

(公益法人) 土木学会関西支部 共同研究グループ

“直下地震における耐震問題に関する研究”

—成果報告書—

平成 29 年 5 月 27 日

平成 27, 28 年度 土木学会関西支部 共同研究グループ

まえがき

平成 27 年度土木学会関西支部共同研究グループ「都市直下地震における耐震問題に関する研究」が認められ、活動を始めてから今年度で 2 年がたちました。本共同研究グループの結成の動機は、1995 年の兵庫県南部地震での土木・建築施設の未曾有の大被害がベースにあります。2011 年 4 月に“内陸直下地震における耐震問題研究会（代表・櫻井春輔神戸大学名誉教授）を立ち上げ、2013 年 10 月から神戸大学都市安全研究センターの支援を受けて研究会として活動を続けて参りました。

兵庫県南部地震では、地震直後に阪神間の多くの住民はもとより耐震構造の専門家も激しい衝撃的な上下動を受けたとは認識していましたが、2、3 ヶ月後に地震計の記録が発表されてからは専門家の認識は薄らぎ、結局、上下動が構造物に損傷を与える影響は少ないと結論づけられました。そのため、後に改正された耐震設計法では上下動の影響は全く反映されていません。その後、新潟県中越地震そして昨年 4 月の熊本地震は、阪神・淡路大地震と共通する直下地震特有の大被害をもたらしました。

”直下地震での上下動の影響は本当に無いのだろうか？”本研究グループは地震計の記録(通常、30Hz のローパスフィルターを通して)では捉え難い高周波の地震疎密波による影響に着目しています。高周波の地震疎密波の影響は、古くから知られている海震現象や岩石・墓石などの飛び跳ね現象と共通しており、現在でも未解決な多くの問題を残しています。

本報告書は平成 27, 28 年度の 2 年間の研究成果を取りまとめたものです。ご高覧頂きご意見を賜り、今後の耐震工学の研究の発展に少しでも寄与できれば望外の幸せとするところです。

研究グループの委員構成

氏名	所属
研究代表（平成 28 年度） 園田恵一郎	大阪市立大学名誉教授
研究代表（平成 27 年度） 石丸和宏	明石工業高等専門学校 都市システム工学科 教授
野中泰二郎	京都大学名誉教授
櫻井春輔	神戸大学名誉教授
酒造敏廣	神戸市立工業高等専門学校 都市工学科 教授
佐藤裕一	京都大学工学研究科 建築学専攻 助教
前原 博	(一財)地球システム総合研究所
中岡健一	大林組技術研究所
西本安志	シバタ工業(株)

問い合わせ先：

石丸 和宏

〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西岡 679-3

E-mail :ishimaru@akashi.ac.jp

目次

1. 兵庫県南部地震の余震の地震波形記録－衝撃的上下動の存在－ 1
2. 被災事例と海震および証言に基づく鉛直地震動 4
3. 多層弾性地盤上への突き上げ力の生成機構 26
4. 積層繊維ゴムを用いた衝撃緩衝材の提案 41

関連した発表論文

あとがき

付録 研究会議事録

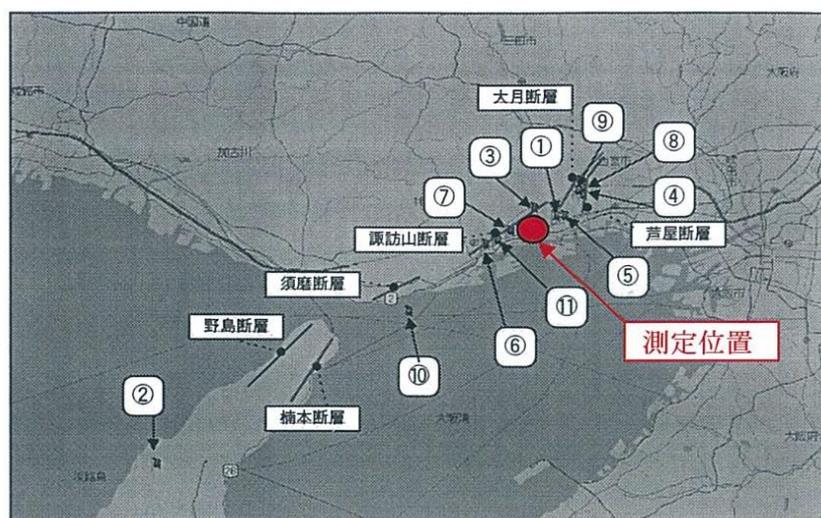
1. 兵庫県南部地震の余震の地震波形記録—衝撃的上下動の存在—

1.1 はじめに

1995年1月17日未明に発生した兵庫県南部地震において阪神・淡路地域の建物などの建造物の多くが壊滅的な被害を受けた。その建造物の破壊のメカニズムはそれまでの地震における破壊とは異なり衝撃的な上下動に起因するものが多いように思われた。そして地震直後に現地視察した土木・建築の耐震工学の専門家の多くが「これからは上下動による建造物の衝撃的破壊の研究が必要」とコメントしていた。しかしその後、徐々に地震波形が公表されるにつれて衝撃的な上下動は存在しなかったとする意見が大半となり、その後上下動の存在はまったく否定されることとなった。しかし、兵庫県南部地震の波形記録はフィルターによって高周波がカットされているので高周波の波形が記録されていない可能性がある。そこで高周波成分の測定可能な加速度計（サーボ型加速度計:DC-100Hz）を用いて、本震直後の2月3日から2年間にわたり余震の震動測定を行った。その結果について、ここに簡単に報告する。

1.2 余震の震動測定

測定位置は神戸大学都市安全研究センターの地表面下約10mにある土砂搬出用のトンネル内と、その地表にある実験棟の1階に定めた。地質は部分的に風化作用を受け一部マサ化している花崗閃緑岩からなる。収集できた震動記録をその震源の位置、震源深さ、及びマグニチュードを図—1.1及び表—1.1に示す。



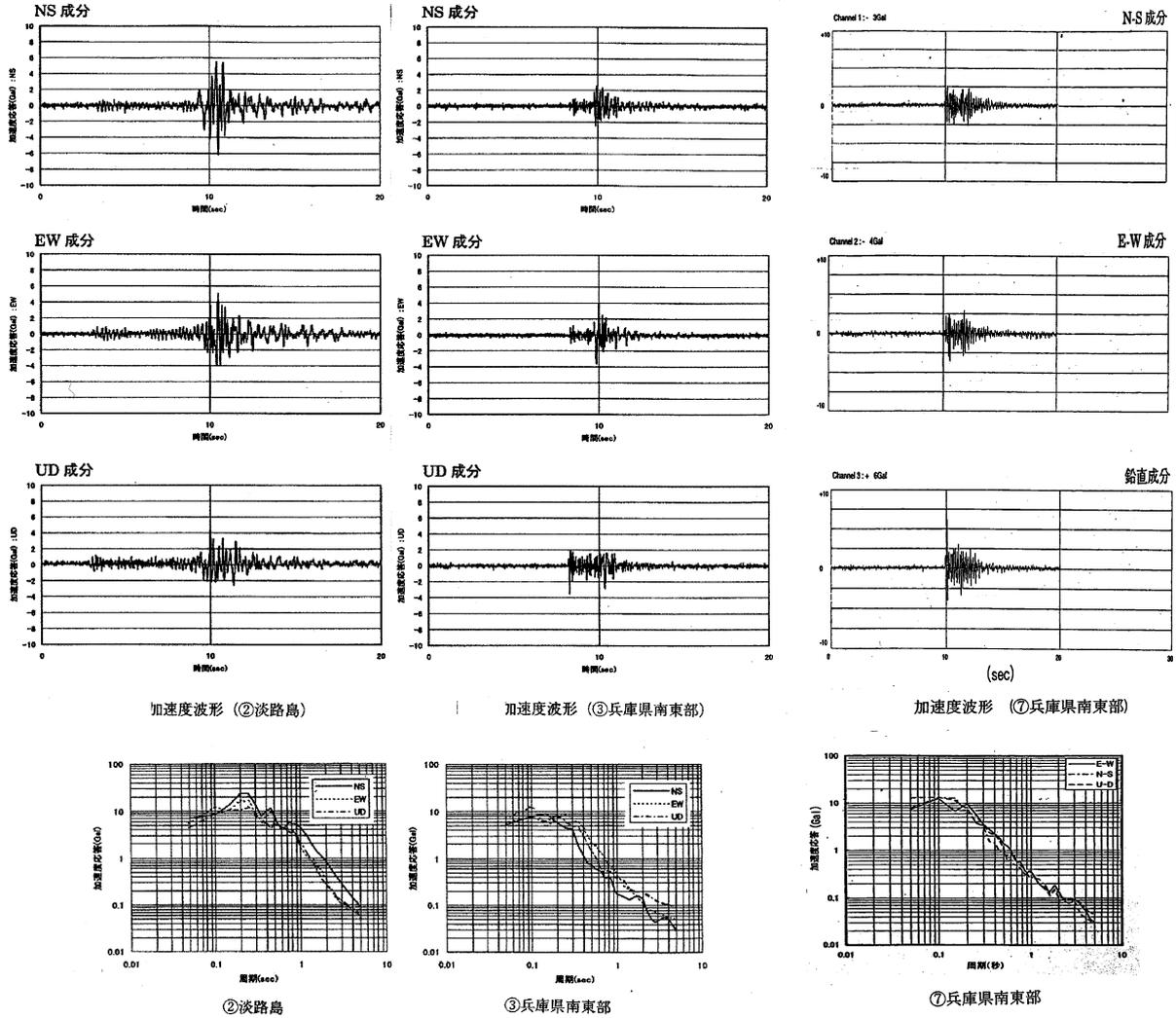
図—1.1 兵庫県南部地震の余震の震央位置と震動測定の位置関係

表—1.1 余震の発生日時、場所、震源深さ、マグニチュード(M)

No.	発震時	震央緯度	震央経度	震源位置	震源深さ	M
①	'95.02.03 20:36'55.4"	N34° 43.7"	E135° 16.0"	兵庫県南東部	12.3km	3.4
②	'95.02.18 21:37'33.9"	N34° 26.2"	E134° 49.0"	淡路島	15.9km	4.8
③	'95.03.05 10:04'28.8"	N34° 44.3"	E135° 14.5"	兵庫県南東部	13.2km	3.2
④	'95.03.30 14:24'48.3"	N34° 45.2"	E135° 17.8"	兵庫県南東部	12.6km	3.6
⑤	'95.04.22 08:19'02.9"	N34° 43.7"	E135° 16.5"	兵庫県南東部	11.9km	3.0
⑥	'95.05.04 05:53'16.7"	N34° 41.7"	E135° 11.2"	兵庫県南東部	14.7km	3.6
⑦	'95.05.08 02:36'13.0"	N34° 42.7"	E135° 12.9"	兵庫県南東部	13.8km	3.3
⑧	'95.06.16 07:55'50.6"	N34° 45.8"	E135° 17.7"	兵庫県南東部	12.5km	3.8
⑨	'95.06.23 22:19'22.7"	N34° 45.5"	E135° 17.4"	兵庫県南東部	13.2km	3.7
⑩	'95.10.14 02:04'05.7"	N34° 37.0"	E135° 06.0"	大阪湾	17.0km	4.8
⑪	'97.05.14 02:37'	N34° 42.0"	E135° 12.0"	兵庫県南東部	13.0km	3.5

1.3 測定結果

表—1.1 から明らかなように兵庫県南部地震の余震は、主として兵庫県南東部を震源とする 3-5 gal 程度の地震であった。測定位置から最も遠い淡路島の震央位置②(測定位置から約 47 km)と、測定位置の直下に近い震央位置③(測定位置から約 2.5 km)と震央位置⑦(測定位置から約 1.8 km)の、それぞれを震源とする地震波に対して得られた加速度波形と加速度応答スペクトルを、一例として図—1.2 に示す。



図—1.2 加速度波形と加速度応答スペクトル

1.4 結果の考察

図—1.2 に示す加速度波形から明らかなように、震源が最も遠い淡路島の震央位置②の地震に対する加速度波形は水平動(NS 成分)が最も大きく、上下動は最も小さい。また、卓越周期も 0.25 秒程度であり、振動数は約 4 Hz 程度である。すなわち震央から 47 km 離れた位置では、通常の地震の加速度波形と同様であることが分かる。一方、震源が測定点のほぼ直下にある震央位置③及び⑦では上下動が最大であり、卓越周期も③は 0.1 秒、⑦は上下動については 0.05-0.15 秒の間がほぼ同程度の加速度応答を示している。いま、卓越周期を 0.05 秒とすれば振動数は約 20 Hz となる。なお、図に示す加速度応答スペクトルは卓越周期が 0.05 秒以下のデータが記録されていない。(サンプリング周波数の関係と考えられる。) 従って、20 Hz よりさらに高い周波数の上下動が存在した可能性は否定できない。これは、余震時に振動と同時に「ドーン」と言う音が聞こえたことを考えると 20 Hz 以上の高周波が存在したことは容易に想像がつく。さらに、震源が直下にある場合、振動と同時に音が聞こえることは、地震波が P 波(粗密波)であることを意味している。因みに人間の可聴音域は 20 Hz 以上であり、それより低い振動は聞こえない。) なお、震源が直下にある場合の振動と音は、直下で行われるトンネル掘削時の発破によって発生する振動と音(振動と同時に音が聞こえる)と酷似している。震源が測定点のほぼ直下にある震央位置③及び⑦においては、初動として衝撃的な上下動が測定位置に到達し、それによってトリガ

一が作動して記録が取られている。なお、詳細なデータは省略するが、測定位置のほぼ直下に震源がある場合の震央位置①④⑤⑨の場合も、震央位置③及び⑦とほぼ同様の加速度波形が記録されている。これらの震央位置は図—1.1 から明らかなように、全て震央が測定位置から 10 km 以内にある場合である。それ以上離れている震央位置⑩(測定位置から約 15 km)では、初動は上下動が明らかに大きい、主動では水平動が上下動より若干大きくなっている。これはS波による振動が、P波による上下動より大きくなっていることを意味するものと考えられる。そして、更に遠い震央位置②の地震については通常の地震波形となっている。

1.5 結論

上に述べた考察の結果から明らかなように、震央が測定位置から 10 km 以内の地震においては、初動に衝撃的な大きな上下動が存在し、特にほぼ直下に近い震源を持つ地震に対しては高周波の強烈な衝撃的上下動が記録されている。しかし、震央が測定位置から約 15 km 離れた震央位置⑩の地震は、初動の上下動は水平動より大きい、主動では水平動が大きくなる。一方、測定位置から約 47 km 離れた淡路島を震源とする地震では通常の地震波形となり、初動及び主動共に水平動が大きくなる。そして高周波成分は小さい。要するに震央距離 10 km 以内の地震においては衝撃的な上下動が存在するが、震央位置⑩(測定位置から約 15 km)の地震については水平動が上下動より大きくなっている。そして、震央距離が約 47 km (震央位置②) の地震では初動、主動ともに水平動が卓越し、上下動の最大加速度は水平動の約 1/2 程度となる。すなわち、震央が遠くにある一般的な地震の加速度波形と同様になることが分かる。これは、衝撃的な短周期の波動は減衰が早く、震源から遠くに伝播する間に減衰してしまい、減衰の少ない周期の長いS波が遠くまで伝播することによると考えられる。なお、地表面下 10 m と地表との最大加速度応答倍率は水平動で 2～3 倍、上下動では初動付近において 2 倍程度であった。

今回、計測を行った兵庫県南部地震の余震においては、上下動の加速度の最大値は初動付近に生じ、立ち上がり時における 1 サイクルの周波数は少なくとも 20 Hz が記録されている。さらにサンプリング周波数の関係で記録が得られなかったが、それ以上の高周波が存在した可能性は否定できない。なお、余震時には、発破のように振動と同時に音が聞こえたことから、震動 (P波) は最低でも可聴域周波数の 20 Hz 以上はあったと考えられる。しかし、これらの結論は余震に対して得たものであり、本震では異なる波動特性が存在したかも知れないとの指摘もある。

謝辞：ここに示したデータは神戸大学工学部建設学科櫻井研究室と (株) フジタ技術研究所が実施した共同研究によって取得したものであり、2 年間にわたり計測を担当頂いたフジタ技術研究所の斉藤悦郎氏にこの場をお借りして心からお礼を申し上げます。

(文責 櫻井春輔)

2. 被災事例と海震および証言に基づく鉛直地震動

2.1 はじめに

構造物等を損壊さす衝撃的な鉛直地震動については、その地震波が地震計で正確にまだ観測されていないので、その特徴を把握するには構造物等の被災状況はもとより海震の事例や体験証言等の内容を丁寧に調べることになる。平成 27, 28 年度の共同研究グループの活動として土木学会関西支部から承認される前に、任意の研究グループ（代表：櫻井春輔神戸大学名誉教授，2011.4 発足）の活動を始めた。活動成果の一部は 2012 年(平成 24 年)から土木学会関西支部と近畿地方整備局（関西）の研究発表会等¹⁻³⁾で、2013 年から安全工学シンポジウム（東京）でも毎年発表⁴⁻⁶⁾しており、翌年には土木学会全国大会でも発表した⁷⁻¹⁰⁾。

兵庫県南部地震での橋脚の被災状況と海震や陸上の被災者の体験証言から、構造物を損壊さす衝撃的な鉛直地震波には、地震の発生初期から主震動の最中に起きる波と、主震動より後に到達する波の 2 種類があることがわかった。後者の波は局在波だが強烈な破壊力を持つ特徴があり、従来の地震波の概念にはない新しい波の発見ともいえる。しかしその出現と形態的な特性から正確には把握（観測）しにくい波であることもわかった。

平成 27 年度には前述の関西で二ヶ所、東京で一ヶ所の発表¹¹⁻¹³⁾をしていることに加えて、日本地震学会秋季大会 2015・阪神淡路大震災 20 周年記念大会（神戸）において関連する 3 題の発表¹⁴⁻¹⁶⁾を行い、衝撃的鉛直地震動の現象に関する関心を高めることができた。

平成 28 年 4 月中旬に熊本地震が起き、衝撃的な鉛直地震動によると思われる特徴的な破壊事例¹⁷⁾や現象がいくつか見られたが、その現象に留意した報道や報告はされなかった¹⁸⁾。こうした現状に対し、この問題の地震波の特徴を従来の波と区別することと、その認識を深めてもらうために“後発鉛直キラーパルス”と便宜的に呼ぶことにした。そして地震計で観測するには地震(短期)予知の実用化が必要になることから、破壊事例や現象の特徴を発表^{19,20)}してきた内容を少し変えて、地震予知の話題を近畿地方整備局の研究発表会と日本地震学会秋季大会 2016（名古屋）で発表した^{21,22)}。

破壊力を持つ衝撃的な鉛直地震動の現象に関連して、近畿地方整備局等では 5 年に亘り、日本地震学会秋季大会では 2 年に亘り発表してきた内容が、徐々に関係者に知られてきている。たとえば日本地震学会と災害情報学会とで共同の勉強会²³⁾が開かれており、文部科学省の地震調査推進本部では地震研究の 5 ヶ年の基本計画に対して、その評価を含むアンケート調査²⁴⁾が事業年度の半ばの昨年末から今年初めにかけて行われている。こうした動きは破壊力を持つ衝撃的な鉛直地震動の存在が認知されようとしている事を示唆している。

このようにこの共同研究グループの活動の成果の一端は、地震学会の関係者だけでなく、今後その影響は他の関連分野にも広がっていくことが予想される。そこで本章では衝撃的な鉛直地震動の現象に関して、この 2 年間に発表した論文^{11-16,19-22)}を中心にその要点を整理すると共に、現時点での資料的な意味を補強して纏める。なお、紙面等の都合で割愛した証言や重要な資料等の一部は本章末尾の補足資料に編集し、その他は巻末に関連した発表論文として纏めていますのでご参照ください。

2.2 海震に関する資料等からわかったこと

2.2.1 海震の年表と現在の問題点

破壊力を持つ衝撃的鉛直地震動はその波形が地震計でこれまで正確に観測されていないため、また高周波の地震波は距離により減衰しやすいので、陸の地震関係者の間では阪神淡路大震災(1995)までは構造物を破壊する衝撃的鉛直地震動の現象はないと考えられてきた。阪神淡路大震災では破壊された構造物の中に、衝撃的な鉛直地震動によると思われる破壊形態を示す例が多くみられたが、それらは例外的な破壊として近年まで顧みられることが少なかった。ところが海上で地震に遭遇すると海震といわれるのだが、海震の事例を調べている時に、船舶工学の専門家から“海震で船舶が損壊するときの地震波は疎密波だということは常識である。”と指摘された。

