧力を考慮すれば、設計荷重条件下においてトンネル側部の剥離現象を再現できる。**



## 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

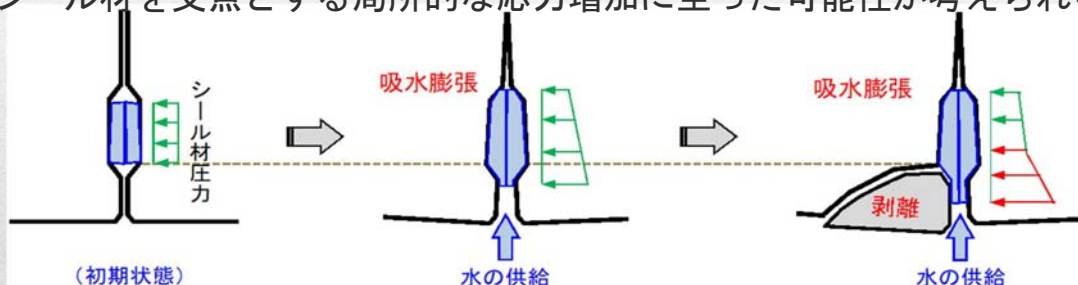
土水圧や内水圧等の作用力以外に、セグメントの損傷に影響を及ぼす可能性のあるものとして、例えば以下の要因が挙げられる。

表 想定されるその他の損傷要因

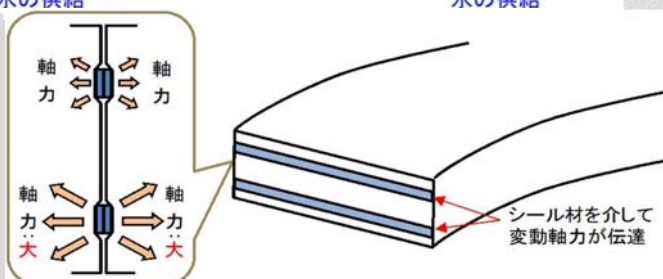
分 類	
シール材の影響	シール材膨張の影響
	シール材の膨張速度
	変動軸力がシール材を介して作用する場合の影響
シール溝の影響	シール溝の設置位置と形状
施工時の影響	セグメント組立ての影響
	曲線施工の影響

## 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。

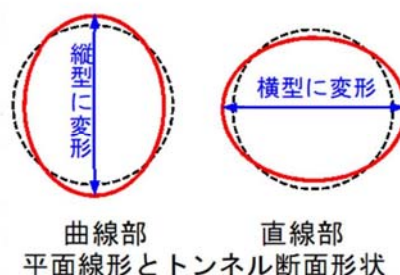
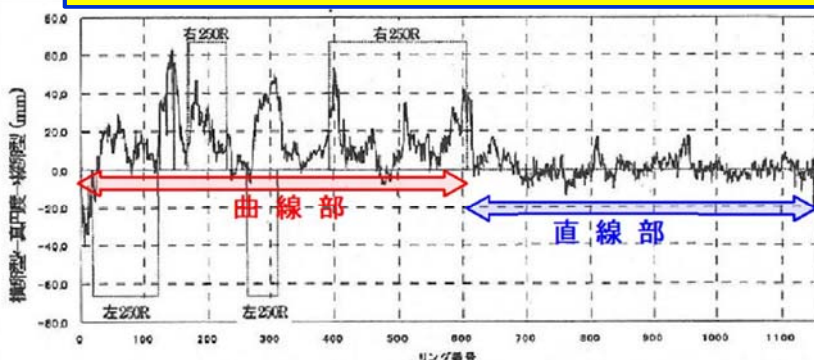


図-26 真円度測定結果一覧表



## 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

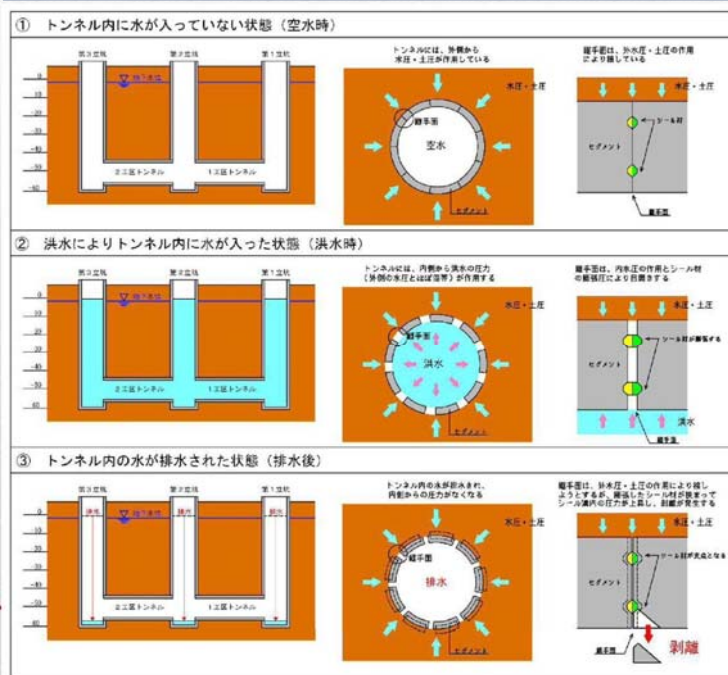
- セグメントの剥離損傷は内水圧が作用するシールドトンネル特有の損傷である。
- セグメントの剥離損傷が確認されている内水圧トンネルは、内径10m程度の  
大断面シールドトンネルのRCセグメントに限定されている。
- 同規模のトンネルでも工区によって剥離損傷の発生割合は大きく異なっている。