これは衝撃的鉛直地震動の現象に対する陸上の関係者と船舶工学者とで、認識に違いがあることを端的に表す言葉なので、近畿地方整備局で発表した 5 ヶ年に亘る論文^{2,5,8,12,21)}では、海震の話題を毎回扱いこの言葉を紹介した。しかし今一つ印象に残り難いきらいがあった。また地震学会での発表の短い時間では、構造物の特徴的な破壊形態の説明より、海震の事例を説明する方が遥かに効果的なことがわかり、この点を補強する意味で「海震の年表と現在の問題点」の資料を纏めた。この資料の長所は海震の事例を年表的にわかりやすく纏めた事他に、以下に示す要点を記載している事にある。

（震度階級表(ルドルフとジーベルグの 2 種類)と「海震の年表と現在の問題点」を補足資料に収録する。）

- (1) この年表の元の文献「気象」(1978)の佐藤孫七氏の記事には次の重要な事柄が書いてある²⁵⁾。
- ・著者の知る範囲で嘉永・安政の頃から当時迄の約120年間に海震の記録は150件もある。
 - ・ルドルフの震度階級表(1898)には実例が添付されており、‘船体破壊強震動’階級10に該当するものが222回の中7回の記録があったことは注目すべきと思う。
 - ・海震を受けた場合は、直ちに損傷の有無を十分に調査する必要がある。船体で感じる震動は、弾性波(疎密波)による上下動が主であり、これに直角に対する船底部が最も強く衝撃を受ける。この伝播振動で船底の取り付け部や、比較的弱い組み立ての各計器、特に大切な操舵機、スイッチの接続部などは詳しく点検したい。
- (2) 「気象」の記事では地震の疎密波が船底に衝撃を与え、それが船舶破壊をもたらす認識の元にかかれている。特に操舵機器に対する指摘は重要で、疎密波の影響はかなり以前から知られていた事がわかる。
- (1) 大型タンカーでの航海機器全損・船殻補強材座屈の事例(1969)と、潜水艦の事例(1974)は「気象」には書かれてないが、潜水艦には大型タンカーの事例は致命的なので、海震の印象を切実にしている。

以上の要点を踏まえて現在の問題点を次のように指摘している。

○現在の問題点：海震には年表に示すような経過があるのだが、地震時疎密波が船舶に大きな影響を与えることがあることについてあまり知られていない。肝心の地震関係者等に海震の情報が共有されていないのである。この分野間の情報共有の欠落状態をもたらした環境と、必要な情報が伝わらない点に大きな課題と問題点が潜んでいる。

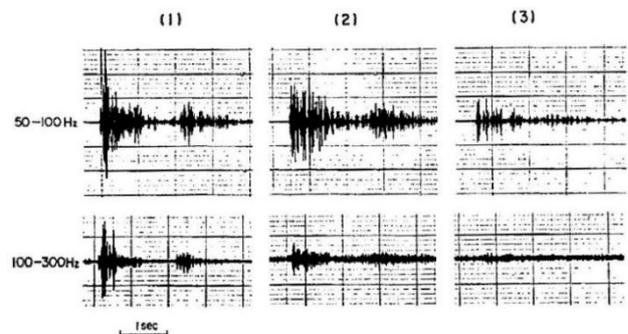
2.2.2 海震の観測例と伝承的な事例

(1) 海震の観測例

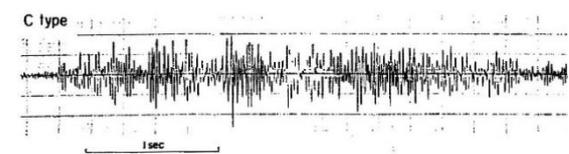
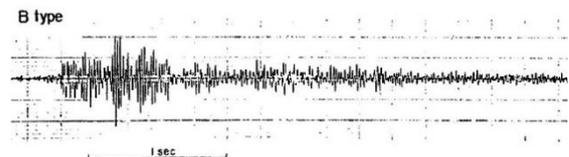
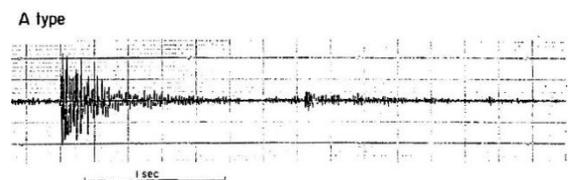
図2.1と図2.2は伊豆半島東方沖地震(M6.7, 1980.6.21)の余震を、ハイドロホンで茂木清夫先生達が観測^{26,27)}した時の場所と、断層位置と観測頻度の関係を示す。

図2.3と図2.4はその時の代表的な観測波形の記録で、図2.3は周波数帯別の同時観測記録で、浅発型、中間深さ型、深発型の3種類に分けてある。図2.4は50~100Hz帯の詳しい波形図である。この観測では周波数の分析がされていないため²⁸⁾、この図のB,C(中間、深発型)から目読で卓越周波数は60~70Hzとした。A浅発型ではより高周波の波になっている。この周波数帯の波は従来の地震計(20~30Hz以下)では記録されない波である。

この観測時には大きな余震が続いたため、船を突き上げるような海震をたびたび感じてい



(1)浅発型, (2)中間深さ型, (3)深発型の3分類
図2.3 海震の観測波形(周波数帯別同時観測)²⁶⁾



横棒長さ=1秒

A浅発型, B中間深さ型, C深発型の3分類

図2.4 海震の観測波形(3分類の詳しい波形)²⁶⁾

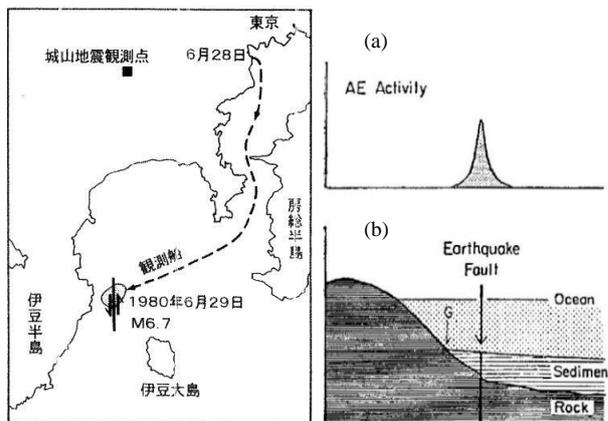


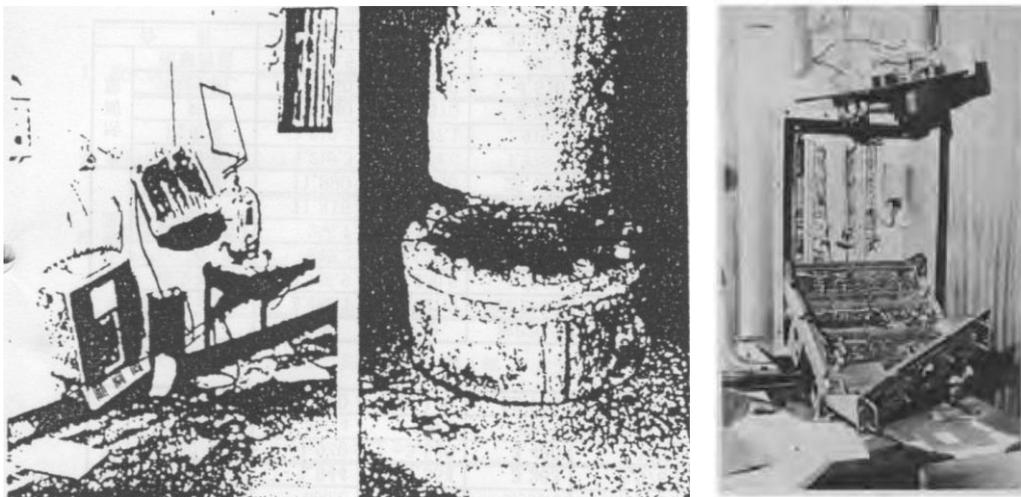
図2.1 海震の観測位置²⁹⁾ 図2.2 断層位置と海震の頻度²⁶⁾

表 2.1 海震の体験例(昭和 8 年三陸地震 1933.3.3)
(馬場栄一氏の資料 31)に文献 30)を参照し加筆)

	船名	トン数	状況
1	もんでびあ丸	9,700	エンジンの racing のような強い振動 4 分間.
2	小倉丸	7,270	激動、3 分間.
3	摩耶丸	3,145	激動、3 分間. 全速でエンジンを後退したよう.
4	平安丸	11,500	上下の激動、5 分間、羅針盤が跳び出すかと思うほど.
5	得撫丸	220	強烈な振動、1 分間.
6	誠進丸	50	上下の激動、5 分間、船が折れるかと思うほど.
7	東星丸	5,484	激動、3 分間. 2 秒、その後 2 回の微動. (余震)
8	光洋丸	8,000	強い上下動、3 分間. (余震)

表 2.2 海震による損壊例
(馬場栄一氏の資料 31)と文献 25,30,33)から作成)

	日付	船舶	場所	状態
1	1894.7.23 (明治 27 年)	ドイツの帆船 エンリエッテ号	ノルウェイの ロフ オテン諸島沖	強烈な海震(2 分間) 約 2 時間後に沈没
2	1952.11.5 (昭和 27 年)	米国貨物船 8000GT	カムチャッカ沖	M8.25~8.4 の地震、ハッチ コーミングの両側に亀裂 (横浜で修理)
3	1969.2.28 (昭和 44 年)	タンカー 32,500T	ジブラルタル沖 西方 450km 水深 4900m	M8.0 の地震、船殻補強材 座屈、航海機器全損、パイ プ系破損 (写真- 参照)
4	1995.1.17 (平成 7 年)	フェリーおおさか (9,000T 級)	播磨灘沖 (震央距離約 28km) 水深 30m	M7.2 の地震、強烈な上下 震動、吹抜け部のシャン デリア 2 個落下



(a)備品の落下(1)³¹⁾ (b)配管の切断³¹⁾ (c)備品の落下(2)³²⁾
(3.25 万トン・タンカー、ジブラルタル沖地震、M8.0、1969.2)

図 2.5 海震による損壊例

るが²⁹⁾、同時期に発生していた群発地震ではこのような波は記録されていない²⁹⁾。図 2.3 と図 2.4 の波形図は他に観測した例が少なく貴重な波形図になっている。

(2) 海震の伝承的な事例と船舶の損壊例

海震の古くからある伝承や体験^{25,30)}の代表的な事例が昭和 8 年の三陸地震で、その時の海震の体験を纏めたものが表 2.1 である。船舶の損壊を伴う事例を纏めたものが表 2.2 と図 2.5 である。共に重要な事例であり、表 2.2 には兵庫県南部地震の事例³³⁾を追加している。表 2.1 と表 2.2 の事例は海中を伝播してきた粗密波が、機材等を壊す強烈な破壊力を有していることを示しており、表 2.1 には前項で述べた事例と同じく余震でも生じている例がある。

2.2.3 明石海峡での地震の重要な証言と考察

兵庫県南部地震での地震の証言から重要な事実が得られたのでそれらの要点と考察を以下に述べる。

図 2.6 は地震発生時の旅客船の位置図³⁴⁾の一部で、明石海峡付近を示す。

播磨灘沖を航行中の「フェリーおおさか」(震央距離約 28km)では吹抜け部のシャンデリア 2 個が落下破壊³³⁾した(表 2.2 に追記)。この事は震源域近くでは強い疎密波が生じることを示唆している。

図 2.7 は明石海峡を航行中の図 2.6 の「あさぎり丸」(千トン級)と「クィーンダイヤモンド号」(九千トン級)の詳しい位置図²⁾を示す。両船長の証言³⁵⁾は重要なので要点を抜粋する。

* 「あさぎり丸」の船長(向所彊氏)の証言の要点; 『衝撃的な上下動に見舞われ、一瞬操船困難に陥った。なんとかエンジンを止め、点検を指示し、機関部からの異常なしの返事と一等航海士の報告を受けて、再びエンジンの回転を挙げようとした時に 2 度目の衝撃がきた。船底にダメージを受け、潜水艦とぶつかったかと思った。』

* 「クィーンダイヤモンド号」の船長(新村成敏氏)の証言の要点; 『上空に青白いせん光を見て突き上げられて、大きな波に翻弄された瞬間、海面で船底をたたくウォーターハンマーより数倍激しい衝撃に襲われた。』

両者の証言で重要な点は、衝撃的な波動を 2 度受けており、2 度目の方が遙かに強烈な衝撃を受けている点である。証言集³⁵⁾には陸上部で本震より後に、2 度目の大きな衝撃的な上下動を受けたり目撃した証言が 18 例ある。

ところで、当時は火災の煙がまっすぐ上がる無風に近い気象状態で、海面に大きな波はない筈なので、後者の証言の大型船が大きな波に翻弄されて、激しい衝撃に襲われたという状況に着目して考察する。

図 2.8 はこの地震が起こした津波に関する文献³⁶⁾にある検潮所の記録からその波源域を推定した図の一部である。この中の東二見と泉北検潮所の図柄から波速を求めると約 700m/分になる。図 2.7 の「クィーンダイヤモンド号」の離岸距離は約 2km である。地震の主震動で海岸が揺れて、海面に起きた表面波が伝わり船体を揺らしたと考え、主震動の 3 分弱後に衝撃を受けたと推定できる。この考察の時間間隔は、「あさぎり丸」で 2 度目の衝撃を受ける迄に行った点検の所要時間に馴染む間隔で非常に注目される。

(両船長の証言は全文を補足資料に収録する。)

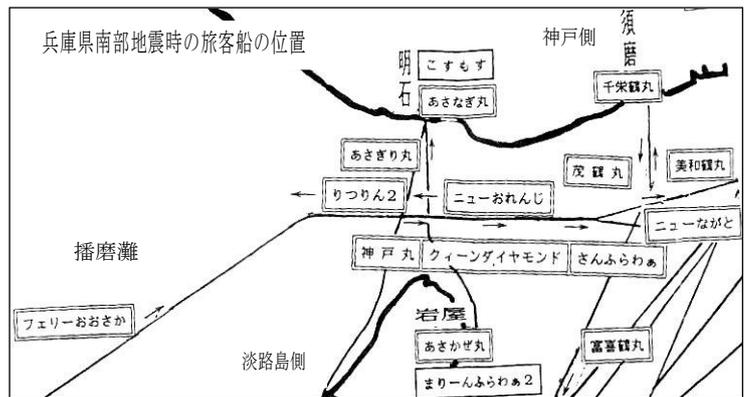
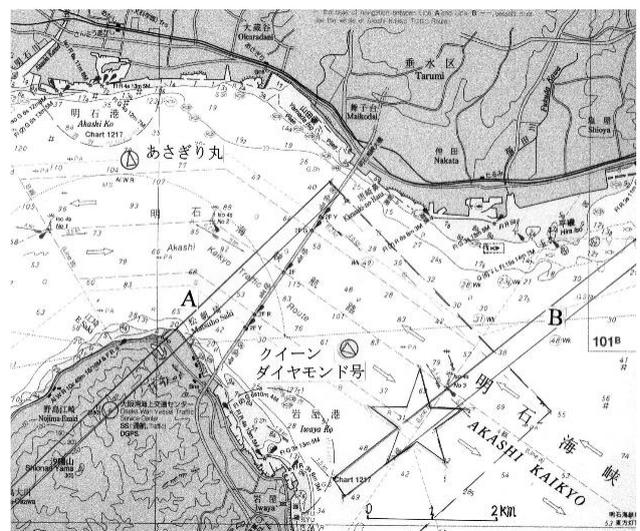


図 2.6 フェリーの位置図³⁴⁾ (文献 34)の位置図の一部を編集)



(☆ 震央, A 野島断層, B 須磨断層)

図 2.7 クィーンダイヤモンド号とあさぎり丸の位置²⁾

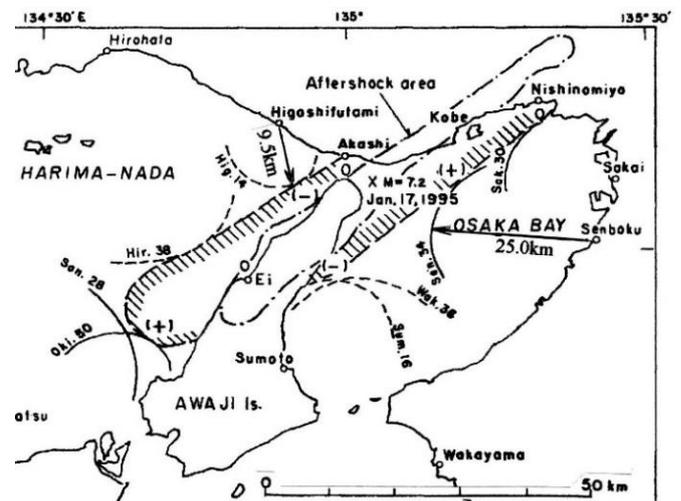


図 2.8 波源域の推定図³⁶⁾(波速の推定測線を加筆)

なお、河田恵昭先生の話の文献(37)には、大阪湾にいた漁船の中に衝撃を2度受けたものがあるとの記載がある。しかし「サンフラワー号」(一万二千トン)の船長の報告(33)には、1km 余り西方にいた後続の「クィーンダイヤモンド号」のような2度目の衝撃の話は書かれていない。須磨沖を航行中や青木港接岸準備中のフェリーにも2度目の衝撃の話はなく(33)、強烈な2度目の衝撃は限られた場所で起きていると推測される。

2.2.4 被害をおよぼす海震の特徴のまとめ

船舶に被害を及ぼす海震の特徴を、上記の考察を踏まえて書き直すと次の通りになる。

1. 地震発生初期に到達するP波に比べ、海震の波は船を損傷さず破壊力を持つことがある。
2. 海震の疎粗密波(縦波)が船舶を損傷さす事は船舶工学では常識である。
3. 海震の周波数は60~70Hz程度が観測された例があり、このような波は従来の地震計では記録されない。また、余震毎に何度も発生している。
4. 強烈な2度目の衝撃的な海震の波は、いくつかの限られた場所で起きている。
5. 海震の強烈な衝撃的な波は本震の後、3分頃に生じる場合がある。

2.3 橋脚の破壊状態が示す衝撃破壊の特徴

本節では近畿地方整備局で発表した論文(2,5,8,12,21)の阪神高速神戸線の橋脚破壊事例の中で、最も衝撃破壊の特徴を表している事例が発生した弁天工区とピルツ橋工区の事例に着目して特徴を説明する。衝撃破壊の特徴はRC 橋脚に対して引張破壊と圧縮破壊を起こすことに現れ、弁天工区においてはその両者が生じた。弁天工区でのRC 橋脚の引張破壊事例に対しては、爆裂的な破壊の様相が想像されたので、単に引張破壊と表現するより特徴を強調して爆裂破壊と表現してきた。そこで本節では弁天工区で起きた引張破壊の事例についてはより詳しく紹介することにする。

2.3.1 弁天工区での橋脚の衝撃破壊の特徴

(1) 本工区の構造の特徴

弁天工区は神戸市中央区波止場町から弁天町迄の区間約650mの区間である。この工区の構造の特徴は復員17.6mの高架橋を支える橋脚の横梁をなくし、



図 2.9 代表構造写真³⁸⁾



(横桁方向に見る)
図 2.10 支承側面³⁸⁾

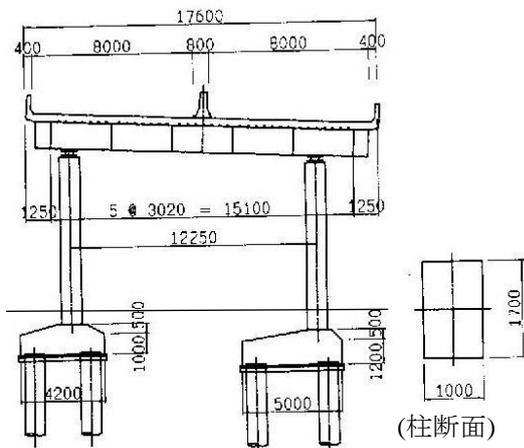


図 2.11 単独 RC2 本柱区間の代表的横断面図³⁹⁾



←(a)西面 (b)南面↑

局部座屈鉄筋の露出(P460 橋脚南面)³⁸⁾
図 2.12 RC 橋脚下部 西面の X 型亀裂⁴⁰⁾



*斜めひび割れの他に、曲げによる細かい引張りひび割れが水平方向に多数発生

図 2.13 比較図 RC 柱両振載荷実験⁴¹⁾
(鉄道総研)

橋桁の横梁を剛な梁にして主桁と剛結した構造で、非合成 RC 床版・3 径間連続鋼 I 桁を基本構造としていた。その剛な横梁を 2 本の RC 単独柱の橋脚で支える区間である。図 2.9 に代表構造の写真³⁸⁾を、図 2.11 に代表断面図³⁹⁾を示す。柱は横断方向の制約から幅は 1 m に統一してあり、橋軸方向の幅が荷重により変化している。柱上端の中央に支承版支承が一個設置してある(図 2.10 参照)。類似の 2 本柱の橋脚が 25 基(P455~P479)あり、平均径間長は約 27m である。この区間で兵庫県南部地震により橋脚に 2 種類の特異な破壊が生じた。

(2) 柱の軸圧縮破壊

図 2.12(a)は P460 橋脚(山側)西面の柱下部に生じた X 型の斜め亀裂を示す⁴⁰⁾。図(b)は柱の南面で、斜め亀裂の先端の位置に、局部座屈した鉄筋が局部的に、柱両脇のコンクリートを残して露出している³⁸⁾。この状態は軸圧縮破壊での、斜めせん断破壊面のズレが始まり、南面の鉄筋を曲げかけた状態を示している。いわゆる柱の典型的な軸圧縮破壊の初期状態を表している。

図 2.12 の状態を曲げ破壊とする方もおられた。曲げ破壊ならば図(b)に示す局所的な鉄筋座屈は生じない。また図 2.13 の実験結果⁴¹⁾が示す通り、曲げに伴う細い水平ひび割れを生じるがそれがない。

軸圧縮破壊が進んで崩壊した例が P472 と P477 橋脚にあり、図 2.14 に両橋脚の遠景を示す⁴⁰⁾。図 2.15 に両橋脚の山側の柱基部が軸圧縮破壊をした状態を示す³⁸⁾。なお両橋脚では海側の柱は頭部が次項で述べる爆裂破壊をして、同じ橋脚位置の 2 本の柱で破壊形態が違う橋脚である。

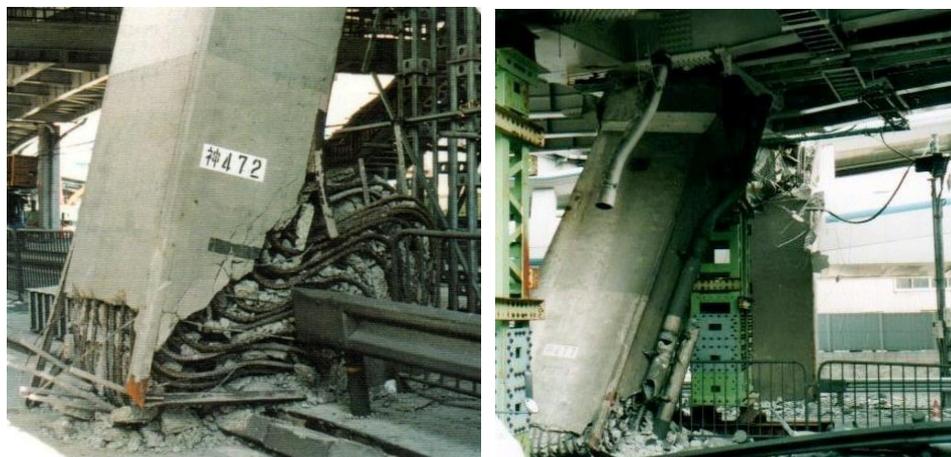
概算では静的な力で柱を軸圧縮破壊するには自重の 15 倍程の力がある。そんな力が上の橋桁から働けば支承回りや横桁が変状する筈だがそうになっていない。同じ断面の 2 本の柱で破壊形態が違う状態は、水平震動では説明がつかない状態である。これは破壊のメカニズムが違う事を意味している。

(3) 柱頭部の爆裂破壊の典型例

図 2.16 に P465 橋脚山側の柱頭部の破壊を 3 面から見た状況を示す³⁸⁾。図(a)は西面で、図(b)は東面である。図(b)では直立した鉄筋籠が露出しており、中のコンクリートが一部なくなり向こうが透けて見える⁴²⁾。図(C)は南面で鉄筋籠の中に落ちた下沓が見える。帯筋は西面でははずれかけているが東面では残っている。これらの図で柱は上側が横桁で塞がれている。中のコンクリートは塞がれる前に短



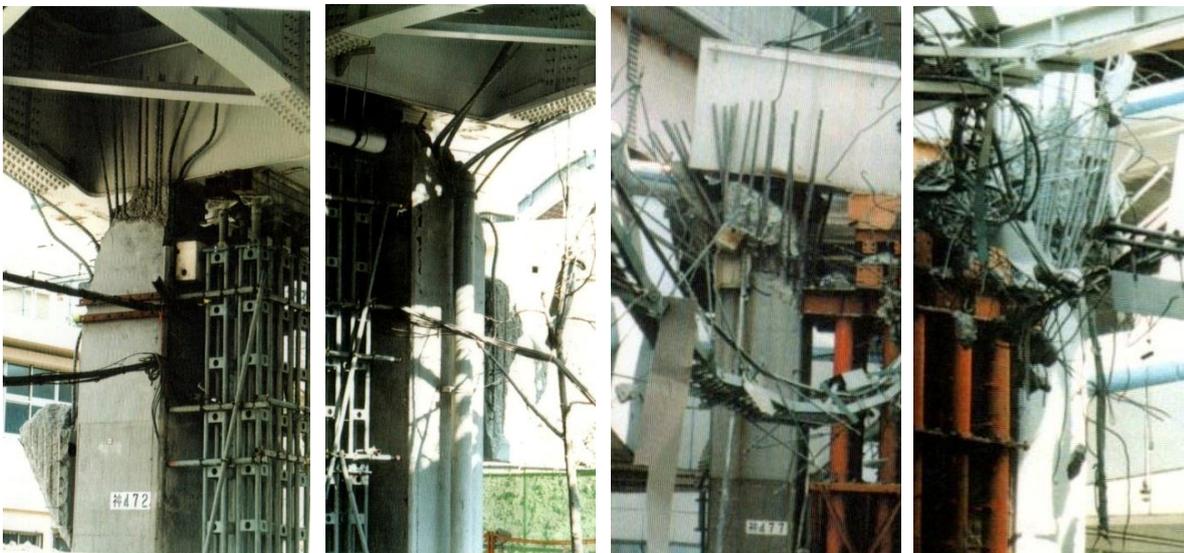
(a) P472 橋脚⁴⁰⁾ (b) P477 橋脚(山側柱は南に傾斜)⁴⁰⁾
図 2.14 基部軸圧縮破壊と頭部爆裂破壊が生じた橋脚



(a) P472 橋脚 (b) P477 橋脚
図 2.15 柱基部の軸圧縮破壊の例(いずれも山側の柱)³⁸⁾



(a) P465 山側柱(西面)³⁸⁾ (b) P465 山側柱(東面)⁴²⁾ (c) P465 山側柱(南面)³⁸⁾
 図 2.16 柱頭部爆裂破壊の典型例 (その 1)



(a)P472 海側柱(東面)⁴²⁾ (b) P472 海側柱(西面)³⁸⁾ (a) P477 海側柱(東面)³⁸⁾ (b) P477 海側柱(西面)³⁸⁾
 図 2.17 柱頭部爆裂破壊の典型例 (その 2) 図 2.18 柱頭部爆裂破壊の典型例 (その 3)

時間で飛び出したと推定される。このような事は水平動ではあり得ない。中のコンクリートが短時間で飛び出しているの、このような破壊を爆裂破壊と呼ぶ事にした。

図 2.17 と図 2.18 は図 2.14 で紹介した 2 橋脚の海側の柱上端の破壊状況を示す^{38,42)}。いずれも上端 1.5m程のコンクリートが破壊され、図 2.17 ではその位置まで横桁が落下し、図 2.18 では破壊部の下半分のコンクリートが残り、そこまで横桁が落下している。ここで注目されるのは両図の図(a)の柱東面の鉄筋はまっすぐに裸で直立している事である。鉄筋が直立している区間ではせん断力を受けていない事を示している。この両図が示す破壊は水平動で起きたのではない事を表している。なお両図の図(b)は柱の西面の状態を示している。横梁に柱の鉄筋が当たり曲がり具合が両図で違うが、鉄筋に直線区間が残っており不自然さはない。

図 2.16 から図 2.18 に示すように柱頭部の裸鉄筋を直立させた状態で、内部コンクリートを飛ばす破壊は水平動では起こりえない。このような破壊形態を爆裂破壊としており、これらの 3 事例は爆裂破壊の典型例である。そして柱頭部の裸鉄筋が直立している状態は、この状態で主震動を受けたら鉄筋は直立していることはできないので、この破壊は主震動の後から生じたことを表している。前節で述べた海震の強烈な疎密波が主震動の後で起きた現象と整合して大変重要なことを意味している。

図 2.14 の P472 と P477 橋脚では海側と山側の柱で異なる破壊形態をしていた。破壊の程度の極端な差やモードが異なる破壊が隣り合って生じる事は衝撃破壊の特徴といえる。すなわち図 2.16 から図 2.18 に示す柱頭部の破壊は、強烈なエネルギーを持った衝撃的な鉛直波動によりコンクリートが飛ばされて生じたと考えられる。

(4) 爆裂破壊のすさまじい例

図 2.19 は爆裂破壊のすさまじさを示す例である⁴⁰⁾。右手前の柱が P458 橋脚の海側柱の西面で、柱の上半分のコンクリートが完全に破壊して、鉄筋は 3m 余りも裸状のものがある。図 2.20 は P458 橋脚の海側柱の北面で、壊れた柱と横梁の間にセットボルトが付いている支承が見える⁴³⁾。

図 2.19 の中央部左手に壊れた P457 橋脚の海側柱がある。図 2.21 は壊れた P457 橋脚の海側柱を道路の北側の歩道から見た写真である⁴⁴⁾。その壊れた柱頭部に大きなコンクリートの塊が見られ、どちら



奥にある P457, P456 の海側柱は P458 と 3 基連続して壊滅的に破壊(西より見る)
図 2.19 P458 橋脚(海側)柱の破壊状態(右側手前)⁴⁰⁾



支承のセットボルトが残存
横梁仮面の擦過傷が少ない
図 2.20 P458 海側柱の破壊状態(北面)⁴³⁾



神 P457(山)
中央の遠方奥に破壊した P456 橋脚の柱 2 基
図 2.21 P457 橋脚の状態(海側柱破壊, 山側柱軽傷)⁴⁴⁾

P457 海側柱単独の被災写真は未入手]



南側に傾斜?
図 2.23 P456 海側柱の破壊状態⁴³⁾



図の中央部の窪んだ部分で P456 橋脚が破壊
図 2.22 P455~P457 橋脚付近の状態⁴⁵⁾



北側に傾斜?
図 2.24 P456 山側柱の破壊状態⁴³⁾

かといえば柱の中間部が崩壊している。この柱の前後では海側の柱 3 基に連続して壊滅的な破壊が生じた。P457 橋脚の山側柱は写りが薄い損傷は軽微である。ここで注目すべきは P457 と P458 橋脚の海側は壊滅的な破壊をしているが、山側の柱の損傷はそれ程でもなく、海側と山側の柱で破壊程度に極端な違いを呈している事である。これは水平動では起きない破壊現象である。

図 2.21 の中央の遠方に最も破壊した P456 橋脚の影が見える。図 2.22 は P455～P457 橋脚付近⁴⁵⁾の状態、中央の橋桁が窪んだ所の下に破壊した P456 橋脚がある。図 2.23 は P456 橋脚海側柱⁴³⁾の破壊状態で、写真の柱は南に傾いており、柱の頭部と基部が壊れたように推測されるが、詳しくはわからない。

図 2.24 は P456 橋脚山側柱⁴³⁾の破壊状態で海側の柱と似た破壊度合だが北側に傾斜している。この橋脚の崩壊が国道 2 号を封鎖したため、この崩落区間は早急に撤去された。そのためこの付近の被災資料は残されているものが少ない。

P456～P458 橋脚にかけての橋桁の落下状況は柱が大破しているにもかかわらず、図 2.20 の支承と少ない擦過傷(横梁下面)が示すように、元の水平位置をほとんど変えずにその位置で落下している。建築構造物での建屋内崩壊の様相を示していて、衝撃的な鉛直波動による柱の破壊であることを示している。前項で述べたようにこの破壊は主震動の後に生じていると想定される。

(5) 柱頭部の破壊の進展状況

次に柱頭部の衝撃的な鉛直波動による破壊の進展状況を調べる。

図 2.25 は図 2.22 の左手前に見える P455 山側柱頭部の損傷状況である⁴⁶⁾。支承が柱に埋まり、柱頭部のコンクリートが損壊して北面に損傷状況の片方が表れている。

図 2.26 はその状況がさらに進展して、柱頭部のコンクリートの小塊が横梁の下面と柱の主鉄筋に挟まれて、鉄筋の上端を外側に少し曲げている⁴⁷⁾。

図 2.27 は P463 の例で前の 2 例の中間の状況で、柱頭部の帯筋は一部が切れているが形を残している³⁸⁾。いずれも支承は柱頭部に埋もれている。

図 2.28 は P476 海側柱での破壊状況で³⁸⁾、図(a)の北面の損壊は上端の角だけなのに支承が見えない。図(b)の南面を見ると支承の下のコンクリートが、同じ幅の柱鉄筋を南方に折り曲げて抜け出し、同時に周辺のコンクリートを放射状に剥落させている。

水平動による破壊では支承の下のコンクリートが横に移動して、図 2.25～図 2.28 に示す事例のように支承がその位置で埋まることはない。図 2.25～図 2.28 に示すこれらの事例では、衝撃的鉛直波動の鉛直方向の力が上部工の鉛直反力に較べ十分に大きいと、柱頭部で上部工を少し持ち上げる爆裂的な破壊を生じて内部コンクリートを上方に飛び出さすが、鉛直反力に較べて小さいと柱側面の弱い面を水平方向に膨らます損傷を起こすことを示している。これらの事例は少し強いエネルギーを持つ衝撃的鉛直波動による破壊と考えられる。

そして強烈なエネルギーを持つ衝撃的鉛直波動は P457 海側柱(図 2.21)のように前後の橋脚で生じる例もあるが、多くは紹介事例の橋脚番号が表すように断続的に生じて局在波の現象を示している。

柱の頭部付近の損傷事例として支承が横梁の下フランジに食い込んだ事例が 3 例見つかっている。



図 2.25 P455 山側柱頭部の損傷状況 (図 2.22 参照)⁴⁶⁾



図 2.26 P459 海側柱頭部の破壊状況⁴⁷⁾



(a) 北面の破壊状況 (b) 南面の破壊状況
 図 2.27 P463 山側柱頭部の破壊状況³⁸⁾



(a) 北面の損傷状況 (b) 南面の破壊状況
 図 2.28 P476 海側柱頭部の破壊状況³⁸⁾



(a) P464 山側の支承 (b) P473 海側の支承 (c) P476 山側の支承
 図 2.29 橋脚の支承が横梁の下フランジに食い込んでいる例³⁸⁾

その状況を図 2.29 に示す³⁸⁾。この損傷は橋桁の複雑な上下振動との関係もあるので参考例として示した。箱桁内の鉛直補剛材がある側の部位でなくダイヤフラムがある側の部位への食い込みが目立っている。

2.3.2 ピルツ橋工区での橋脚の衝撃破壊の特徴

(1) ピルツ橋の倒壊の状況と軸圧縮破壊の痕跡

ピルツ橋の工区は神戸市東灘区深江本町にあり、コンクリート床版の橋桁の所定の路面構造と一本の橋脚が一体で作られ、きのこ型構造の特徴を持つ区間で延長は約 650m である。その区間に同じ形式の橋脚 17 基(P126～P142)が作られていたが地震で倒壊した。図 2.30 はその倒壊区間の東側の状況を示す⁴⁸⁾。

図 2.31 は倒壊した全区間を西側の低空から見た写真⁴⁹⁾を横向きにして、高欄線(白線)の上がり状況を際立たしている。この倒壊の原因は大きな水平震動によるとされているが、実情は異なるようである。

図 2.32 と図 2.33 は倒壊した柱の代表例⁴⁸⁾で、倒壊した柱の状態を 2 方向から見たものである。柱基部の破壊部は東西両面共に対称的で外側へのふくらみが少ない。このように全ての柱が倒壊すれば、

柱長さが短くなり高欄側面が大きく下がることはない。図 2.31 の区間中央部と左側 2 箇所で高欄線は大きく下がり、その場所の橋脚は P133, P134, P136, P140 の 4 基である。この 4 基に着目して柱基部の破壊状態の特徴を示す写真を、2 枚ずつ編集したものが図 2.34～図 2.41 である^{47,48)}。

図2.34と図2.35はP133橋脚基部の破壊状態を示す。柱基部の鉄筋は大きく全方向に湾曲して軸圧縮による提灯座屈の状態を示し、柱の長さを短くしており、その後北側に倒れている。

図2.36と図2.37はP134橋脚基部の破壊状態で、破壊部が北西側に拡大している(図2.37)。北東から南西方向に大きな割れが発達している。その割れに対し共役的な部位の、柱の南西面に大きな斜め割裂塊が見られる(図2.36)。

図 2.38, 図 2.39 と 図 2.40, 図 2.41 の 2 基では、柱基部の東面の鉄筋にコンクリートの破壊線に沿って鉄筋のクビレが分布しており、図 2.38 では白い破線を付けている。倒れる前にこの面で柱がずり落ちた事を表す。柱は北西側にずれ落ちて、その方向に破壊部が拡大し、北東から南西方向に大きな割



西側から東方を望む (図 2.31 も同様)
図 2.30 倒壊区間の東部の状況(P130→P126)⁴⁸⁾



白色の高欄線が極端に下がっている部分に着目
図 2.31 ピルツ橋倒壊区間の斜め航空写真⁴⁹⁾



図 2.32 倒壊橋脚の代表例 P132(西面)⁴⁸⁾



東西面共対称的な破壊形態、基部の外側へのふくらみ少なし
図 2.33 代表例 P132(南面)⁴⁸⁾



・基部の鉄筋が南側にも湾曲、コンクリートの破壊線が柱軸線に直角、基部の鉄筋は東西共外側に大きく湾曲
図 2.34 P133(東面)⁴⁷⁾



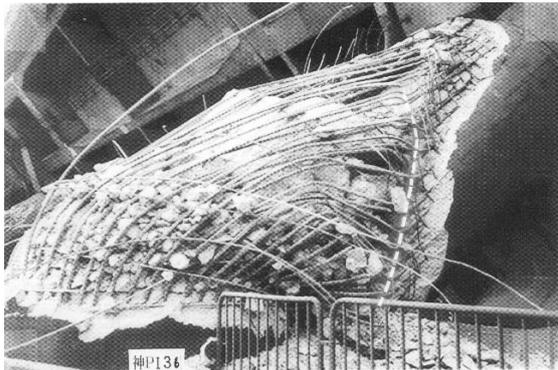
図 2.35 P133(南面)⁴⁸⁾・提灯座屈の痕跡



柱の南西面に大きな斜め割れ塊
図 2.36 P134(南西面)⁴⁸⁾・倒壊方向外の割れ



柱基部は北西側に着地，北東から南西方向に割れが発達
図 2.37 P134(南面)⁴⁸⁾・倒壊方向外の割れ発達



・引張域迄鉄筋の直角クビレが分布(白色破線)・ズレ破壊の痕跡，

図 2.38 神 P136(南東面)⁴⁷⁾・軸圧縮破壊の痕跡



・北東から南西方向に割れが発達・北西部に落下の痕跡

図 2.39 神 P136(西面)⁴⁸⁾



・コンクリートの破壊面に沿い鉄筋のクビレが分布・北東から南西方向に割れが発達・北西部に落下の痕跡
図 2.40 神 P140(東面)⁴⁸⁾・軸圧縮破壊の痕跡



図 2.41 神 P140(南面)⁴⁸⁾・倒壊方向外の割れ発達

れが発達している(図 2.39, 図 2.41).