※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。

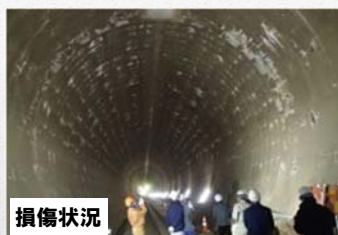


- シール材に至らない剥離損傷も生じたのはなぜか？
- 工区によって損傷の発生に大きく異なったのはなぜか？

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。



損傷状況



事後対策中



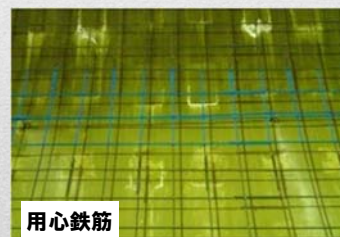
事後対策後



ひびわれ誘発目地



導水口



用心鉄筋

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。



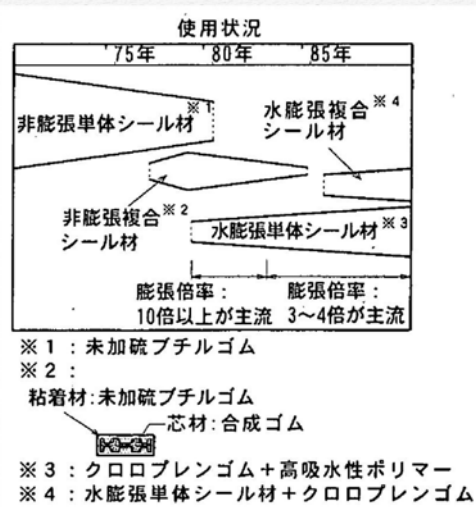
## 想定される損傷要因

- 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。



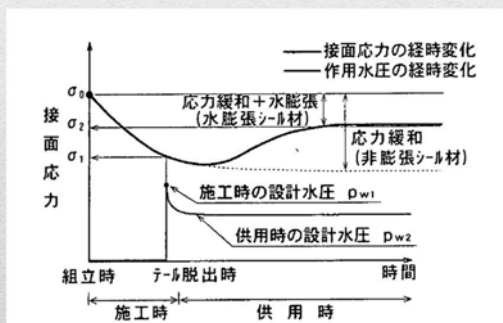
出典：大塚他：シールド工用セグメントの水膨張シール材による止水設計法について，土木学会論文集No. 651/VI-47, pp61-79, 2000



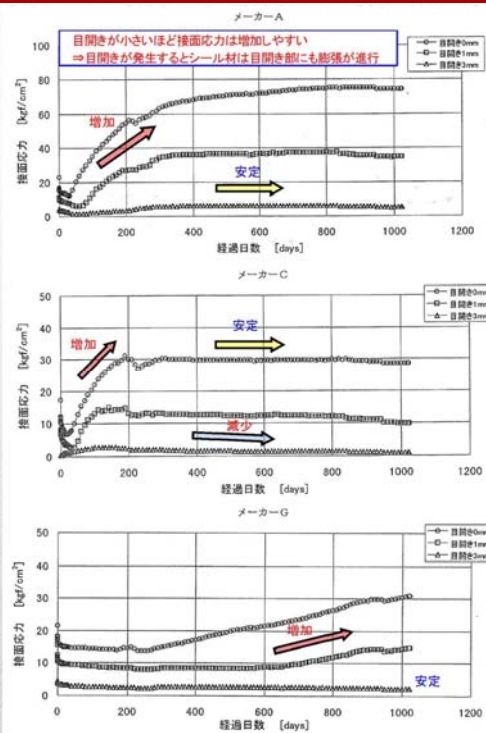
出典：王子ゴム化成株式会社：水膨張性義務シール材カタログ アクアケル (AQUAQUELL)

## 水膨張シール材の挙動

- 水膨張シール材の界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。
- 水膨張シール材の界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 <sup>2</sup> )	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/mm<sup>2</sup>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/mm<sup>2</sup>でも損傷が多かったが、第1工区では膨張圧14.0N/mm<sup>2</sup>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)

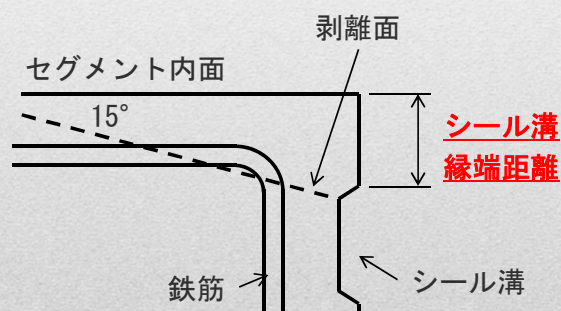
### セグメントのシール溝縁端距離と剥離損傷

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<sup>2</sup>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<sup>2</sup>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	600	無し
		II期	H17年					合成	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	
	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
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
	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	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
		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	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	
	北島 調節池		無し				
	北浜逢坂貯留管 大阪市建設局	西天満 ～逢阪	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