すなわち，P134, P136, P140 橋脚の不等間隔の 3 基が北西側にずれ落ちたことが，柱の長さを短くして，全体を北側に倒壊さす直接の原因になっている．P133 橋脚も含め，このような破壊形態は水平震動だけでは生じない．これらの 4 基の破壊の痕跡は強烈な鉛直地震動により柱が軸圧縮破壊をしたことを表している．なお，既存の時刻暦応答解析（神戸海洋気象台の波形記録）の結果³⁹⁾は鉄筋が塑性域に入った段階(塑性率 3 程度)にしか至ってなく，柱は自重相当の荷重では軸圧縮破壊を起こさない．図 2.42 に参考として塑性率 3 程度の損壊をした柱の被災例を示す．この程度の損壊をしても自立した橋脚は多く存在した．ピルツ橋はこのような損壊状態に圧縮破壊が 4 基に加わり生じた．

(2) 住民と高速道路走行者の証言

付近の住民の証言を調べると次の証言がある．重要な証言なので要点を抜粋する．

*平岡満幸氏の証言³⁵⁾の要点；『(前略)・・・とても立ってはおられない，タンスが飛んできた。「もうあかんビルが倒れる」．妻を呼んだ．最初の揺れがおさまった．時計は 5 時 48 分．階下の孫二人が気にな



P607 の被災状況

図 2.42 塑性率 3 程度の損壊例³⁹⁾



図 2.43 ピルツ橋走行者桑原浩治氏の路面の描画⁵¹⁾

り屋外階段の踊り場に出て、降りようとした瞬間背後で大音響が、振り向くと・・・(中略)・・・高速道路が横倒しになってゆく。衝撃で体が浮き上がる、スローモーション映画を見ているようだ・・・(後略)』。

大音響がしたのは 5 時 48 分より後に屋外階段に出てからである。この大音響は衝撃的な鉛直波が到達したときの破壊音と想定すると、ピルツ橋の倒壊には衝撃的な鉛直波の影響が加わった事を証言は示唆している。さらに破壊は主震動の 3 分程後に起きていることが証言されており、5 時 46 分の地震発生後の 3 分程の時間差は、2 節で述べた海震の考察と呼応してくる。

高速道路の走行者の証言を調べると次の 2 名の証言（ピルツ橋区間の走行者・桑原浩治氏、2 径間落橋部に遭遇・福本良夫氏）⁵⁰⁾が見つかった。これらも重要な証言なので要点を抜粋する。

*桑原浩治氏の証言の要点；『道路がへびのように横にくねくねと揺れ、前輪と後輪が捻れるようでした。車は横にスリップし、十秒ぐらいしてから、今度は縦に震動し始めました。道路の継ぎ目が上に行ったり、下に行ったりした。』

図 2.43 はその時の様子を描かれた絵⁵¹⁾で、伸縮継ぎ手部で折れ、路面が上下変位をする状況が表してある。前の証言とは時間的な感覚の違いがあるが、主震動の後に鉛直震動が起きている現象が証言されている。同様の証言は 2 径間落橋部(西宮市浜脇町)に遭遇し、前輪がはみ出して止まった観光バスの運転手福本良夫氏の証言にもある⁵⁰⁾。

*福本良夫氏の証言の要点；『スピードは出ていませんでした。横揺れがきたので、とりあえず止まることと思いましたが、こんどは縦揺れで、道路が波打つんです。ブレーキをかけ、止まったとたん、前がバサッと落ちました。』

上記の 3 名の証言は大変に重要な証言である。ピルツ橋工区の倒壊は阪神大震災を代表する事例で、その倒壊原因がこれまで考えられてきた水平震動の影響だけではないことを、4 基の柱の破壊部の軸圧縮破壊の痕跡は表しており、その破壊は主震動より時間差をおいて生じたことが証言から判断できる。(補足資料には以上の 5 名の証言の他、局在波の現象の目撃証言も加え全文を収録する。)

2.4 新たな呼称：後発鉛直キラーパルス

強烈で複雑な鉛直震動の痕跡が図 2.44 に示す函館大学校舎の破壊例⁵²⁾にある。1 階の柱は右端部を除き全面的に崩壊し、校舎中央部の 8 パネルの間では 4 階建ての各階で柱が破壊している。それらが横方向にはらみ出していないことから、この破壊は主震動の後で起きていると判断できる。1 階といい、中央部の 4 階分といい、柱の崩壊状態が示す複雑さは単純な鉛直波動が起こす現象では理解できない。さらにこの事例は震源域からの距離が大きく、遠く離れて起きた事が局在波特有の現象と考えられ注目される。

これに似た現象が東日本大震災でも見られた。その例が図 2.45 に示す須賀川市内の RC 3 階建の柱が各階で破壊している⁵³⁾。この事例も局所的に生じている。

強力な鉛直地震動の存在を端的に示す資料が最近得られた、図 2.46 の庭からの跳び笠石⁵⁴⁾と図 2.47 のタンクのダイヤモンド座屈⁵⁵⁾の写真である。図 2.46 の庭の屋敷の母屋は全壊しているが、周囲の建物の被害は少なく、母屋を壊し庭の笠石を飛ばした鉛直波動は局所的に生じている。図 2.47 のタンクの所在地は東灘区深江浜町で、この地区で記録された水平加速度の値程度では座屈は生じない検討資



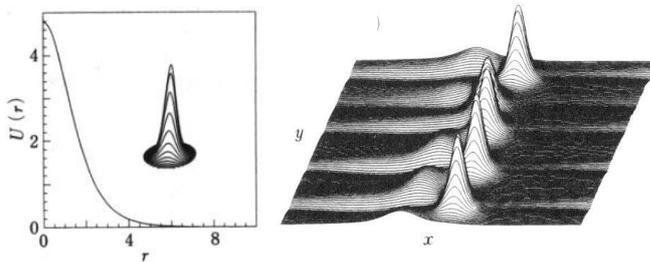
・1階は右端部を除き全面破壊・中央8パネル間の柱は全階で破壊
 図 2.44 函館大学校舎の被災写真(1968)⁵²⁾



図 2.45 RC 3階建社屋の崩壊(須賀川市・2011)⁵³⁾



図 2.46 庭からの跳び笠石⁵⁴⁾



(a) 切断図と立体図 (b) 列状の発生例
 図 2.48 釣鐘型孤立波の例 (ソリトン)⁵⁷⁾



図 2.47 タンクのダイヤモンド座屈⁵⁵⁾

料がある⁵⁶⁾。

前節迄に述べた海震と橋脚の破壊事例から、強烈な鉛直地震動は主震動より 10 秒～3 分程遅れて到達しており、その生じ方は場所により連続した破壊を起こす事例もあるが、図 2.16～図 2.18、図 2.36～図 2.40 の例のように、多くは隣り合う橋脚で異なる破壊程度や形態を生じさず局在波的特徴がある。その地震波は主震動が痛めた構造物をさらに破壊する波で、波の立体的なイメージは、エネルギーが局所的に集中した局在波の形態で、図 2.48 に示す釣鐘型の孤立波や列状の形が想像される^{20,21)}。

図 2.48 に示す波は数学的にはソリトンと呼ばれる波の一種である⁵⁷⁾。このような形態の波は従来の地震波とは、特に波の空間的な規模が全く異なる波である。到達する時刻もずれているので発生原因も異なることが予想される。さらに図 2.44 の函館大学校舎の事例は 2 種類の非線形の波による破壊の可能性も示唆している。そこで従来の地震波とは区別し新たな特徴を持つ地震波の意味で、主震動の後から生じる強烈な鉛直震動を“後発鉛直キラーパルス”と便宜的に呼ぶことにした。

この“後発鉛直キラーパルス”はその出現形態が局在波なので、空間的な波の形や強度を正確に観測することは容易ではないと予想される。この波を正確に観測するには地震の短期予知が実用化されなくてはならなくなる。その手法について高エネルギー加速器研究機構 (KEK) での粒子加速器の運転管理で行っている地震の影響を避ける観測 (高精度周長変位計測, 超高感度傾斜計観測) を応用し、地殻の塑性化を検出することを昨年地震学会等で提案した²²⁾。兵庫県南部地震では傾斜計が塑性

化の兆候を検出して 5 日目に地震が発生した。この経験を南海巨大地震の予知に生かし、地震予知の実用化を確立することが望まれる。その内容に関しては参考文献 21,22)を参照ください。

2.5 まとめ

海震の現象は古くから知られていたのだが、海震の疎密波（縦波）が船舶を損壊さすエネルギーを持っていることは、船舶工学の専門家には常識なのに、その分野以外にはあまり知られていない。この状況は科学技術や情報伝達手段が進歩している現在の御時世からは思いもよらない状況といえる。

第 1 節では海震の年表の話題を取り上げ、海震の常識を広く再認識してもらおう趣旨でこの問題の所在を指摘した。

第 2 節では海震の代表的な既存の事例を紹介して、兵庫県南部地震での事例から、地震発生の初期に到来する衝撃的な波と、主震動の後に周辺や機器の点検をする程度の時間をおいて襲来する、2 度目のより強い衝撃的な波があることを説明した。

第 3 節では 2 度目の衝撃的な鉛直震動の存在が、橋脚の特殊な破壊事例に対して、その破壊が示す特徴と整合することを説明した。そして衝撃的な鉛直地震動が起こす引張破壊の中の波動現象に関係する爆裂破壊の事例について弃土工区での資料を補足して、橋脚で生じた破壊初期の特徴から壊滅的な終局段階の事例迄を詳しく紹介した。これは通常の方法学的な破壊現象とは異なる波動による破壊の特徴を把握するためである。

一方、強烈な 2 度目の衝撃的な波動の存在は多くの場合、主震動で損壊したものをさらに破壊する複合的な破壊現象を生じることになる。ピルツ橋の倒壊事例の状況を、第 3 節で関連する証言とともに紹介した事例は、圧縮破壊に伴う複合的な破壊の代表的な事例の一つといえる。

第 4 節では震源断層の近傍から離れた RC 建物の全層崩壊事例や、強力な鉛直震動の存在を端的に示す庭からの跳び笠石およびタンクのダイヤモンド座屈の事例を紹介した。これらの事例も局在的な波の特徴を表しており、また第 2 節と第 3 節で述べた強烈な 2 度目の衝撃的な鉛直地震動は主震動の後から到達しているため、従来の地震波の概念とは全く異なることを説明した。そこで従来の地震波と区別する意味で新たに“後発鉛直キラーパルス”と便宜的に呼ぶことにした。そしてこの“後発鉛直キラーパルス”を正確に観測することはその局在性から難しく、地震（短期）予知の実用化を確立する必要があり、地殻の塑性化を検出して予知する一つの手法を南海巨大地震に対して別途提案した。

本文を纏める背景は、6 年前に東日本大震災の発生で感じた、強烈な衝撃的な鉛直地震動の現象に対する原子力施設への安全性の危惧が、熊本地震での大地震の連鎖的な発生を受け、より深刻に感じられたことにある。熊本地震でも東日本大震災でも、強烈な衝撃的な鉛直地震動の現象とみられる特徴的な事例がいくつかあるのだが、この現象に対する認識や知識が欠けているので、それに関する情報は正しく伝えられていない。この現状を改善することに寄与することを願って本章のまとめとする。

補足資料

収録内容：

- (1) 海震の震度階級表
 - (1) ルドルフの震度階級表 (1898)
 - (2) ジーベルグの震度階級表 (1923)
- (2) 海震の年表と現在の問題点 [H29.4.8 追記版]
- (3) 明石海峡航行中のフェリーの船長 2 名の証言
 - (1) あさぎり丸の船長の証言
 - (2) キーンダイヤモンド号の船長の証言
- (4) ピルツ橋工区の近くの住民の証言
- (5) 局在波の現象の目撃証言
- (6) 高速道路走行者の証言
 - (1) ピルツ橋工区の走行者の証言
 - (2) 2 径間落橋部に遭遇したスキーバス運転手の証言

参考文献 (本章末尾に記載)

補足資料

(1) 海震の震度階表

下記の 2 種類の海震震度階級表は文献 58)より引用.

- (1) ルドルフの震度階級表 (1898)
- (2) ジーベルグの震度階級表 (1923)

付表 2.1 ルドルフの海震震度階級 (1898)

震度	説 明
1	単に一種に音響と感じる程度にして、多くは甲板以下に在る乗員のみ感得す。
2	睡眠中の乗員を醒ましむる位の程度にして、多くは甲板以下の人に感ず。
3	船体全部に震動を感じ、あたかも甲板上に重き器具を転落したる様の感を起こさしむ。
4	あたかも錨を深所に投げ、錨が急に繰り出される時に感じる震動に似たるもの。
5	船体が珊瑚礁、砂州、海底等に触れ、これを乗り越したる如く感じ、また他の小なる船体と衝突しこれを乗り越したる様に感ず。
6	皿鉢などの食器またはコップ等が動き出し、ガチャガチャと鳴り響く程度の震動。
7	甲板上に直立するの不可能なる程度の震動
8	帆柱、帆架、卓子など並びに甲板上の物体は、衝突に為に震動し、羅針儀、寒暖計などの破損することある程度。
9	船体が一方に押しやられ、震動を起こし、航行不可能となる程度。
10	甲板上の人は投げ出され、重き物体も投げあげられ、甲板の接合部は剥がれ難船することある程度。

付表 2.2 ジーベルグの海震震度階級 (1923)

震度	説 明
1 (軽震)	海が静かなとき、船室の中でわずかに震動し隔壁が軽くきしむ程度。
2 (弱震)	底触れまたは船体が岸壁をこすときのような、あるいは錨鎖を急遽に繰り出すときのような震動を感ずる。船腹や構造物の震動がはっきりわかる。
3 (中震)	砂州、岩礁、または暗礁に乗り上げたとき、または衝突したときのような激動、あたかも甲板上に重量物を投げ出し、または櫂を転がすような、あるいはスクリュウの翼が折れたときのような衝撃を感ずる。吊下げ物がはなはだしく揺れる。索具や船体構造物が鳴動する。
4 (強震)	前記の状況がさらに強くなり船は縦横に動揺し、操舵員は舵輪を握る手に衝撃を感ずるようになり、帆桁、デリック棒が鳴動し、座りの悪い器物は転倒転落する。
5 (烈震)	船上に立つことが困難となり大きい物体も位置がずれたり転倒したり、台から跳び出したりする。マスト、甲板構造等、全船鳴動し、構造の弱い部分は弛んでぐらぐらするようになる。船の航行が困難になることもある。
6 (激震)	船体が海中から跳ね上げられることもあり、継ぎ目が離れたり、帆桁、マスト、甲板構造に損害が起こる。このために浸水して、甚だしいときは沈没に至ることもある。

(2) 海震の年表と現在の問題点 [H29.4.8 追記版]

次頁の「海震の年表と現在の問題点」は「気象」の文献 25,30)の他、馬場栄一氏からの資料 31)と日本被害地震総覧(文献 59))を参照して作成.

海震の年表と現在の問題点

[H28.10.28 作成]

[H29. 1.16 修正]

[H29. 4. 8 追記]

(佐藤孫七：「気象」1968・2、1978・1の記事を表にし補足、27以後は追加)

凡例：青色－火山性活動、赤色－船の被害記録、茶色－注目事象（3種類）

暦年	地震名 M 等	場所	船種・船名	状況と記事
1 1854 嘉永 7	安政東海地震 M8.4	遠州灘 (翌 日安政南海地震)	小舟	敷き板がガタガタと音、上下に振動 (ロシア公船が津波で遭難)
2 1857 安政 4	(伊予・安芸地震? M7.2)		仙台藩軍艦・開成丸 300t	四ツ・九ツ時2回、ドスン、ドスンと下 から突き上げられる
3 1889 明治 22	熊本地震 M6.3	島原湾	漁船	船底に木材が当たったようなショック (海水の膨張・奔出で転覆を心配)
4 1891 明治 24	(火山性の海底 活動?)	(伊豆・御蔵島 沖?)	アメリカ帆船・ヘSPA 一号	(濃尾地震 M8.0(10月 28 日)の 2 日後神戸出 航) 船底から万雷、海水は沸騰、亜硫酸 ガスで呼吸困難、船体は振り回される
5 1894 明治 27		ノルウェイ・ロフォ テン諸島北西沖	ドイツ帆船・エンリエ ッテ号	約 2 分間の激動で船体に亀裂、約 2 時間後に沈没
* 1898 明治 31	ルドルフの海 震度階級表			10 階級 (実例添付: 222 回中船体破 壊が 7 回の記録)
6 1899 明治 32	紀伊半島南東 地震 M7.0	紀州沖	太平洋郵船・タコマ 号 (日本被害地震総覧)	16 秒間激しく揺れ、甲板上の乗組員 倒る
7 1906 明治 39	海底火山爆発	ハワイ・マウイ島 南沖	スエーデン・エルトリ ヤ号	半ば沈みながら漂流
8 1915 大正 4	海底火山爆発	ベヨネーズ列岩・ 明神礁 付近	カツオ漁船・第 3 高 根丸	激しい揺れ、エンジン用石油ポン プのバネ破損 (後日高根岩礁と命名)
9 1917 大正 6	(牡鹿半島沖地 震)	金華山東方沖	東京水産講習所帆 船・雲鷹丸	暗礁に乗り上げたような激動
10 1923 大正 12	関東大地震 M7.9	相模湾館山沖	軍艦武蔵	甲板の乗組員転倒
* 1923 大正 12	ジーベルグの 震度階級表			6 階級
11 1933 昭和 8	島の大噴火	インド洋 Krakataw I. 付近	英国汽船	断続的な鳴動を感じた
12 1933 昭和 8	昭和三陸沖地 震 M8.1		平安丸 11,500t、盛進 丸 50t 他大型船 4 隻	本震で 3~5 分強烈な震動、余震で は他に 2 隻が被害 (被地総覧記載有)
13 1934 昭和 9	海底火山活動	鬼界カルデラ・硫 黄新島を形成	汽船香取丸	船体に上下振動
14 1935 昭和 10		北千島・岩林規島	日魯漁業サケ流網 船	突然激動、機関停止
15 1941 昭和 16		マンザニリョの南 東	那古丸	約 10 分間、猛烈な上下動
16 1946 昭和 21	南海地震 M8.0	駿河湾田子の浦 / 潮岬沖	伊豆の漁船数隻 / マニラからの復員船 7500t	急に上下約 5~6cm 位振動 / 魚雷 をうけたような衝動 (被地総覧記載有)
17 1952.7 昭和 27	明神礁噴火	明神礁西南西 1500m	東京水産大・神戸丸	ドドシーンという震動、ゴーという噴 火音、爆発の空気振動
18 1952.9 昭和 27	明神礁爆発	明神礁付近	東京水産大・神鷹丸、 万祥丸他漁船数隻	ドドドシーンと強い震動、爆発の空気 振動、木造漁船は外板継目より浸水
19 1952.9 昭和 27	(明神礁)高根 岩礁爆発	高根岩礁近傍	海上保安庁測量船・ 第五海洋丸	明神礁の調査中・高根礁が大爆発、 乗員 31 名と船不帰の大惨事
20 1952.11 昭和 27	カムチャッカ半島南東 沖地震 Mw9.0	カムチャッカ半島 沖	アメリカ貨物船 8000GT	ハッチコーミング両側に亀裂、横浜 で修理