<p>□「梁ばねモデルによる設計法」と問題点</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●内圧トンネル設計手引き (1999 先端建設技術センター)</li> <li>●鉄道総研法 (1999, 2001, 2002 鉄道総合技術研究所)</li> <li>●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)</li> </ul>	(東田報告)
<p>□「弾性FEMによる設計法」と問題点</p> <p>□両設計法のコラボレーションのアイデア</p>	
<p>□コラボ解析の手法</p> <p>□コラボ解析による首都圏外郭放水路の挙動予測</p> <p>□コラボ解析の結果に基づくセグメント損傷の原因推定</p>	(島津報告)

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】神田川地下調節池Ⅱ期<sup>3)</sup>

- ・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）

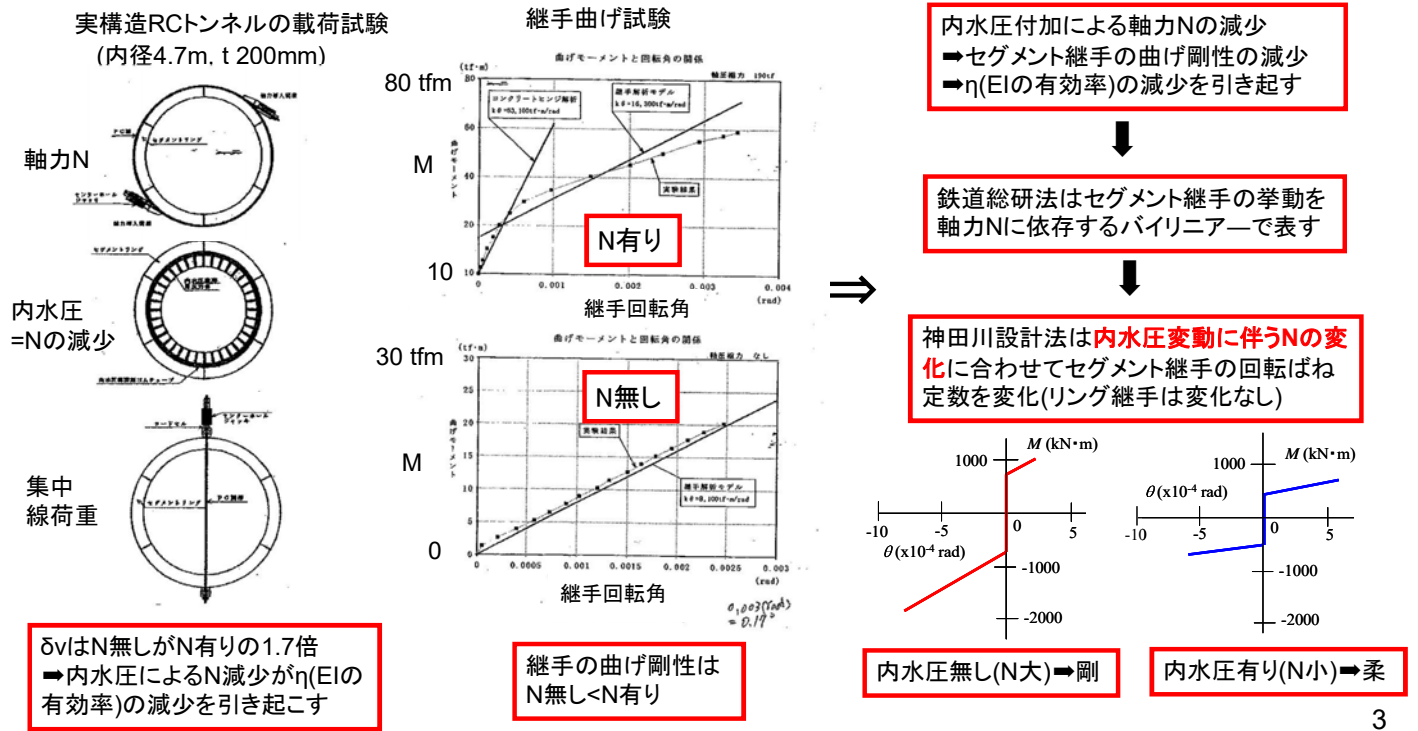
荷重作用段階	内圧トンネル設計手引き	神田川Ⅱ期設計基準
自重		
土水圧		
内水圧		

総研法  
+  
内水圧  
II  
神田川  
設計基準

2

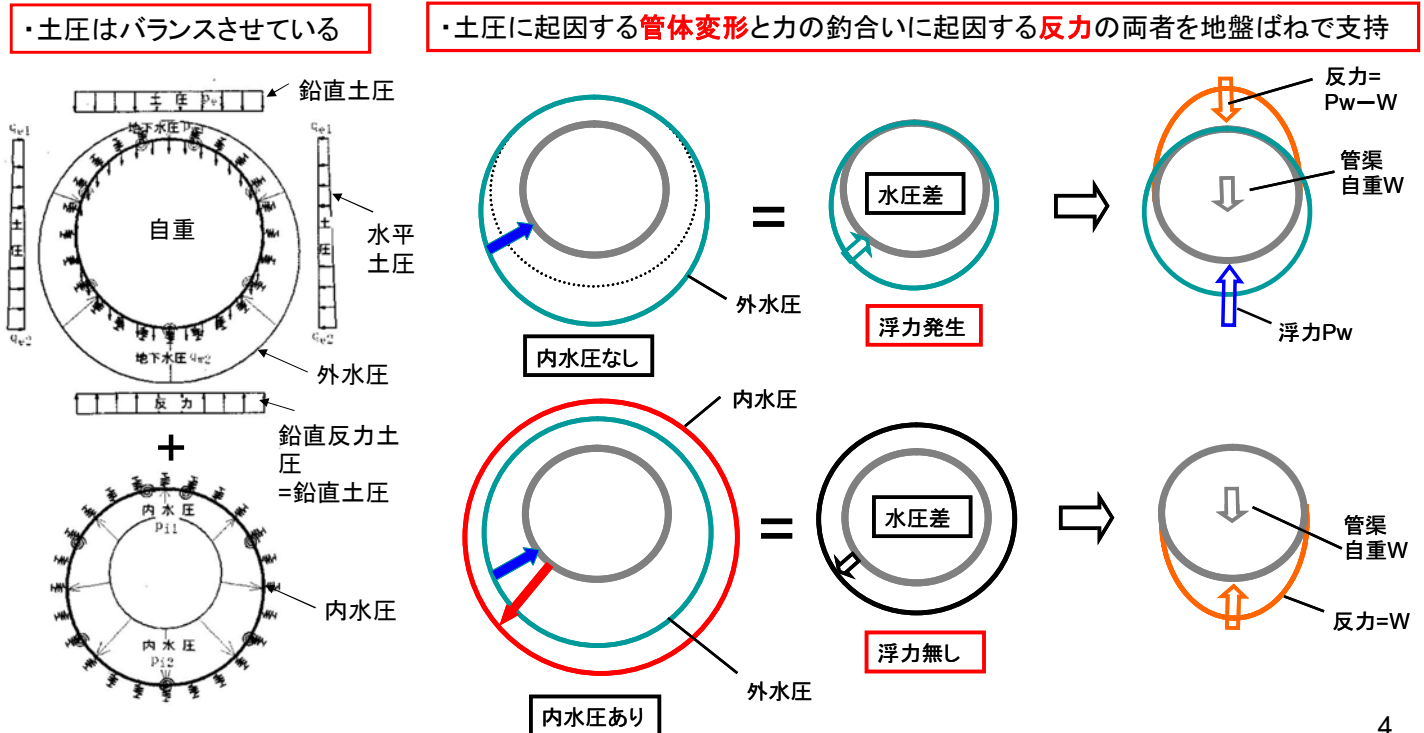


# 内水圧トンネル設計手引きの載荷実験と継手ばね定数の設定方法



3

## 神田川設計基準(鉄道総研法+内水圧)



4

## 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 $\lambda$ 、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
  - 管渠が純粹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

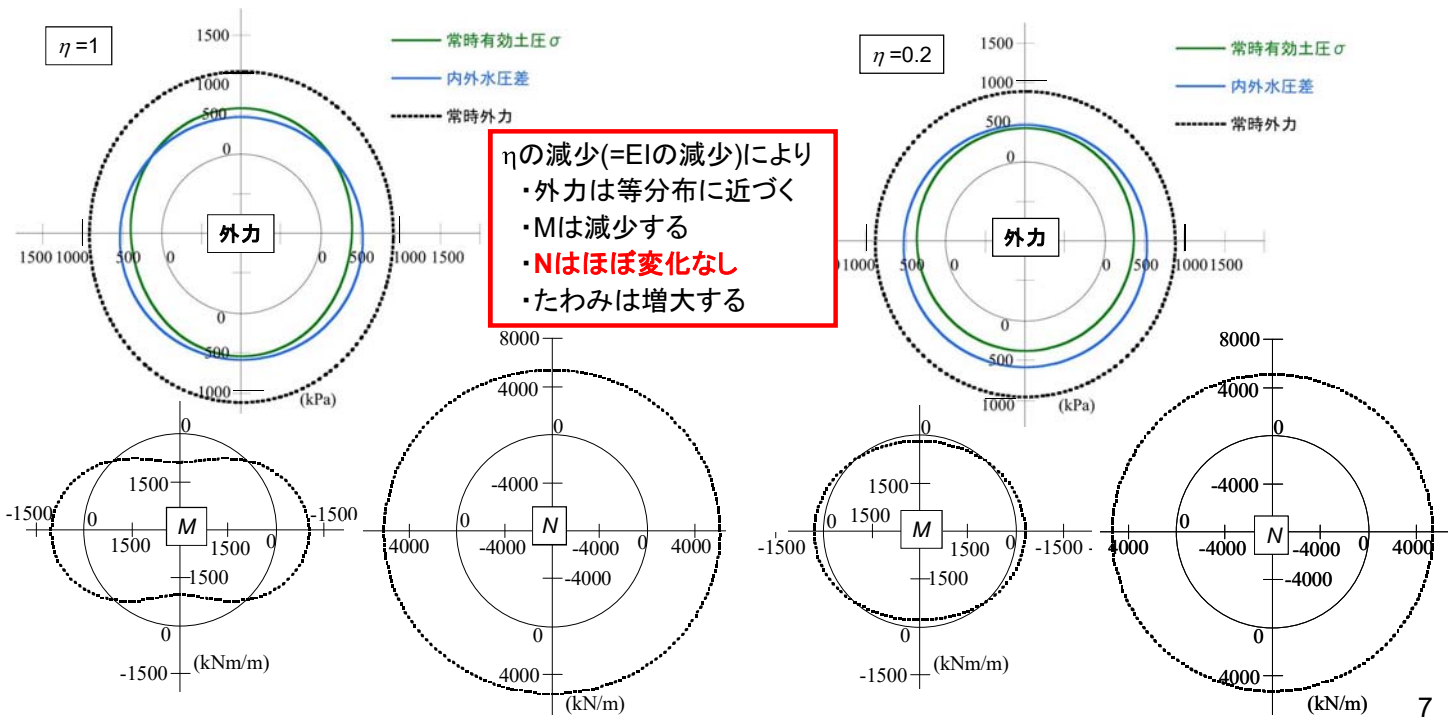
- 弾性FEMによる埋設管渠の設計法を提案
  - 埋設管渠の土圧と変形は、**土と構造物の相互作用**として決まり、**管面の境界条件(滑動)、地盤側方の境界条件(埋設方式によって変化)、管渠と地盤の相対剛性によって支配される**ことを多数の遠心実験により検証
  - 弾性FEMによる解析手法の妥当性を遠心実験との照合により検証
  - 提案設計法は土と構造物の相互作用を正當に評価することを確認
- 提案設計法によってシールド管渠の設計予測を実施
  - 下水道耐震設計例の事例では、RCセグメントが常時で終局強度を超える結果となり、継手を有するセグメント構造を扱えないことが判明