21	1953 昭和 28		アンダマン諸島東方	アメリカ汽船・ジョン ウ エインハウザー	12:52,13:52 の 2 回、機関が空転のよ うな震動が約 10 秒続いた
22	1953 昭和 28	房総沖地震 M7.4	野島崎南方	東洋汽船・黒潮丸	漁船と衝突して航海しているよ うな激動が 2~3 分続いた
23	1954 昭和 29		千島列島幌筵島 南東	林兼海運・永仁丸	12:36-17:33 の間、9 回 5~50 秒の激 烈な上下動、微振動、衝突のよ うな振動
24	1954 頃			日露漁業・黒潮丸	突然ドスンと 3m 位投落とされ た感じ
25	1964 昭和 39	(被害地震外)	福島県沖(震央直 近)	水路部測量船・明洋 (佐藤船長体験記)	船尾船底に突き上げショック、機 関を止め浸水点検後、始動航行 時にショック
26	1965 昭和 40	(被害地震外)	三陸花暮岸壁に 船尾係留中	水路部測量船・明洋 (佐藤船長体験記)	寝室で主機関の始動振動ビーン、 ビーン、他でドントントンと 3 回弱い振動
27	1969 昭和 44	M8.0	ジブラルタル西方 沖 450km	タンカー 32,500t	船殻補強材座屈、航海機器全損、 パイプ系破損(写真等記録残存)
28	1974 昭和 49	伊豆半島沖 地震 M6.9	伊豆半島沖潜行 中(石廊崎断層出現)	海自潜水艦・あさしお (日本被害地震総覧)	突き上げられ、上下に激しく揺 すられ緊急浮上(連絡後孤立稲取 町を救援?)
29	1978 昭和 53	伊豆大島近 海地震 M7.0	(上記に英語放送の米潜水艦の 噂やネット情報での混乱有、潜 水艦活動の話は調査必要)		稲取-大峰山断層出現(電鉄稲取 T 横断 50-70cm 右ずれ、翌日西 部で被害余震)
30	1980 昭和 55	伊豆半島東 方沖地震 M6.7	伊豆川奈崎沖	水路部観測船	茂木先生達がハイドロホンで 観測(唯一の観測波形:余震 50-100Hz 帯、100-300Hz 帯)
31	1995 平成 7	兵庫県南部 地震 M7.3	明石海峡 (播磨灘)	あさぎ丸 a、クインタイ ヤモンド q (フェリーおおさ か)	明石海峡の 2 隻 a,q は強い海震 を 2 回受震、2 回目の方がより 強烈(上記 25 と類似、F おおさ か シンデリア 2 基落下)
32	2000 平成 12		ニューギニア東 方沖	長崎大学・鶴洋丸	7:03-12:05 の間に 4 回受震、 10-15 秒で震度階 1-5(トル ド)の海震

* 27 番の事例を伝える Hove, K. et al. の論文は 1982 年の発表(馬場先生の論文・参考文献参照)。

* 2011 東北地方太平洋沖地震 Mw9.0 では広域的に大きな被害が生じ、農水省集計の漁船や水産業の被害は日本被害地震総覧に記載してあるが、1933 年のような海震の記載はなし。

○佐藤孫七先生の「気象」(1978. 1)の海震の記事には下記の事柄が書いてある。

- ①著者の知る範囲で嘉永・安政の頃から当時迄の約 120 年間に海震の記録は 150 件もある。
- ②ルドルフの震度階級表には実例が添付されており、“船体破壊強震動”階級 10 に該当するものが 222 回の内 7 回の記録があったことには注目すべきと思う。
- ③この階級表が作られた当時と現代とでは船の構造・強度に大きな違いがあり、現代に適した海震度表が望まれる。
- ④海震をうけた場合は、直ちに損傷の有無を十分に調査する必要がある。船体で感じる振動は、弾性波(疎密波)による上下動が主であり、これに直角に対する船底部が最も強く衝撃を受ける。この伝播振動で船底の取り付け部や、比較的弱い組み立ての各計器、特に大切な操舵機器、スイッチの接続部などは詳しく点検したい。
- ⑤停泊・係留中の船舶は、一応津波の襲来にも注意して情報収集に努めるべきである。

○「気象」の記事は船舶の航行安全の参考として書かれ、海震の事例として 26 番迄書いてあるが、重要な 27,28 番の事例は書かれてない。それでも地震の疎密波が船底に衝撃を与え、それが船舶破壊をもたらす認識の下に書かれている。特に操舵機器に対する指摘は重要である。

○大型タンカーでの航海機器全損・船殻補強材座屈の事例(27 番)は、潜水艦には致命的な事なので、核兵器開発競争の情勢下での 28 番の事例は、より印象を切実にしている。

◎「船舶が海震で損壊する時の地震波は疎密波である事は常識です。」と船舶工学の専門家は指摘している。

現在の問題点：

○海震には年表に示すような経過があるのだが、地震時疎密波が船舶に大きな影響を与えることがある事についてあまり知られていない。肝心の地震関係者等に海震の情報が共有されていないのである。この分野間の情報共有の欠落状態をもたらした現在の環境と、必要な情報が伝わらない点に大きな課題と問題点が潜んでいる。

(3) 明石海峡航行中のフェリーの船長2名の証言(以下3~5は文献35)から該当部分を抜粋)

(1) あさぎり丸の船長・向井所彊氏の証言

向所 彊(明石海峡フェリー「あさぎり丸」船長47歳、津名郡淡路町岩屋港を出航し明石港の南1kmを航行中)淡路島の岩屋から明石に向かって航行していた。上下にドドドドと強い衝撃が来た。船が突然、止まったような感じだった。明石の街を見ると、明かりが消えて真っ暗。とにかく明石港に入ろうと再び進み出したが、停電で港が使えないと無線が入り、岩屋に引き返した。【朝日新聞1995年2月28日26面◆宮本貢編著:1995・01・17・05・46-阪神大震災再現(ASAHI NEWS SHOP NO.5)、朝日新聞社、1995年3月、p.74】(略)「ドドドドーン」というものすごい衝撃の上下動に見舞われ、船のスピードが落ちた。三十二年間船に乗っていて経験したことのないショックだった。「スクリューに何か巻き込んだ」と、すぐにエンジンの回転を下げようとレバーを握った。しかし動かない。一瞬操船困難に陥った。なんとかエンジンを止め、クルーに点検を指示した。仮眠中の四人も飛び起き、衝突事故と思ったのか「船長、やったか」とブリッジに駆け込んできた。機関部から「エンジン異常なし」の返事。一等航海士は「何もぶつかってはいない。ごつたものを巻き込んだかも」と報告した。「一体何を拾ったのか」と首をかしげつつ、再び回転を上げようとレバーを握った途端、二回目の衝撃がきた。今度ははっきり「船底にダメージを受けた。潜水艦とぶつかったか」と思った。「早く明石港に入ろう」と船首を向けると、明石の街の灯がすべて消えていた。【神戸新聞社編:大震災 その時、わが街は、神戸新聞総合出版センター、1995年9月、p.11】

(2) クィーンダイヤモンド号の船長・新村成敏氏の証言

新村成敏・野口郁雄(「クィーンダイヤモンド号」船長49歳・営業係長40歳、明石海峡大橋を通過後)(略)「クィーンダイヤモンド号」(九、〇二三トン)は明石海峡航路の2号パイを通過、明石海峡大橋の下をくぐり3号パイとの中間付近にいた。北西に位置する明石市立天文科学館の上空を青白い閃光が走った。ふだんは見えない明石海峡大橋のケーブルが、シルエットとして浮かび上がるほどの光量だ。デッキからその光を見た船長の新村成敏(四九)は、自分の目を疑った。何が起こったのだ。(略)明石海峡を航行していた「クィーンダイヤモンド号」も、突き上げられた。大きな波に翻弄された瞬間、海面で船底をたたくウオーターハンマーより数倍も激しい衝撃に襲われた。営業係長の野口郁雄(四〇)や乗客が衝突、座礁を直感し、悲鳴とともに跳び起きた。新村は「車両甲板で爆発だ。エンジンストップ」とブリッジの二等航海士に叫んだ。右舷に走った。火災の有無を確認するためだ。新村には苦い思い出があった。四年前の五月の連休中、大分行きの同じ船で爆破予告があった。船に無線連絡があったのも、同航路のほぼ同じ地点。運搬中の自衛隊車両に対する嫌がらせだった。だからその瞬間爆発を予測した。だがどこにも爆発も火災もなかった。(略)【読売新聞夕刊1995年2月24日1面】

(4) ピルツ橋工区の近くの住民・平岡満幸氏の証言

平岡満幸(建設業53歳、東灘区深江本町2丁目の6階建てビル5階)阪神高速道路神戸線北側の六階建てビル。五階の自宅寝室ベッドで目覚めていた建設業平岡満幸(五三)は、強い横揺れと音で跳び起きた。縦揺れが続く。とても立ってられない。タンスが飛んできた。「もうアカン。ビルが倒れる」。布団をかぶっていた妻孝子(五三)に叫んだ。最初の揺れがおさまった。置き時計は五時四十八分。階下の孫二人が気になり、パジャマ姿、素足で屋外階段の踊り場に飛び出した。下りようとした瞬間、背後で大音響が。振り向くと、信じられない光景があった。コンクリートの高速道路が、中央線を見せるようにして横倒しになっていく。衝撃で体が浮き上がる。スローモーション映画を見ているようだ。砂じんが舞い上がり、クラクションが鳴る。ぐにゃりと曲がった道路の中央分離帯に二台の車が引っかけかかっている。倒壊を免れたやや西側の高速道路では車数台のヘッドライトが光っていた。「高速が落ちてもうた」。無我夢中で一階へ。目の前に高さ二十メートル、長さ約三十五メートル、厚さ一・八メートル、千三百トンもあるコンクリートの壁が迫っていた。それが十八ブロック分、六百三十五メートルにわたって東側に続く。数台の車が高速道路に押しつぶされている。宙ぶりの乗用車から男性がはい出し、傾いた道路を滑ってきた。植木の間に血だらけの男性三人がしゃがむ。「こんなこと起きてええんやろうか」。小柄な体を震わせた。【読売新聞夕刊1995年2月27日1面◆読売新聞大阪本社編:阪神大震災、読売新聞社、1995年10月、p.22】

(5) 局在波的現象の目撃証言

新谷敏章・藤家 武(神戸新聞社会部25歳・写真部25歳、兵庫区と中央区の境付近の国道2号を走行中のタクシー車内)(略)兵庫区と中央区の境付近だった。新谷は約三十メートル先に信号待ちのトラックを見た。タクシーがゆるゆるとスピードを落とす。軽くブレーキを踏んで停車しようとした瞬間、轟音とともに車が左右に揺れた。藤家の方は追突されたような衝撃を覚えると同時に、目の前が光った。全身をかき回されるような激しい揺れ。自分の体を制止するのが精一杯で、何度も頭を打った。道路が波打っている。新谷も何かにつかまろうとするのだが、重力がなくなったようで自由が利かない。手を伸ばし、足で踏ん張ろうにも、不規則な揺れで空を切るばかり。いったい何が起きたのだ。混乱する頭で「追突?」と思った。体をねじ曲げて後ろを振り向くが、車はいない。正面を向き直ってギョッとした。信号待ちしていたはずのあのトラックが跳ね飛んでいる。ダーン、ダーン。四トンの車体は宙に浮いて、着地するたびに、すさまじい音を立てる。「ゴーツ」。身のすくむ地鳴り。垂直に引き込むような縦揺れ。そして横揺れ。新谷は、「早く端に寄せて下さい」と運転手に叫んだ。運転手も何か言っているのだが、言葉にならない。いつ車が止まったのか。新谷、藤家は声も出さず、肩で息をしながら互いの顔をしばらく見詰め合った。(略)【神戸新聞社:神戸新聞の100日、プレジデント社、1995年11月、p.26】

*筆者の感想: 乗客の新谷敏章氏が地震の主震動の中間で、体をねじ曲げ後ろを振り向き、正面を向き直って、信号待ちのトラック4トン車がダーン、ダーンと跳ね飛んでいるのを見ている。その本人も縦揺れ、そして横揺れを受けているが目前のトラックと同期した振動ではない。約30mの距離で見ると見られるものとの動きが異なっている状況を如実に伝えている。

(6) 高速道路走行者の証言（文献50）から著者の著述文とも抜粋）

(1) ピルツ橋工区の走行者・桑原浩治氏の証言

高速道路倒壊体験者の証言

阪神高速神戸線を乗用車で走行中、地震に遭い、びようぶ倒しの倒壊現場から奇跡的に助かった奈良県在住の桑原浩治さんの証言を紹介しよう。

「十七日早朝、出張のため西へ向かって走行中、神戸市東灘区深江本町にさしかかったとき、前方右側（神戸三宮方面）に地面を走るような筋状の光が見えました。三回くらいパッパッパッと点滅し、色は緑に近い色でした。それから三〜四秒してから、身体に揺れを感じました。この揺れの直前に海側のやや高い位置に、すりガラスをとおして見たようなボーとした赤い光を見ました」

地鳴りはありませんでしたかの質問に、「揺れの直前かどうかはつきりしませんが、ゴ—という地鳴りは聞こえませんでした」と、自動車の中からも地鳴りが聞こえていたこと、しかし、それは大きな揺れが来てからで、その前は気づかなかったことを証言した。

高架橋がどのように倒れていったかをぜひ知りたいのですと懇願して、その状況を話してもらった。

「高速道路がへびのように横にくねくねと揺れました。数秒の周期だったと思います。前輪と後輪がねじれるようでした。車は横へスリップします。十秒ぐらいしてから、こんは縦に振動しはじめました。くくの字のような形です。周期は一秒ぐらいでしょうか。高速道路の継ぎ目も上に行ったり、下へ行ったりしたんですよ。これにはびっくりしました。八十キロメートルぐらいのスピードで走っているのですが、止まったら追突されますから、必死でハンドルをとっていました。自分の車は中央分離帯を越え、対向車線に飛び出してしまいました。もう少しで六百メートルの長さを走り切るところでした。高速道路は倒れ、歩道橋のそばに落ちました。道路は中央部分から崩れたのだと思います」

車ごと投げ飛ばされたが、軽傷で済んだ。

「気絶していたようです。携帯電話のベルで起こされました。妻が心配して地震後すぐ電話したのだそうです。電話がつながるのに三十秒くらいかかったようだから、気絶していた時間が短ければ、橋桁が落下するまでに三十秒くらいかかったのではないのでしょうか」

「辺りは真っ暗で、落ちた所がすぐ下の道路と同じ高さにあるとは思いませんでした。地面に降り、前を見ると、橋が崩れたのに、ビルがどうもなく立っている。それが、非常に変に思えました」

(2) 2 径間落橋部に遭遇したスキーバス運転手・福本良夫氏の証言

一月二十五日の朝、地元ラジオ局AM神戸558（ゴーゴイエイト）から、地震のと

き高速道路の高架継ぎ目がはずれ、道路の片方が落下した地点で前輪部分の脱落だけで辛うじて墜落を免れた、観光バスの運転手の生の声が聞こえてきた。運転手の福本良夫さんは、野沢温泉から四十三人のスキー客を運んで来た。途中で大半の乗客は降り、乗客三人を乗せて最終目的地三宮へ向かっていた。

「スピードは出ていませんでした。横揺れが来たので、とりあえず止まることとしましたが、こんどは縦揺れで、道路が波打つんです。ブレーキをかけ、止まったとたん、前がバサツと落ちました。止まってから落ちたので助かったと思います。相棒が客を誘導してうしろの非常口から全員脱出しました」

この場合も横揺れのあと縦揺れがきている。場所は西宮市本町で、東灘区深江本町の場合と比べ、横揺れや縦揺れの大きさや周期がどうであったかなど今後調査したい所である。

*筆者の感想：

地震の横揺れの後に高架橋の路面が波打つ縦揺れが来ている。桑原氏の証言では横揺れと後からの縦揺れの間に時間差がある。

参考文献

- 1) 前原博, 櫻井春輔: 構造物の特徴的な地震時破壊例と関連事象による新しい見解, 土木学会関西支部 平成 24 年度年次学術講演会, I -48, 平成 24 年 6 月.
- 2) 前原博, 櫻井春輔: 構造物の地震時衝撃破壊の代表例 (について), 国交省近畿地整局 平成 24 年度研究発表会, 防災・保全部門 No.19, 平成 24 年 7 月. [HP より DL 可]
- 3) 前原博, 櫻井春輔: 高架橋の柱の典型的な地震時衝撃破壊事例, 第 47 回地盤工学研究発表会 745, 2012 年 7 月.
- 4) 前原博, 櫻井春輔: 兵庫県南部地震でのビルツ橋区間の倒壊原因の見直し, 土木学会関西支部 平成 25 年度年次学術講演会, I -30, 平成 25 年 6 月.
- 5) 前原博, 櫻井春輔: 海震と証言による橋脚の地震時破壊原因の見直し, 国交省近畿地整局 平成 25 年度研究発表会, 防災・保全部門 No.13, 平成 25 年 7 月. [HP より DL 可]
- 6) 前原博, 櫻井春輔, 園田恵一郎: 地震時の破壊的な疎密波の存在と橋脚の破壊原因の見直し, 安全工学シンポジウム 2013, GS3-2, 平成 25 年 7 月.
- 7) 前原博, 櫻井春輔: 地震予知の実施例の紹介と実用化に関する展望, 土木学会関西支部 平成 26 年度年次学術講演会, I -38, 平成 26 年 5 月.
- 8) 前原博, 櫻井春輔: 地震時の破壊的衝撃動の特徴と地震直前予知の実用化について, 国交省近畿地整局 平成 26 年度研究発表会, 防災・保全部門 No.22, 平成 26 年 7 月. [HP より DL 可]
- 9) 園田恵一郎, 前原博, 櫻井春輔: 都市直下型大地震での公共構造物の被害の特徴—阪神大震災からの教訓—, 安全工学シンポジウム 2014, GS6-2, 平成 26 年 7 月.
- 10) 前原博, 櫻井春輔, 園田恵一郎: 海震と橋脚の破壊事例が示す強力な地震時鉛直衝撃動の存在と特徴, 土木学会第 69 回年次学術講演会, I -507, 平成 26 年 9 月.
- 11) 前原博, 櫻井春輔: 地震時の強力な衝撃的鉛直動の局在波動的な形態の検証に向けて, 土木学会関西支部 平成 27 年度年次学術講演会, I -44, 平成 27 年 5 月.
- 12) 前原博, 櫻井春輔: 阪神淡路大震災での衝撃的鉛直地震動とその局在波動的性質, 国交省近畿地整局 平成 27 年度研究発表会, 防災・保全部門 No.10, 平成 27 年 6 月. [HP より DL 可]
- 13) 前原博, 園田恵一郎, 櫻井春輔: 見落とされている強力な衝撃的鉛直地震動の問題を考える, 安全工学シンポジウム 2015, GS6-2, 平成 27 年 7 月.
- 14) 前原博, 園田恵一郎, 櫻井春輔: 巨大地震での高架橋 RC 橋脚の鉛直衝撃破壊とその出現形態, 日本地震学会 2015 年度秋季大会 講演予稿集 S22-13, pp48, 2015 年 10 月.
- 15) 櫻井春輔, Chouh Nawawi, 石川信隆: 兵庫県南部地震(1995)における上下動は存在した, 日本地震学会 2015 年度秋季大会 講演予稿集 S22-14, pp48, 2015 年 10 月.
- 16) 園田恵一郎, 櫻井春輔, 野中泰二郎: 直下地震における構造物への衝撃的突き上げ力, 日本地震学会 2015 年度秋季大会 講演予稿集 S22-15, pp49, 2015 年 10 月.
- 17) 例えば熊本市内の 1 階がパンケーキ型クラッシュのビル(千場歯科ビル, 赤茶色のマンションやビル等)
- 18) 例えば建築研究所熊本地震建築物被害調査検討委員会, 熊本地震における建築物被害の現委員分析を行う委員会 (第 3 回) 報告書(案), 平成 28 年 9 月 12 日.
- 19) 前原博, 櫻井春輔, 園田恵一郎: 被災事例と海震および証言に基づく強力な鉛直地震動について, 土木学会関西支部 平成 28 年度年次学術講演会, I -6, 平成 28 年 6 月.
- 20) 前原博, 園田恵一郎, 櫻井春輔: 破壊的な鉛直地震動の発生形態と特徴, 安全工学シンポジウム 2016, GS9-2, 平成 28 年 7 月.
- 21) 前原博, 櫻井春輔: 見落とされてきた破壊的鉛直地震動の現象とその特徴—地震予知の効果的な普及に向けて—, 国交省近畿地整局 平成 28 年度研究発表会, 防災・保全部門 No.20, 平成 28 年 6 月. [HP より DL 可]
- 22) 前原博, 園田恵一郎, 櫻井春輔: 地震短期予知の効果的な普及に向けて, 日本地震学会 2016 年度秋季大会 講演予稿集 S14-09, 2016 年 10 月.
- 23) 日本地震学会と日本災害情報学会との共同勉強会「南海トラフ地震の発生予測と社会的課題」, 2017 年 1 月 28 日.
- 24) 文部科学省研究開発局地震・防災研究課, 地震調査研究推進本部「新総合基本施策」の評価に係るアンケート調査, 調査期間 2016 年 12 月 27 日～2017 年 2 月 28 日.
- 25) 佐藤孫七: 海震・体験あれこれ, 気象, pp26-28, 1978.1.
- 26) 茂木清夫, 望月裕峰: 1980 年伊豆半島東方沖地震の震源直上でのハイドロホンによる高周波震動の観測とそれによる地震断層の位置の推定, 東京大学地震研究所彙報, Vol.55-4, pp1017-1041, 1981.3.
- 27) Kiyoo Mogi: Experimental Rock Mechanics, CRC Press, pp267, 2006.11.
- 28) 東大付属図書館地震研究所図書室の回答: ノイズが多いため詳細分析せず(茂木, 望月氏に問合せ結果), 2012 年 5 月 7 日.
- 29) 茂木清夫: 地震予知を考える, 岩波新書, pp84, 1998.12.
- 30) 佐藤孫七: 海震の話, 気象, pp6-9, 1968.2.