## 今回提案する手法

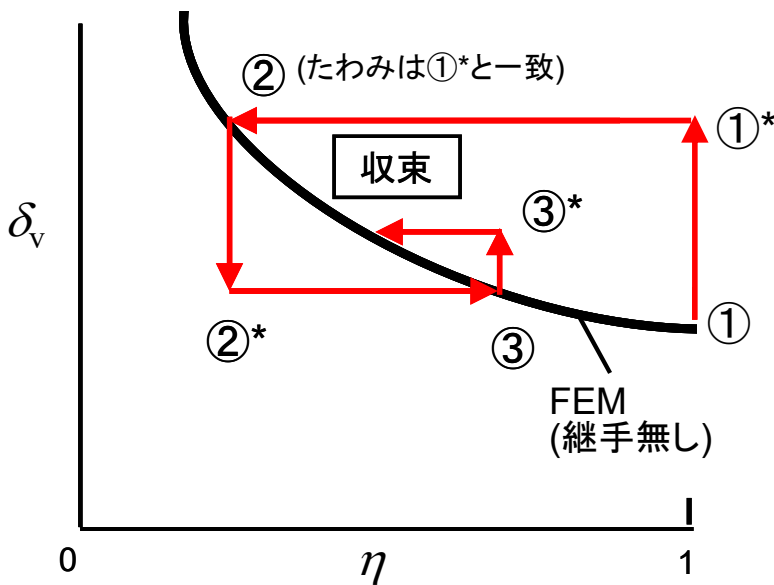
- 提案設計法と梁ばねモデルのコラボレーション
  - 提案設計法により土圧を、梁ばねモデルによりセグメント構造をシミュレートするコラボレーションの手法を思考実験により考案

6

## $\eta$ を変えた時のFEM解析結果(継手無し・内水圧無しの場合)



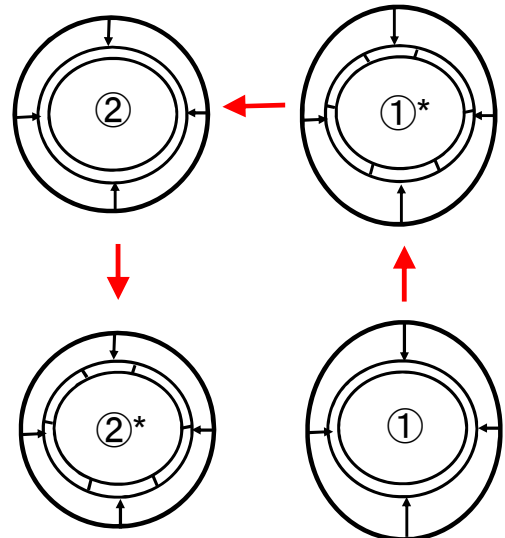
## コラボの思考実験



- 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、 $\eta$ 小によりたわみ大となる。

①と同じ土圧では、継手の存在により①よりもたわみ大となる。



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

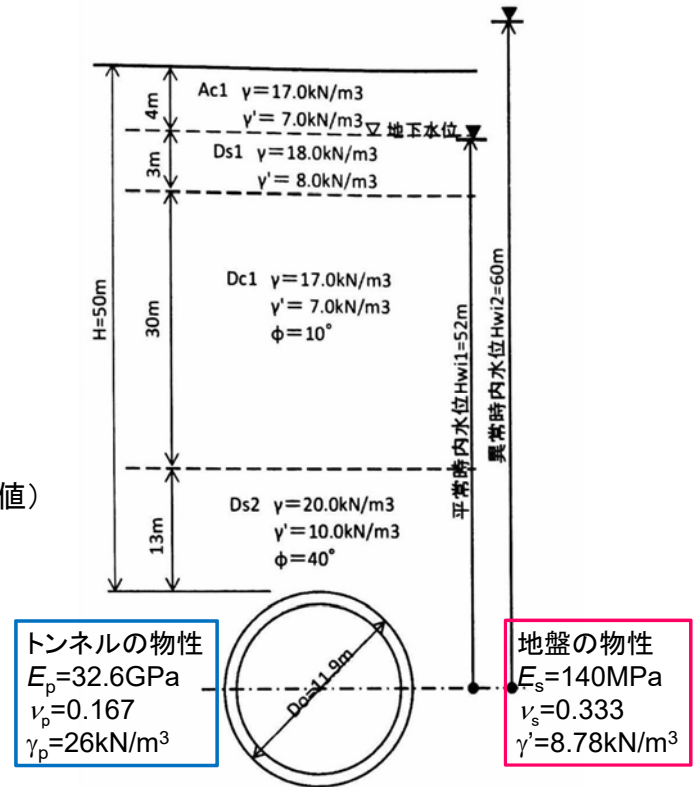
- ・シールド外径 = 11.9m
- ・管厚 = 0.65m

### 埋設条件

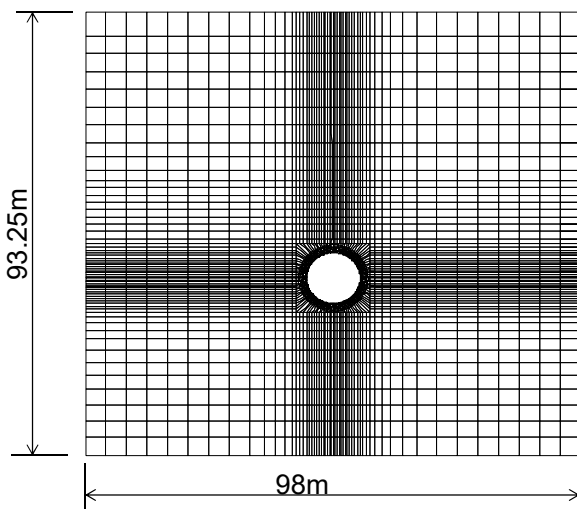
- ・  $H = 50\text{m}$
- ・  $\gamma' = 8.78\text{kN/m}^3$   
(均一地盤におきかえ管側までの有効重量の平均値)
- ・  $E_s = 140\text{MPa}$  ( $N=50$ として、 $E_s=2800N$ )
- ・  $\nu_s = 1/3$

### 水位

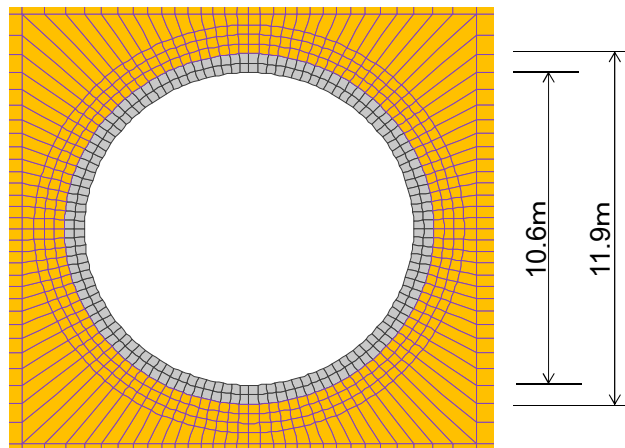
- ・ 地下水位 = GL-4.00m
- ・ 内水位 = なしと異常時 (GL+4.05m)