- 31) 馬場栄一・広島大学名誉教授(船舶工学)より提供.
- 32) P.B.Selnes : Offshore Earthquake Geotechnology – Second Part, Proceedings; First International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering & Soil Dynamics, 4.26–5.3, 1981, St. Louis, Missouri.
- 33) 大阪フェリー協会：窮して通ず，阪神大震災フェリー対策協議会活動記録，pp64,69-70，平成8年1月.
- 34) 神戸海運監理部運航部運航管理官：平成7年1月17日5時46分「そのとき旅客船は・・・」アンケート報告，pp3,22，平成7年8月
- 35) 園田恵一郎，小林治俊，長野圭：兵庫県南部地震－初期上下動の証言について，大阪市立大学工学部紀要・震災特別号 別刷，pp189-260，1997.1.
- 36) 鳥羽徳太郎：1995年兵庫県南部地震津波の規模および波源域，pp461-466,地震 第2集第49卷(1997).
- 37) 河田恵昭：船上で感じた海震・トンネル内で見えた地震波，科学の目，岩波科学 66(2)，1996.2.
- 38) 前原博収集写真資料(B)：§2.地震時衝撃的鉛直波動による弃天工区の破壊例？，内陸直下地震における耐震問題研究会，準備会内部資料，2010.11.
- 39) 阪神高速道路公団：大震災を乗り越えて－震災復旧工事誌－，pp191,464，平成9年9月.
- 40) 阪神高速道路管理技術センター：阪神高速道路震災から復旧まで[写真集]，pp75,192，1997.1.

- 41) 全日本建設技術協会：M7.2 技術者の見た 阪神・淡路大震災 その被害と復旧，pp143，1995.11.
- 42) Keiichiro Sonoda : IMPACT FAILURE MECHANISM OF VIADUCT COLUMNS AT INLAND FAULT EARTHQUAKES, 9th International Conference on Shock & Impact Loads on Structures, Fukuoka, Japan, pp589-603, Fig.9, 10, Nov. 2011.
- 43) 前原博収集写真資料(A)
- 44) 神戸市役所・震災記念写真展での展示写真を複写編集
- 45) <http://geot.civil.metro-u.ac./archives/eq/95kobe/m189.jpg> の写真に加筆
- 46) 後藤洋三：[エッセイ]地震と人と時間と(その2)，pp4，Docon Report Vol.170 Jan.2005.
- 47) 前原博収集写真資料(C)
- 48) 阪神高速道路株式会社：震災資料保管庫 震災状況写真集(橋脚) No.13より該当部分を複写編集.
- 49) 朝日新聞社：報道写真全記録大震災一年,pp4,1996年1月.
- 50) 佃為成：大地震の前兆と予知，ASAHI NEWS SHOP 朝日新聞社，pp65-67，1995年4月.

- 51) NHK 巨大地震メカクエイク，2010.1.17 放映の画像を写真撮影.
- 52) <http://blogs.yahoo.co.jp/x103nanodayo/53637126.htm>
- 53) 東日本大震災一ヵ月の全記録 闘う日本，pp90，日本工業新聞社，平成23年4月.
- 54) 竹内隆・元神戸新聞社情報科学研究所職員より提供
- 55) 消防庁編集：阪神淡路大震災の記録 第1巻，グラフィア pp7，(株)ぎょうせい発行，平成8年1月17日.
- 56) 消防研究所技術資料第31号，阪神・淡路大震災における石油タンクの座屈強度に関する調査研究報告書，pp234,237，平成8年3月.
- 57) 川原琢治：ソリトンからカオスへー非線形発展方程式の世界ー，p161，朝倉書店，1993.5.
- 58) 吉村浩，合田政次，村尾彰：ニュージーランド東方海域で遭遇した海震と海震震度階級について，日本航海学会誌 149号，NAVIGATION pp107-110，平成13年9月.
- 59) 宇佐美龍夫，石井寿，今村隆正，武村雅之，松浦律子：日本被害地震総覧 599–2012，東京大学出版会，2013.9.
(文責 前原 博)

3. 直下地震での多層地盤上の構造物への突き上げ力の生成機構

3.1. 2層弾性地盤での鉛直応力波の伝播特性^{3.1),3.2)}

図 3.1.1 に示すような上層($i=1$)が厚さ H で、下層($i=2$)が無限厚さの 2 層弾性地盤での鉛直(z)方向の平面弾性ひずみ波の運動方程式は、減衰の影響を考慮しなければ以下のように表せる、

$$\rho_i \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \bar{E}_i \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2}, \quad i=1,2 \quad (3.1.1)$$

ここに、 ρ_i 、 u_i は各層の密度と鉛直変位成分、 \bar{E}_i は弾性係数で平面ひずみの場合には以下のように表せる。

$$\bar{E}_i = \frac{(1-\nu_i)E_i}{(1+\nu_i)(1-2\nu_i)}, \quad i=1,2 \quad (3.1.2)$$

ここに E_i : ヤング率、 ν_i : ポアソン比である。地震時に下部層($i=2$)の深部から上方に向かう入射変位波(縦波)を以下のように与える。

$$u_2 = u_0 \cdot e^{j(pt-f_2z)} \quad (3.1.3)$$

ここに、 u_0 : 変位振幅、 p : 円振動数($p=2\pi/T_0$, T_0 : 周期)、 $j=\sqrt{-1}$ 、 $f_2=2\pi/L_2$, L_2 : 波長、である。

各層($i=1,2$)での進行波と後退波による合変位は

$$u_2 = u_0 \cdot e^{j(pt-f_2z)} + A \cdot e^{j(pt+f_2z)} \quad (3.1.4)$$

$$u_1 = B \cdot e^{j(pt-f_1z)} + C \cdot e^{j(pt+f_1z)} \quad (3.1.5)$$

ここに、 $f_i=2\pi/L_i$, L_i は i 層での波長、 A , B , C は積分定数である。

第 1 層の底面に座標原点($z=0$)を採り、この面での連続条件

$$u_1|_{z=0} = u_2|_{z=0}, \quad \bar{E}_1 \frac{\partial u_1}{\partial z} \Big|_{z=0} = \bar{E}_2 \frac{\partial u_2}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (3.1.6)$$

および第 1 層の表面での境界条件

$$\frac{\partial u_1}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0 \quad (3.1.7)$$

より、

$$A = u_0 \cdot \frac{(1-\alpha) + (1+\alpha) \cdot e^{-2jf_1H}}{(1+\alpha) + (1-\alpha) \cdot e^{-2jf_1H}}, \quad B = 2u_0 \cdot \frac{1}{(1+\alpha) + (1-\alpha) \cdot e^{-2jf_1H}},$$

$$C = 2u_0 \cdot \frac{e^{-2jf_1H}}{(1+\alpha) + (1-\alpha) \cdot e^{-2jf_1H}} \quad (3.1.8)$$

ここに、 $\alpha = \sqrt{\frac{\rho_1 \bar{E}_1}{\rho_2 \bar{E}_2}}$, $f_1 = \frac{2\pi}{L_1} = \frac{p}{V_{p1}}$, $f_2 = \frac{2\pi}{L_2} = \frac{p}{V_{p2}}$ であり、 $\bar{E}_1 = \rho_1 V_{p1}^2$, $\bar{E}_2 = \rho_2 V_{p2}^2$, ただし、

V_{pi} , $i=1,2$ は各層での縦波の速度である。

つぎに、下層地盤の深部から上方に向かう弾性地盤内の鉛直入射変位波として式(3.1.3)の実部を採り以下のように与える。

$$U_2(t, z) = u_0 \cdot \cos(pt - f_2z) \quad (3.1.9)$$

ここに、 u_0 : 入射波の鉛直変位振幅、 $p=2\pi/T_0$, T_0 : 周期、 $f_2=2\pi/L_2$, L_2 : 入射波の波長($T_0 V_{p2}$)である。また、式(3.1.9)の鉛直入射変位波を、鉛直入射速度波または鉛直入射応力波で表せば、

$$V_2(t, z) = v_0 \cdot \sin(pt - f_2z), \quad S_2(t, z) = \sigma_0 \cdot \sin(pt - f_2z) \quad (3.1.10)$$

ここに、 $v_0 = -pu_0$, $\sigma_0 = -\rho_2 V_{p2} \cdot v_0$, ただし引張を正とする。

鉛直座標を $\bar{z} = z - H$ と表せば、式(3.1.5)による第 1 層内の変位成分は以下のように与えられる^{3.2)}。

$$U_1(t, \bar{z}) = \frac{2u_0}{\sqrt{\cos^2 q + \alpha^2 \sin^2 q}} \cdot \cos\left(q \frac{\bar{z}}{H}\right) \cos\left\{pt - \tan^{-1}(\alpha \tan q)\right\} \quad (3.1.11)$$

ここに、 $\alpha = \rho_1 V_{p1} / (\rho_2 V_{p2})$, $q = pH / V_{p1}$, H : 第 1 層の厚さである。また、速度成分および応力成分では、

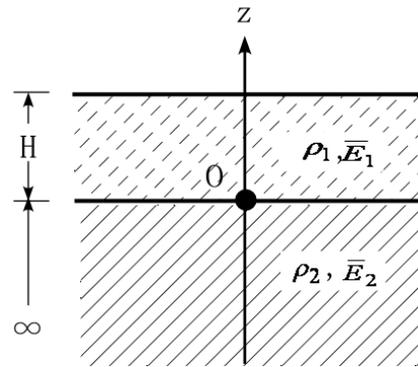


図 3.1.1 2層弾性地盤

$$V_1(t, \bar{z}) = \frac{2v_0}{\sqrt{\cos^2 q + \alpha^2 \sin^2 q}} \cdot \cos\left(q \frac{\bar{z}}{H}\right) \sin\left\{pt - \tan^{-1}(\alpha \tan q)\right\} \quad (3.1.12)$$

$$S_1(t, \bar{z}) = \frac{2\alpha\sigma_0}{\sqrt{\cos^2 q + \alpha^2 \sin^2 q}} \sin\left(q \frac{\bar{z}}{H}\right) \cdot \cos\left\{pt - \tan^{-1}(\alpha \tan q)\right\} \quad (3.1.13)$$

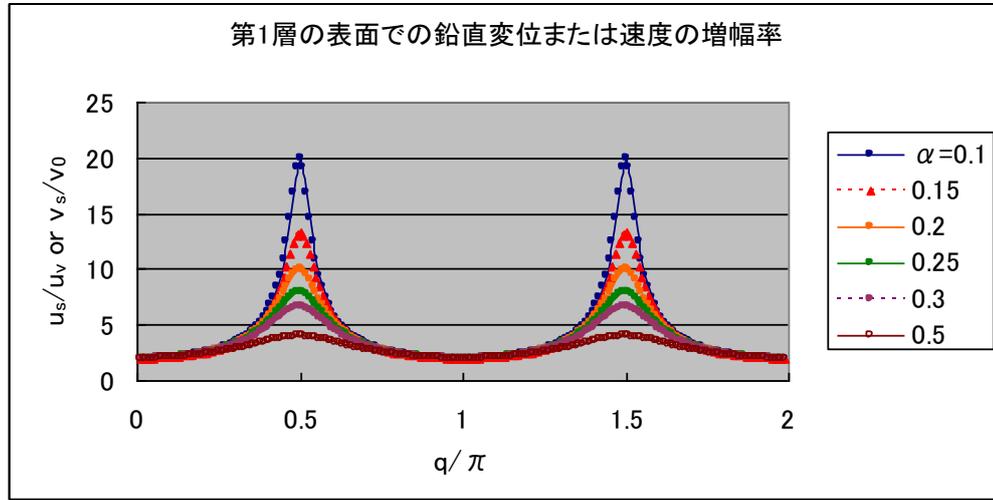


図 3.1.2 第 1 層の表面での鉛直変位または速度の増幅率

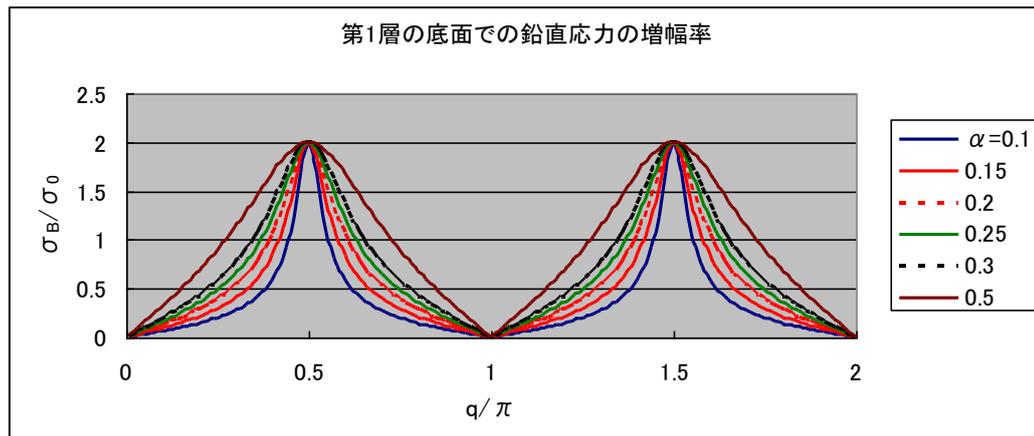


図 3.1.3 第 1 層の底面での鉛直応力の増幅率

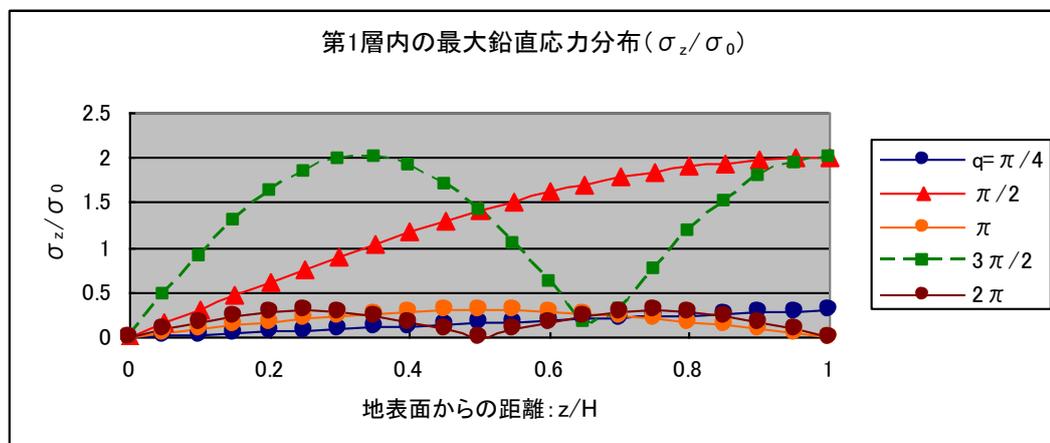


図 3.1.4 第 1 層内の鉛直応力 (片振幅) の分布

となる。

式(3.1.11)～(3.1.13)より、第 1 層の表面($\bar{z}=0$)での変位および速度成分 (片振幅: u_s, v_s) および底面

($\bar{z} = -H$)での応力成分 (片振幅: σ_B) は以下のように表せる.

$$u_s = \frac{2u_0}{\sqrt{\cos^2 q + \alpha^2 \sin^2 q}}, \quad v_s = \frac{2v_0}{\sqrt{\cos^2 q + \alpha^2 \sin^2 q}}, \quad \sigma_B = \frac{2\alpha\sigma_0 \cdot \sin q}{\sqrt{\cos^2 q + \alpha^2 \sin^2 q}} \quad (3.1.14)$$

図 3.1.2 は, 第 2 層からの入射変位(u_0)または速度(v_0)に対する第 1 層の表面での最大鉛直変位(u_s)または速度(v_s)の増幅率を, 図 3.1.3 は入射応力(σ_0)に対する第 1 層底面での最大鉛直応力(σ_B)の増幅率を示している. u_s/u_0 および v_s/v_0 は, $q/\pi = 1/2, 3/2, \dots$ で, 最大値: $2/\alpha$ に達し, σ_B/σ_0 は $q/\pi = 1/2, 3/2, \dots$ で最大値: 2 に達している. ここに $q/\pi = 2H/(T_0 V_{p1}) = 2H/L_{p1}$, L_{p1} : 第 1 層での縦波の波長であり, $\alpha = \rho_1 V_{p1}/(\rho_2 V_{p2})$ は第 1 層の第 2 層に対するインピーダンス比である. すなわち, $H/L_{p1} = 1/4, 3/4, \dots$, 周波数では, $f = 1/T_0 = V_{p1}/(4H), \dots$, において共振 (共鳴) を起こしていることが分かる. ちなみに, $q/\pi = 1/4, 1/2, 1, 1.5$ での第 1 層内の鉛直応力 (片振幅) の分布 (σ_z/σ_0) を調べると図 3.1.4 のようになり, 共鳴時には大きくなっているが, 入射応力(σ_0)に対する比は 2.0 以下であり, 共鳴時には第 1 層の表面での鉛直変位または速度は非常に大きくなるが, 第 1 層内の最大鉛直応力は高々 $2\sigma_0$ 以下であることが注目される.

3.2 3 層弾性地盤での鉛直応力波の伝播特性^{3.2)}

図 3.2.1 に示すような, 第 1 層が沖積粘土層のような柔らかい地盤で, 第 2 層が洪積粘土層のような構造物の支持層になる地盤, そして, その下に岩盤などの基盤層となる半無限地盤により構成された 3 層弾性地盤の基盤層の深部から式(3.1.9)および(3.1.10)と同等の鉛直変位, 速度または応力波が入射する場合を考える. すなわち,

$$U_3(t, z) = u_0 \cdot \cos(pt - f_3 z), \quad V_3(t, z) = v_0 \cdot \sin(pt - f_3 z), \quad (3.2.1)$$

ここに, u_0 : 鉛直変位 (片振幅), $p = 2\pi/T_0$: 円振動数, T_0 : 周期, $f_3 = 2\pi/L_3$, L_3 : 半無限基盤層での入射変位波の波長, すなわち $L_3 = V_{p3} \cdot T_0$ である

この場合の式(3.1.1)の弾性波動方程式の解は以下のように与えられる^{3.2)}. ただし鉛直座標の原点($z=0$)は地表面に採っている.

地表面($z=0$)で自由である条件ならびに第 1 層と第 2 層の界面および第 2 層と半無限基盤層の界面での連続条件より, 第 1 層および第 2 層内の鉛直変位は以下のように表わせる.

$$U_1(t, z) = u_1(z) \cdot \cos(pt - \tan^{-1} \frac{Q}{P}), \quad u_1(z) = \frac{2u_0}{\phi} \cos q_1 \frac{z}{H_1} \quad (3.2.2)$$

$$U_2(t, z) = u_2(z) \cdot \cos(pt - \tan^{-1} \frac{Q}{P}),$$

$$u_2(z) = \frac{2u_0}{\phi} \left\{ \cos q_1 \cos q_2 \left(\frac{H_1}{H_2} + \frac{z}{H_2} \right) - \alpha_1 \cdot \sin q_1 \cdot \sin q_2 \left(\frac{H_1}{H_2} + \frac{z}{H_2} \right) \right\} \quad (3.2.3)$$

ここに,

$$\phi = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad P = \cos q_1 \cos q_2 - \alpha_1 \sin q_1 \sin q_2, \quad Q = \alpha_2 (\cos q_1 \sin q_2 + \alpha_1 \sin q_1 \cos q_2),$$

H_m : 層厚 ($m=1,2$), $q_m = pH_m/V_{pm}$ ($m=1,2$), V_{pm} : 波速 ($m=1,2$), $f_m = 2\pi/L_m$, L_m : 波長 ($m=1,2$), ρ_m : 地盤密度 ($m=1,2$), インピーダンス比: $\alpha_m = \rho_m V_{pm}/(\rho_{m+1} V_{p_{m+1}})$, ($m=1,2$) である.