## コラボ解析のFEMモデル



(a) FEメッシュ全体

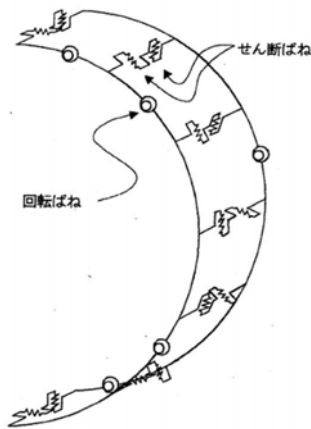


管と地盤の間にはジョイント要素を設置  
管面完全スリップ状態:  $k_n=100\text{MPa}$ 、 $k_s=0$

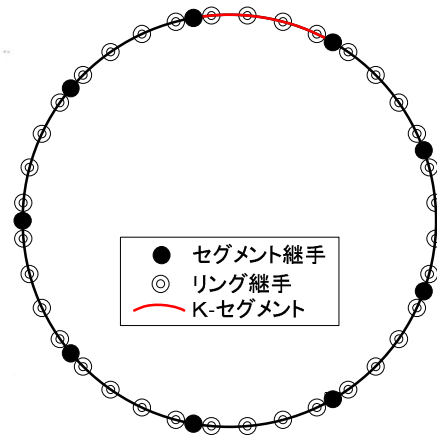
(b) 管周辺のメッシュ拡大図

- ・ 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

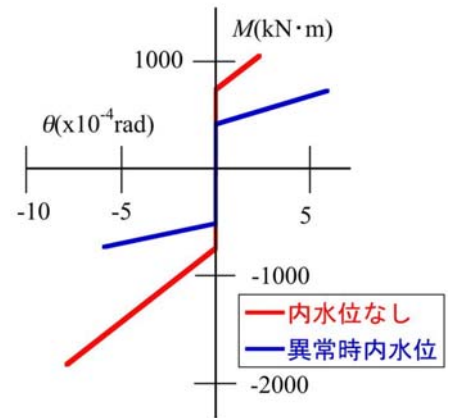
## コラボ解析の梁ばねモデル



(a) 構造モデル



(b) 継手位置

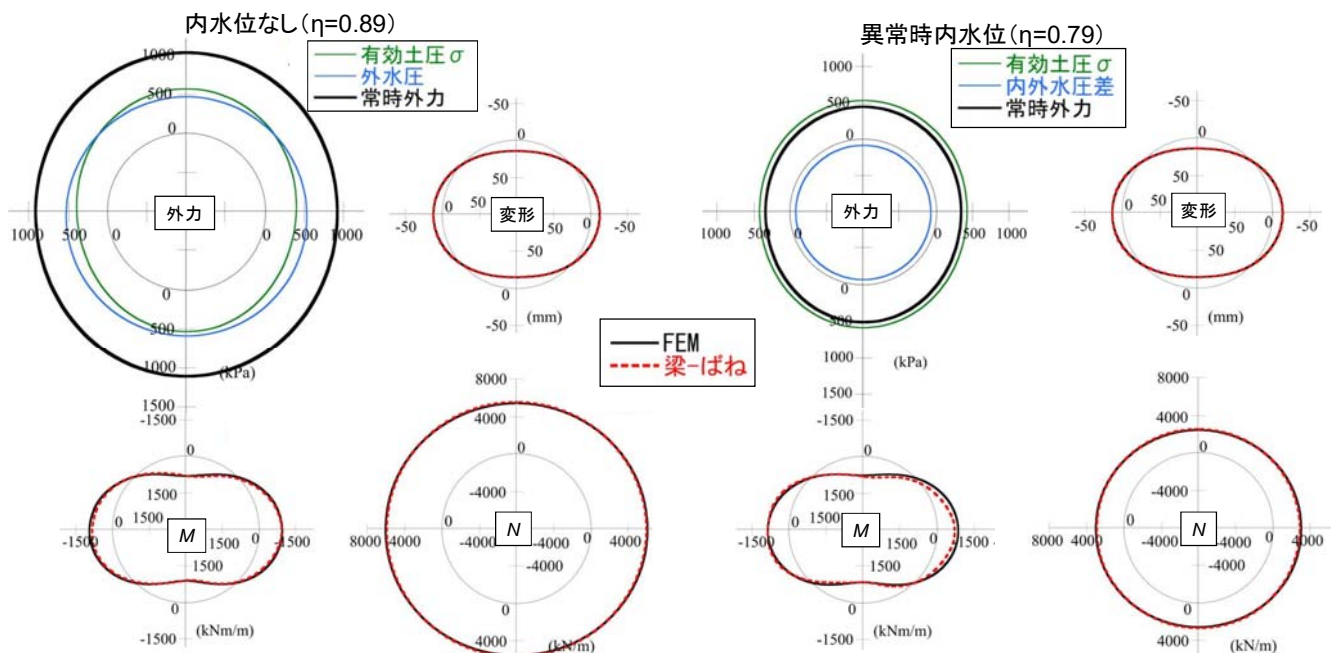


(c) セグメント継手回転ばね

(d) リング継手せん断ばね  
 $k_s=100\text{MN/m}$

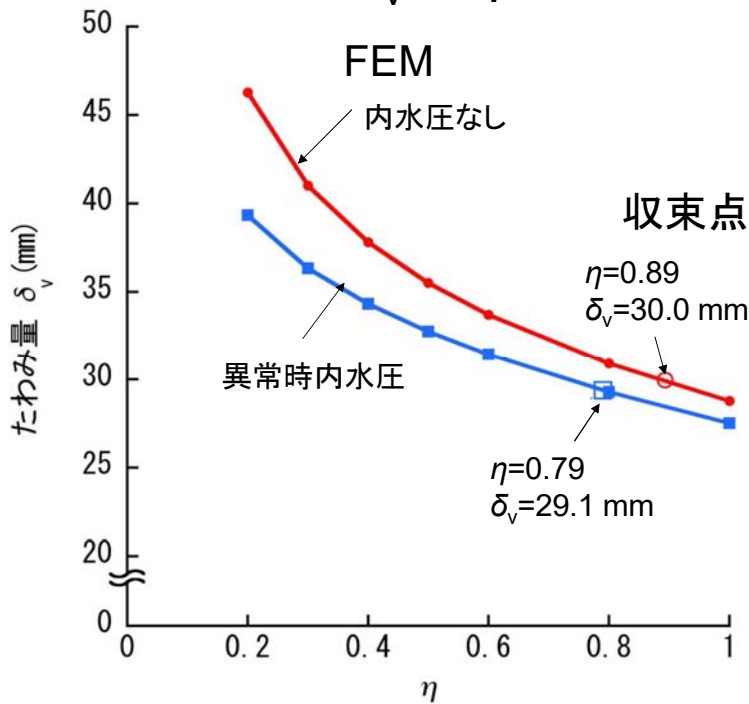
- ・セグメント継手の回転ばねは軸力依存
- ・自重、土圧、外水圧、内水圧は一括載荷