また, 第 1 層および 2 層での鉛直速度および応力波は以下のように表せる.

$$V_m(t, z) = \frac{\partial U_m(t, z)}{\partial t} = -p u_m(z) \cdot \sin(pt - \tan^{-1} \frac{Q}{P}), \quad m=1,2 \quad (3.2.4)$$

$$S_m(t, z) = \bar{E}_m \frac{\partial U_m(t, z)}{\partial z} = \bar{E}_m \frac{\partial u_m(z)}{\partial z} \cdot \cos(pt - \tan^{-1} \frac{Q}{P}), \quad m=1,2 \quad (3.2.5)$$

ここに, $\bar{E}_m = \rho_m V_{pm}^2$, $m=1,2$ である.

以下の数値解析では, 第 1 および 2 層の地盤特性は, 表 3.2.1 に示すような 3 種類を想定し, 第 3 層

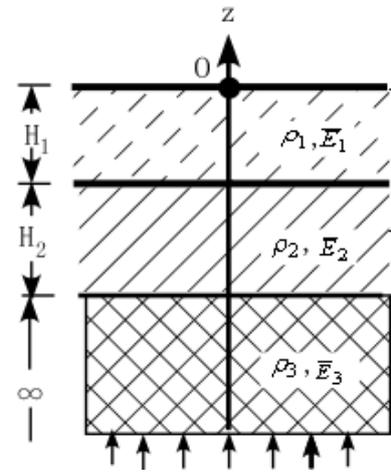


図 3.2.1 3 層弾性地盤

の基盤 ($i=3$)は同一で, $\rho_3 = 2.0t/m^3$, $V_{p1} = 3000m/s$ とし, 基盤層での入射応力は $\sigma_0 = -\sigma_3 V_{p3} \cdot v_0$, 引張を正, としている. 図 3.2.2 は $H_1 = 10m$, $H_2 = 20m$ の地盤 A において, 式(3.2.5)の鉛直応力波の周期 (T_0) が 0.02, 0.08,

表 3.2.1 考慮した地盤特性

	第 1 層 層厚: $H_1 = 10m$		第 2 層 層厚: $H_2 = 10, 20, 30, 50, 100m$	
	$\rho_1(t/m^3)$	$V_{p1}(m/s)$	$\rho_2(t/m^3)$	$V_{p2}(m/s)$
地盤 A	1.5	300	1.6	600
地盤 B	1.5	300	2.0	1000
地盤 C	1.6	600	2.0	1000

(注) : ρ_m および $V_{pm}, m=1,2$ は各層の密度と縦波速度を意味する.

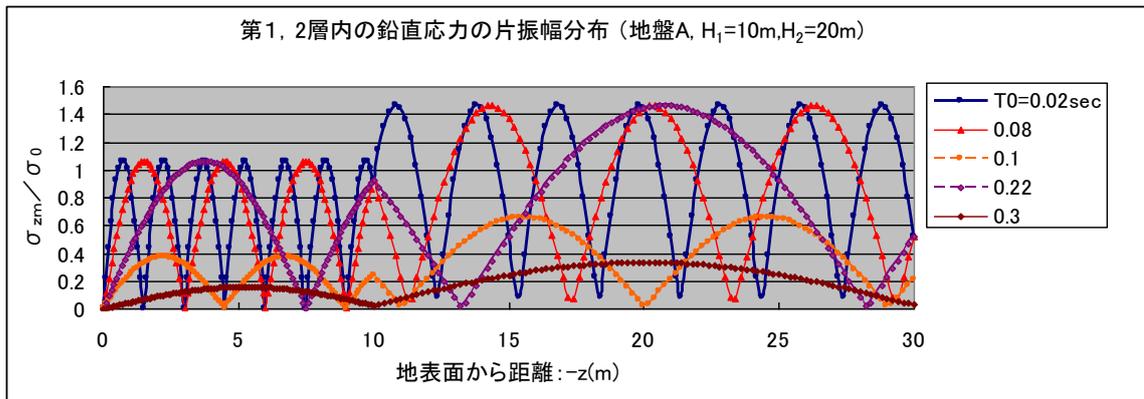


図 3.2.2 第 1 層および第 2 層内の鉛直応力片振幅の深さ方向分布 (地盤 A, $H_1=10m, H_2=20m$)

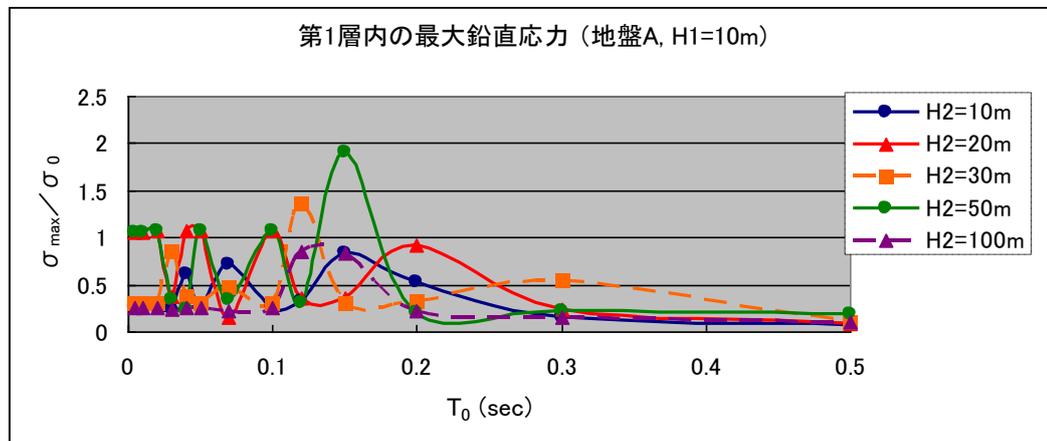


図 3.2.3 第 1 層内の最大鉛直応力の周波数特性 (地盤 A, $H_1=10m$)

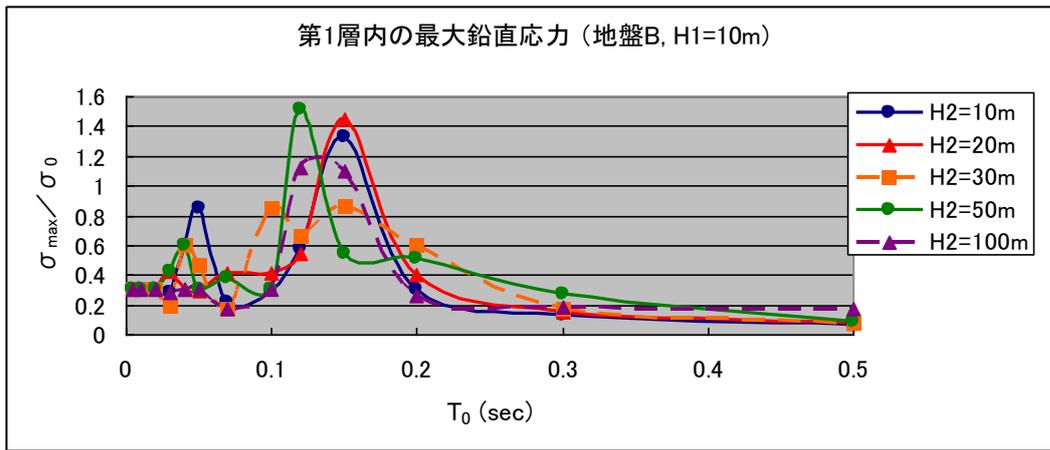


図 3.2.4 第 1 層内の最大鉛直応力の周波数特性 (地盤 B, $H_1=10\text{m}$)

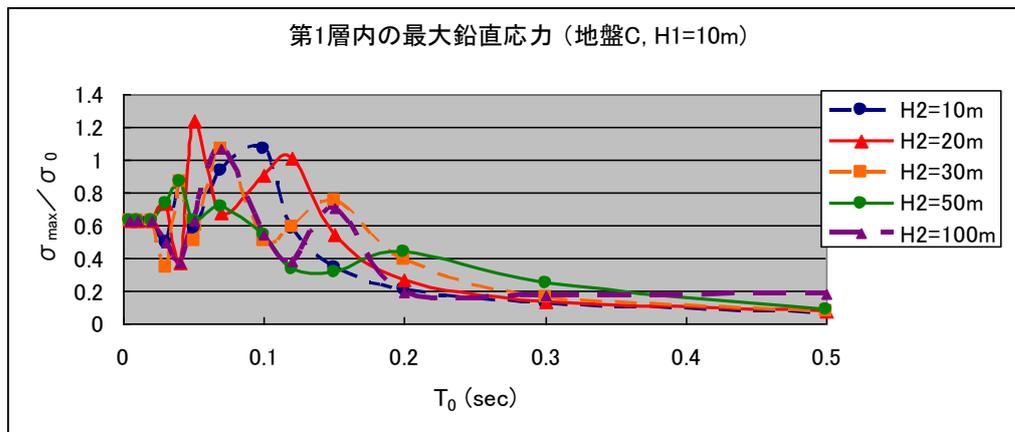


図 3.2.5 第 1 層内の最大鉛直応力の周波数特性 (地盤 C, $H_1=10\text{m}$)

0.1, 0.22 および 0.3sec の時の第 1 および 2 層内の鉛直応力の片振幅の z 方向の分布を示しており, 図 3.2.3 は地盤 A で第 1 層の厚さを $H_1=10\text{m}$ と固定し, 第 2 層の厚さを $H_2=10\text{m}, 20\text{m}, 30\text{m}, 50\text{m}, 100\text{m}$ と変化させ

たときの第 1 層内の最大鉛直応力の周波数 ($f=1/T_0$) の特性 を調べたものである. さらに, 図 3.2.4 および 3.2.5 は地盤 B および C での同様の周波数特性を示している.

一般的に見れば, 地盤 A, B, C での第 1 層の最大鉛直応力 (σ_{\max}) の卓越周期は地盤 A より地盤 C の方が短くなっているが, 地盤 A では $T_0=0.15\text{sec}$ ($f=6.7\text{Hz}$) において $\sigma_{\max}=2\sigma_0$ になるような図 3.1.3 で示した共鳴現象が現われており, 地盤特性の相違によって鉛直応力の大きさと卓越周期が大きく変化することが注目される.

3.3 多層弾性地盤上の構造物への突き上げ力特性

3.3-1 3 層弾性地盤上の剛体への突き上げ力特性^{3.3)}

ここでは, 図 3.3.1 に示すような 3 層弾性地盤上の剛体への突き上げ力に着目する. この問題は 3 次元問題になるので, 図 3.3.2 に示すような 3 次元軸対称問題として FEM モデルによる数値解析を行う. 地盤特性は表 3.1.1 と同じであるが, 3 次元波動解析では縦波と横波が混在するので, 表 3.3.1 に示すような横波速度 ($V_{si}, i=1,2,3$) も考慮した地盤 A,B,C を想定し, 基盤層の厚さ (H_B) は有限長で, その底面に式(3.2.1)の第 1 波に相当する鉛直方向の変位または速度を与える. すなわち,

$$U_z(t,0)=u_0(1-\cos pt), \quad 0 \leq t \leq T_0, \quad V_z(t,0)=v_0 \sin pt, \quad 0 \leq t \leq T_0 \quad (3.3.1)$$

なお, 時刻: $t > T_0$ では, 底面での反射の影響をできるだけ避けるために図 3.3.2 に示すような粘性境界として取り扱う. 各層 ($i=1,2,3$) の縦弾性係数 (E_i), 横弾性係数 (G_i) およびポアソン比 (ν_i) は以下のように与えている.

$$\nu_i = \frac{(V_{pi}/V_{si})^2 - 2}{2[(V_{pi}/V_{si})^2 - 1]}, \quad G_i = \rho_i V_{si}^2, \quad E_i = 2(1+\nu_i) \cdot G_i \quad (3.3.2)$$

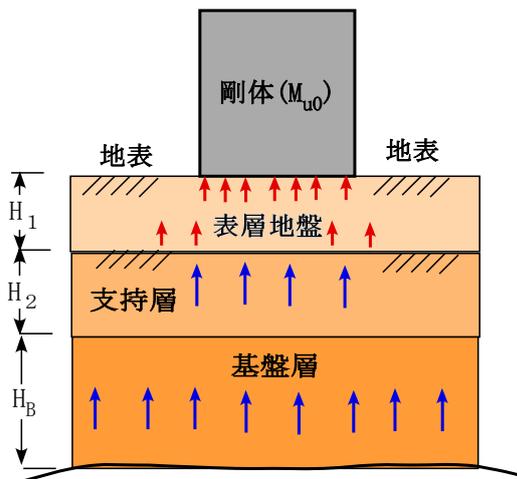


図 3.3.1 3層地盤上の剛体

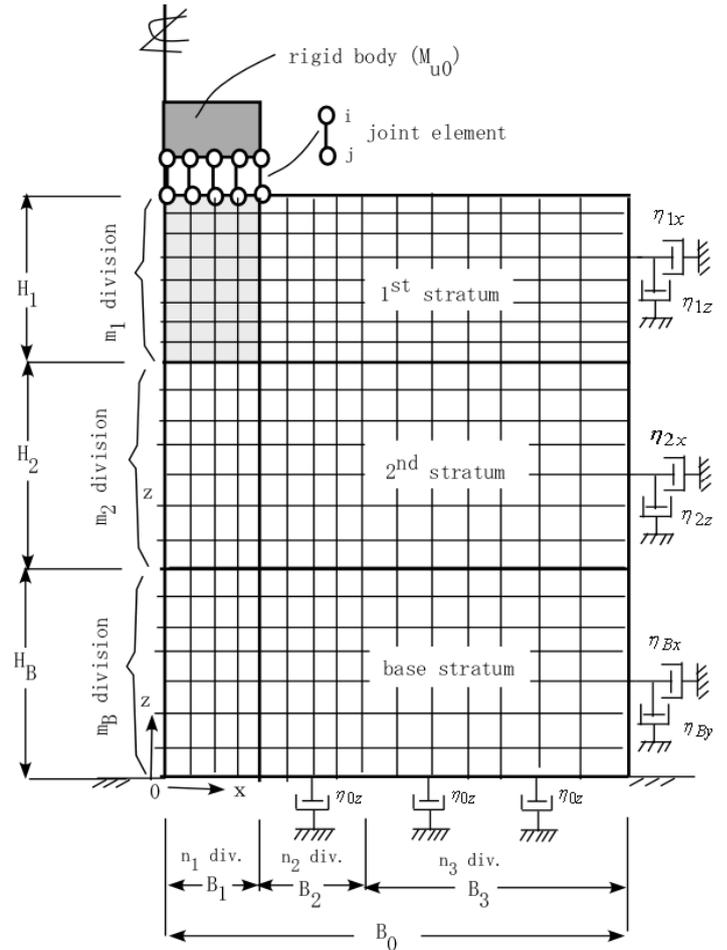


図 3.3.2 3次元軸対称 FEM モデル³⁾

各要素内の応力ベクトル: $\sigma_m = [\sigma_x \ \sigma_z \ \tau_{xz} \ \sigma_\theta]^T$, ひずみベクトル: $\varepsilon_m = [\varepsilon_x \ \varepsilon_z \ \gamma_{xz} \ \varepsilon_\theta]^T$ とし, 弾性方程式を $\sigma_m = \bar{\mathbf{E}}_m \cdot \varepsilon_m$, $\bar{\mathbf{E}}_m$: 弾性係数行列, と表し, 全節点に関する式(3.3.3)の運動方程式の数値解析を行った。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{P} \quad (3.3.3)$$

ここに, \mathbf{M} : 質量行列, \mathbf{C} : 減衰行列, \mathbf{K} : 剛性行列, \mathbf{P} : 自重による節点力ベクトル, $\ddot{\mathbf{u}}$, $\dot{\mathbf{u}}$, \mathbf{u} : 節点加速度, 速度, 変位ベクトルである。時間積分法の陽解法を用い, Courant 条件を満足する微小時間増分を用いた時刻歴応答解析を行った。ただし以下の解析例では $\mathbf{C} = \mathbf{0}$ としている。また, 図 3.3.2 の FEM モデルでは, 剛体は地盤上に載っており, 剛体底面と地盤の接触面の節点にはジョイント要素を挿入し, 引張力は伝達しないように配慮している。

以下, 図 3.3.2 の FEM モデルで, 層厚, 幅および要素分割数は, $H_1 = 10\text{m}$, $m_1 = 10$, $H_2 = 20\text{m}$,

表 3.3.1 弾性地盤特性

	第1層			第2層		
	$\rho_i(t/m^3)$	$V_{pi}(m/s)$	$V_{si}(m/s)$	$\rho_i(t/m^3)$	$V_{pi}(m/s)$	$V_{si}(m/s)$
地盤 A	1.5	300	100	1.6	600	200
地盤 B	1.5	300	100	2.0	1000	300
地盤 C	1.6	600	200	2.0	1000	300

(注) 基盤層は, $\rho_B = 2.0t/m^3$, $V_{pB} = 3000m/s$, $V_{sB} = 800m/s$ である。

$m_2 = 20$, $H_B = 40\text{m}$, $m_B = 20$, および $B_1 = 5\text{m}$, $n_1 = 5$, $B_2 = 20\text{m}$, $n_2 = 10$, $B_3 = 100\text{m}$, $n_3 = 10$

とし、剛体の底面積を $A_{f0} = 79m^2$ とした場合の解析結果を以下に示す。

図 3.3.3 は地盤 A で、剛体の質量、 $M_{u0} = 500t$ 、入射速度、 $v_0 = 0.1m/s$ のときの剛体の最大地盤反力（突き上げ力）の応答を示している。剛体の自重： $W_{u0} = M_{u0} \cdot g$ 、 g ：重力加速度、は $500tf$ であるが、 $T_0 = 0.04, 0.05sec$ での、動的ピーク値は $4000 \sim 4500tf$ と静的反力の $8 \sim 9$ 倍に上っており、剛体底面の平均圧力で見れば、動的