## 収束時における両モデルの解析結果



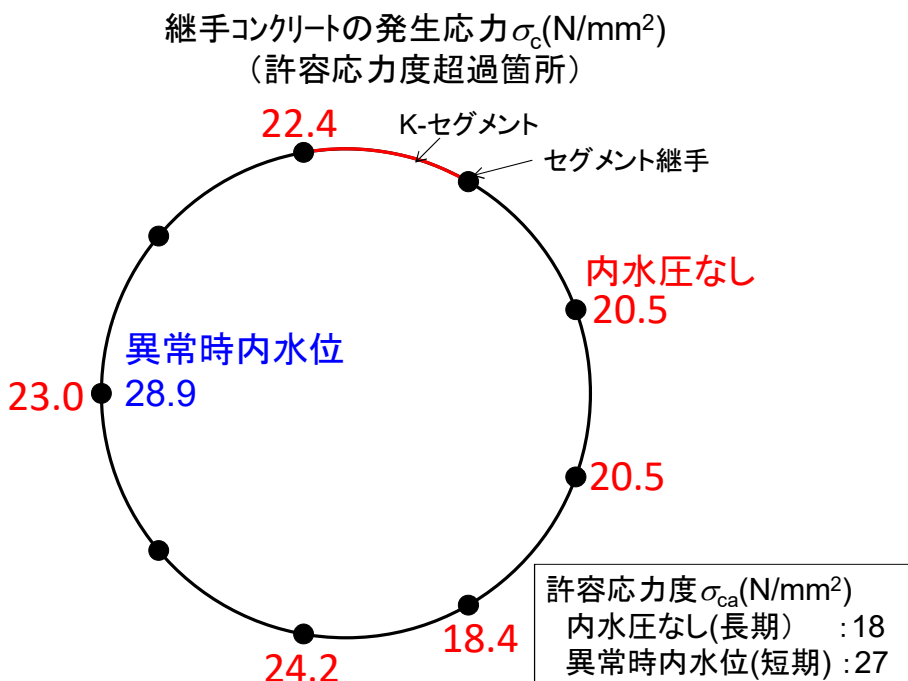
- ・FEMと梁ばねモデルで、外力は同じであり、変形、M、Nはいずれも良く一致
- ・内水圧の有無による外力とNの変化は大きい、変形とMの変化は比較的小さい

## 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 $\eta$ における $\delta_v \sim \eta$ 関係は、内水圧なし $>$ 異常時内水位 ( $\delta_v \sim \eta$ 関係は逆転)  
 $\Rightarrow$ 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 $\eta$ は、内水位なし $>$ 異常時内水位( $0.89 > 0.79$ )  
 $\Rightarrow$ 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 $\sigma_c$

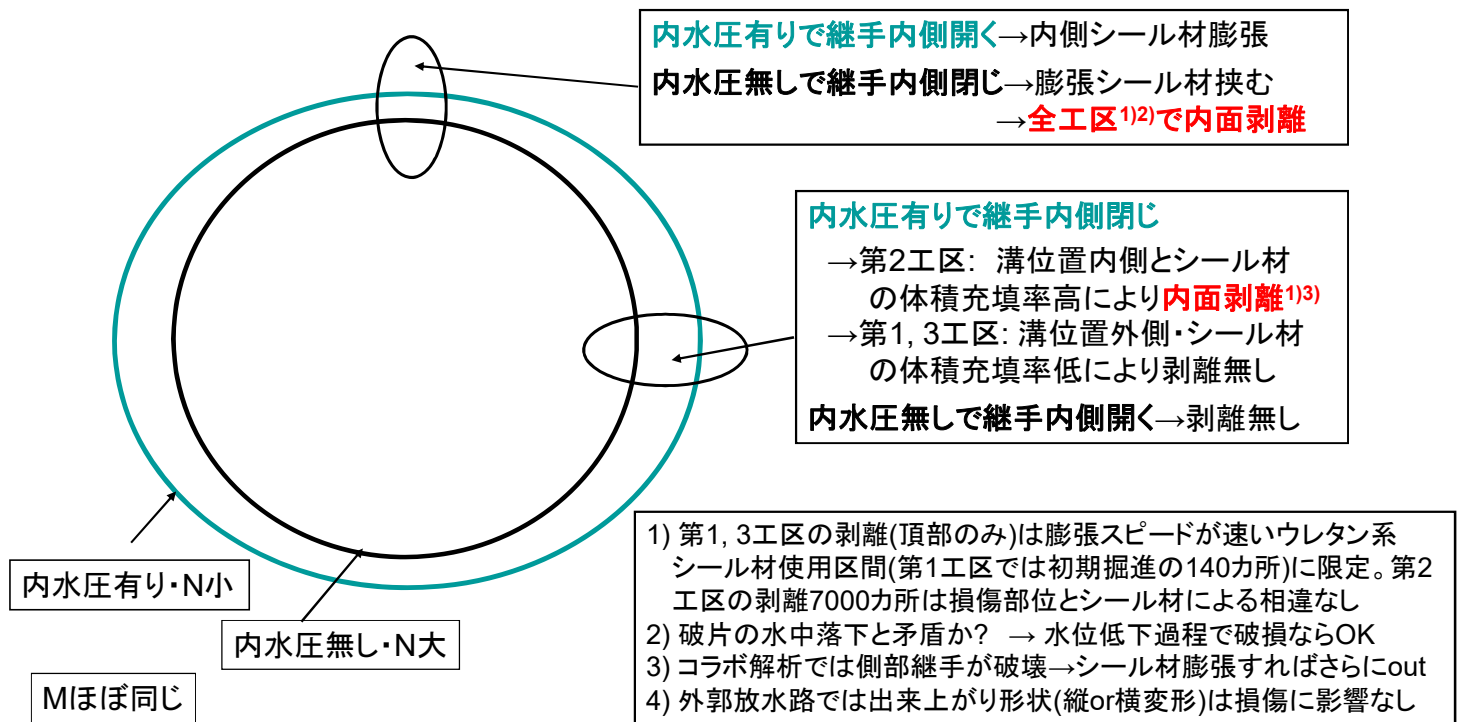


- セグメント本体のコンクリートと鉄筋、ならびに継手ボルトの発生応力は、内水圧の有無にかかわらず、許容応力度以下であった
- 継手コンクリートの発生応力は、内水位なしでは、管頂・管底・管側で、また異常時内水位では、管側の1か所で許容応力度を超過し、損傷の可能性を示す
- ただし、これらの継手の発生応力は、継手の終局耐力よりも小さく、破壊には至らない



# 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。