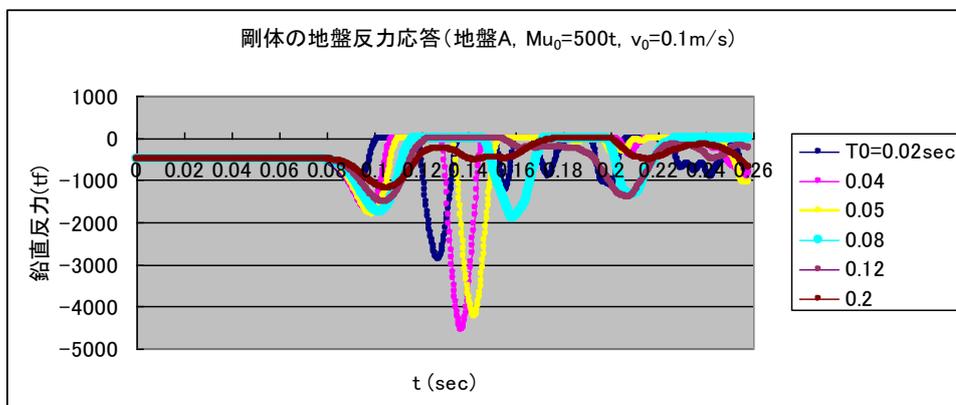


図 3.3.3 剛体の地盤反力応答（地盤 A, $M_{u0} = 500t$, $v_0 = 0.1m/s$ ）

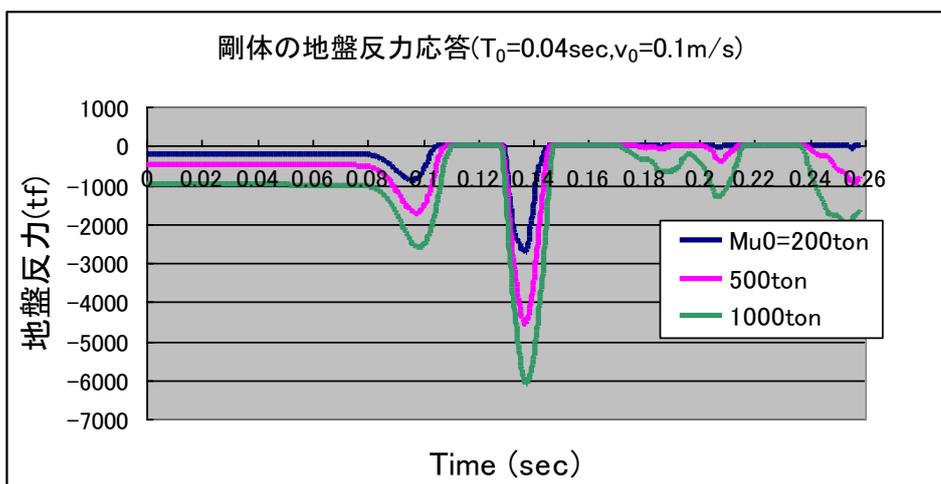


図 3.3.4 剛体の地盤反力応答（地盤 A, $v_0 = 0.1m/s$, $T_0 = 0.04sec$ ）

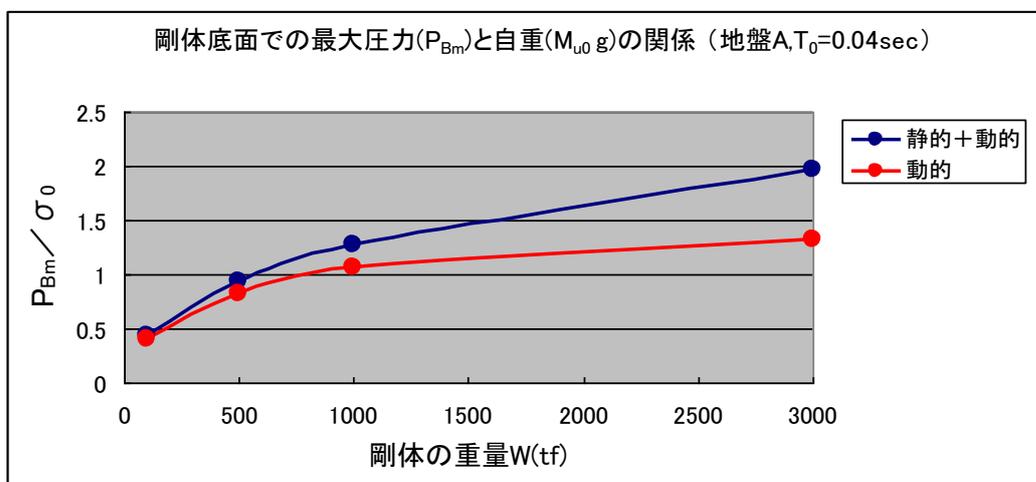


図 3.3.5 地盤上の剛体底面での最大平均圧力と剛体の自重との関係（地盤 A, $T_0 = 0.04sec$ ）

圧力のピーク値は $0.51 \sim 0.57 MPa$ となり、入射応力： $\sigma_0 = -\rho_B V_{pB} \cdot v_0 = -0.6 MPa$ とほぼ同じになっ

ている。つぎに、地盤 A で、剛体の質量を $M_{u0} = 200t$ 、 $500t$ および $1000t$ での $T_0 = 0.04\text{sec}$ における最大地盤反力(突き上げ力)の変化を調べたものが図 3.3.4 である。明らかに、剛体の自重 ($W_{u0} = M_{u0} \cdot g$) が大きくなると突き上げ力も大きくなっているが、静的反力に対する動的最大ピークの比で見ると、剛体の自重が小さい程静的反力に対する動的ピーク値の比が大きくなっている。また、図 3.3.5 での剛体底面での地盤の接触面での平均圧力での静的圧力を除いた動的圧力 (P_{Bm})で見れば、 $W_{u0} = 100tf$ では P_{Bm} の最大値の入射応力 (σ_0) に対する比は 0.4 で、 $W_{u0} = 500tf$ では 0.83、 $W_{u0} = 3000tf$ では 1.32 となっており、剛体底面での鉛直圧力の反射率は自重の増加につれて大きくなっていると言える。

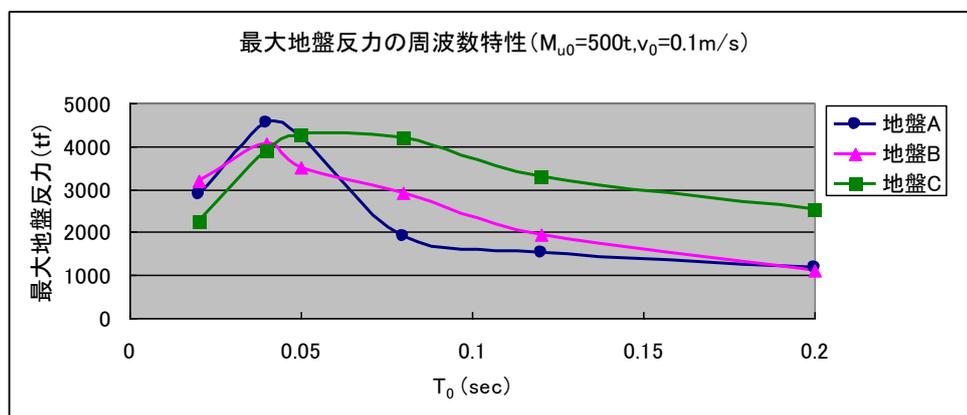


図 3.3.6 最大地盤反力の周波数特性 ($M_{u0} = 500t$, $v_0 = 0.1\text{m/s}$)

一方、図 3.3.6 は地盤 A,B および C での剛体の最大地盤反力と周波数 ($f = 1/T_0$) の関係を示している。地盤 A および B では $T_0 = 0.04\text{sec}$ 付近の狭い周波数領域で大きな突き上げ力が発生しているのに対して地盤 C では $T_0 = 0.05 - 0.1\text{sec}$ の比較的広い周波数領域で大きな突き上げ力が発生していることが分かり、多層地盤の特性の相違によって卓越する周波数領域も異なることに注目される。

3.3-2 3層弾性地盤上の高架橋橋脚への突き上げ力による柱断面の軸方向応力特性³⁾

図 3.3.1 および 3.3.2 に示した 3 層弾性地盤上の剛体の代わりに図 3.3.7 に示すような高架橋単柱式橋脚がある場合を考える。解析モデルでは上部工は質量 M_{u0} の剛体、基礎は質量 M_{ft} の剛体とし、高さ H_c の柱部は m_c 分割した質量・バネモデルから構成されており、分割長は $\Delta H_i = H_c / m_c$ 、質量は $M_{ci} = M_{col} / m_c$ 、 $M_{col} = \rho_c A_c H_c$ 、 $A_c = \pi D_c^2 / 4$ であり、バネ係数は $k_{ci} = E_c A_c / \Delta H_i$ 、 E_c は柱の弾性係数、である。

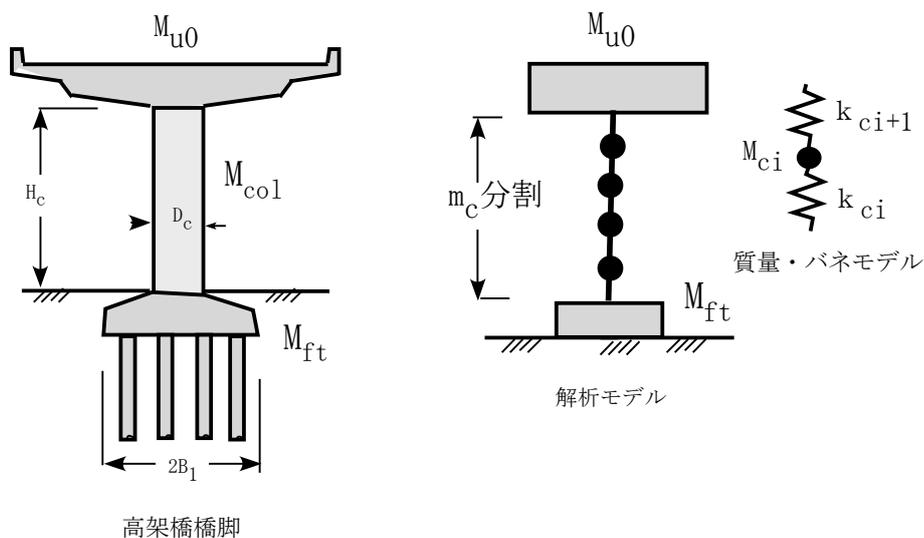


図 3.3.7 高架橋橋脚の解析モデル

図 3.3.7 の高架橋橋脚の解析モデルが図 3.3.1 および 3.3.2 の 3 層弾性地盤上に載っている場合の第 3

層（基盤層）の底面から式(3.3.1)の鉛直変位または速度が入射したときの基礎工からの突き上げ力による柱断面に発生する軸方向応力特性の問題を取り上げる。ただし，図 3.3.7 の橋脚基礎杭の影響は第 1 層の地盤剛性の増加によって配慮する。

以下，地盤形状は図 3.3.2 で $H_1 = 10m$ ， $m_1 = 10$ ， $H_2 = 20m$ ， $m_2 = 20$ ， $H_B = 40m$ ， $m_B = 20$ ， $B_1 = 5m$ ， $n_1 = 5$ ， $B_2 = 20m$ ， $n_2 = 10$ ， $B_3 = 100m$ ， $n_3 = 10$ とし，橋脚形状は $H_c = 10m$ ， $D_c = 3m$ ， $M_{u0} = 550t$ ， $M_{ft} = 283t$ ，とする。最初に，図 3.3.8 は表 3.1 の地盤 A において，基盤層の底面に与える式(3.3.1)の

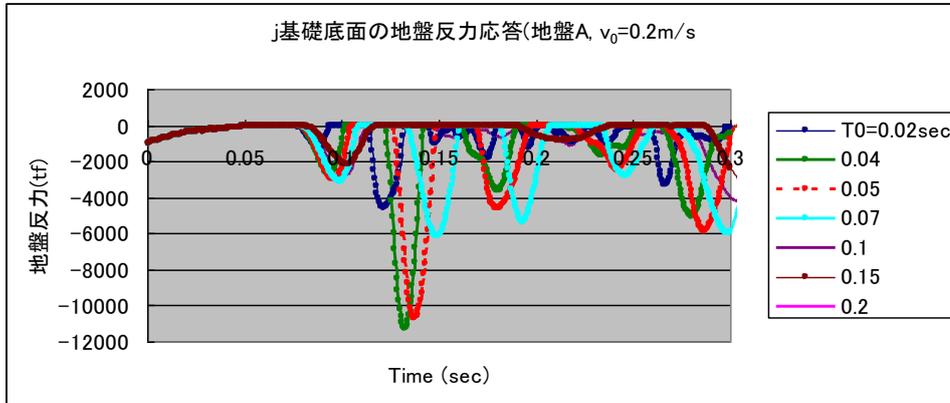


図 3.3.8 橋脚基礎底面での地盤反力（突き上げ力）の応答（地盤 A, $v_0 = 0.2m/s$ ）

鉛直入射速度を $v_0 = 0.2m/s$ ，入射応力では $\sigma_0 = -\rho_B V_{pB} \cdot v_0 = -1.2MPa$ （圧縮）としたときの橋脚基礎底面での地盤反力（突き上げ力）の応答を示している。橋脚の全自重（ P_{f0} ）は約 $1000tf$ （ $9.8MN$ ）であり，最大突き上げ力（ P_{fm} ）は $T_0 = 0.04sec$ において $P_{fm} = 11P_{f0}$ に達しており，基礎底面での最大平均圧力でみれば， $1.4MPa$ であり入射応力（ $|\sigma_0| = 1.2MPa$ ）の 1.17 倍に相当している。また，周期 $T_0 > 0.1sec$ （周波数 $f < 10Hz$ ）の領域では最大突き上げ力は大幅に減少していることが分かる。一方，図 3.3.9 は，高架橋柱中央部での軸方向応力の応答を示しており， $T_0 = 0.04sec$ では，最大圧縮応力は $15MPa$ ，最大引張応力は $12MPa$ であり，入射応力の 10 倍以上になっており，橋脚柱が鉄筋コンクリート（RC）であれば，ひびわれ発生強度をはるかに超える値になっており，本解析モデルの橋脚 RC 柱は引張破壊する可能性が指摘できる。

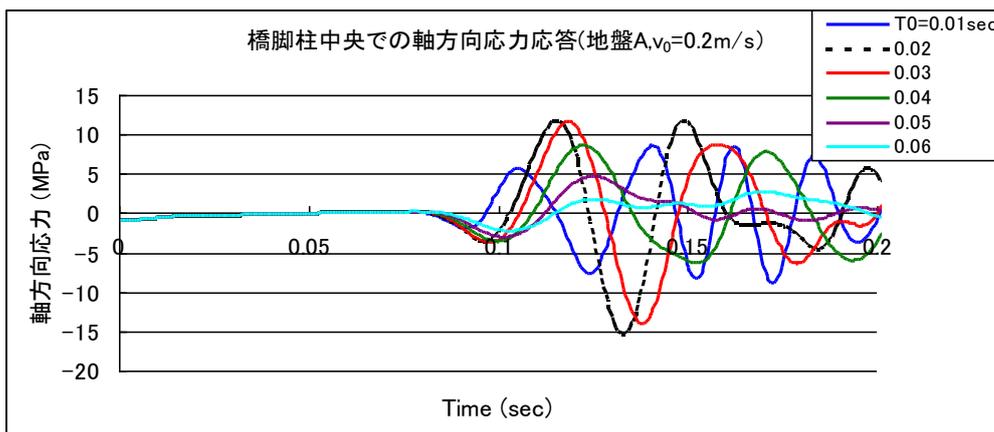


図 3.3.9 橋脚柱中央部の軸方向応力応答（地盤 A, $v_0 = 0.2m/s$ ）

つぎに，図 3.3.10，図 3.3.11 および図 3.3.12 は，表 3.3.1 の地盤 A,B および C での同じ解析条件での柱の上下端および中央での最大軸方向応力と周波数（ $f = 1/T_0$ ）の関係を示したものである。いずれのケースでも柱の下端で最大軸方向応力が中央部および上端より大きくなっているが，地盤 A および B ではその差が顕著ではない，一方，地盤 A および B では， $T_0 = 0.04 \sim 0.05sec$ での大きな軸方向応力が発生しているが，地盤 C では $T_0 = 0.05sec$ 近傍と $T_0 = 0.15sec$ の近傍の離れた 2 つの周波数領域において大きな軸方向応力が発生しており，この現象は図 3.3.6 で示した剛体への突き上げ力の周波数

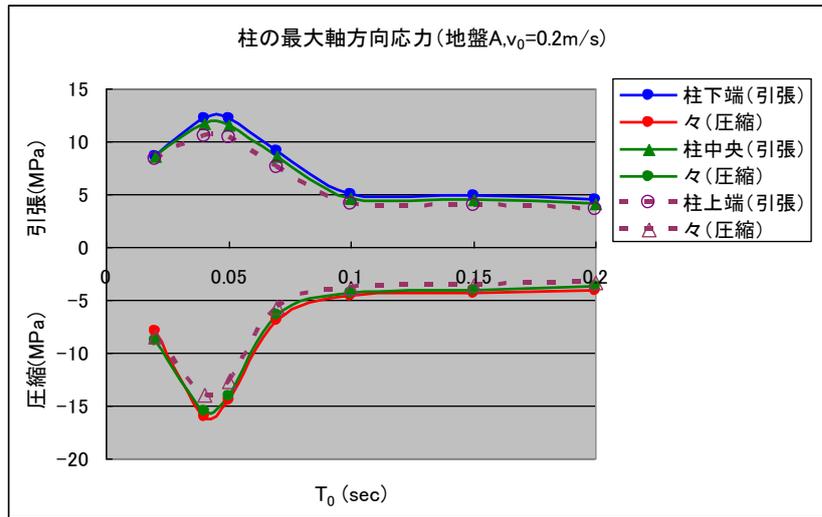


図 3.3.10 橋脚柱の最大応力の周波数特性 (地盤 A, $v_0 = 0.2m/s$, $|\sigma_0| = 1.2MPa$)

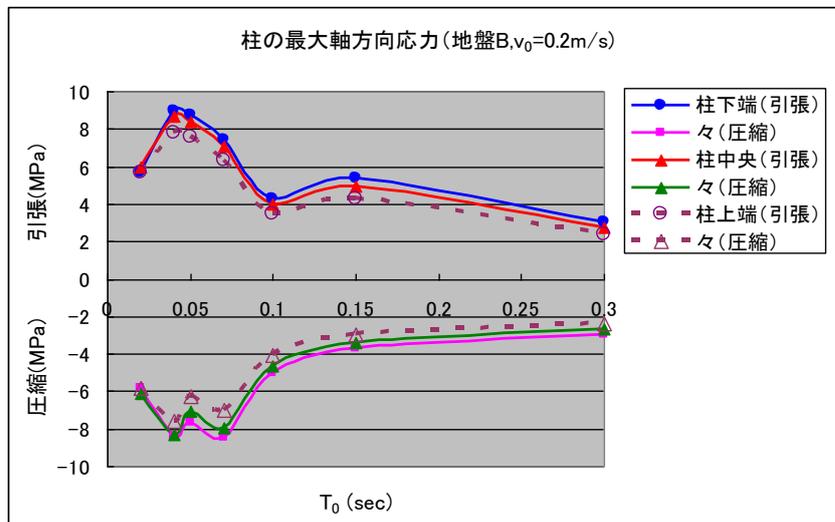


図 3.3.11 橋脚柱の最大応力の周波数特性 (地盤 B, $v_0 = 0.2m/s$, $|\sigma_0| = 1.2MPa$)

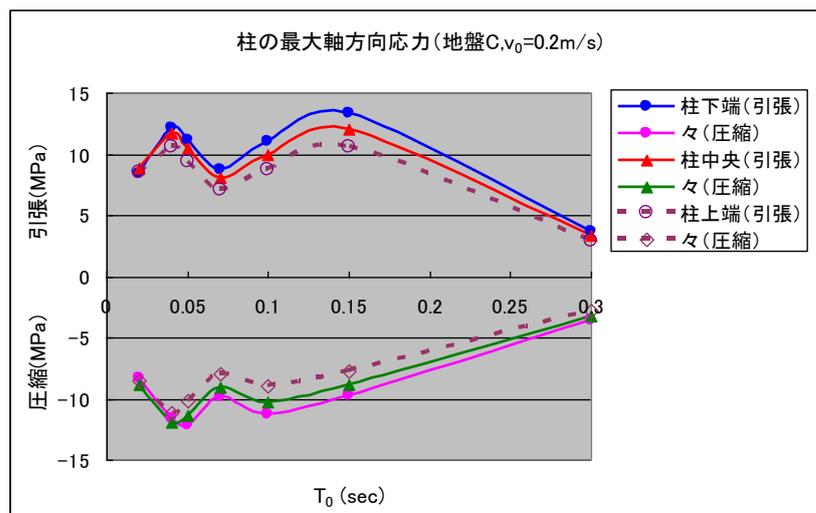


図 3.3.12 橋脚柱の最大応力の周波数特性 (地盤 C, $v_0 = 0.2m/s$, $|\sigma_0| = 1.2MPa$)

特性に対応していると思われる。

以上、まとめると、高架橋柱部に大きな圧縮および引張応力が発生する周波数特性は、図 3.3.5 で示した多層弾性地盤上の剛体の鉛直地盤反力（突き上げ力）の周波数特性と一致しており、また柱断面

の最大軸方向引張応力は自重による静的圧縮応力の 10 倍以上にも達すると言える。したがって、RC 高架橋の柱部を引張破壊させないためには、自重による応力をコンクリートの静的引張強度の 1/10 以下に抑える必要があるとも言える。

3.4. 基盤層への入射応力 (σ_0) について—兵庫県南部地震での事例からの検証—

3.4-1 上部工の無い RC 杭のひび割れ損傷事例^{3.4)}

1995 年 1 月 17 日の阪神・淡路大震災では、神戸市兵庫区のある建築現場において建設途中で上部工を有しない RC 杭にひび割れ損傷が発生した多くの事例があった。図 3.4.1 はその一例であるが、ひ

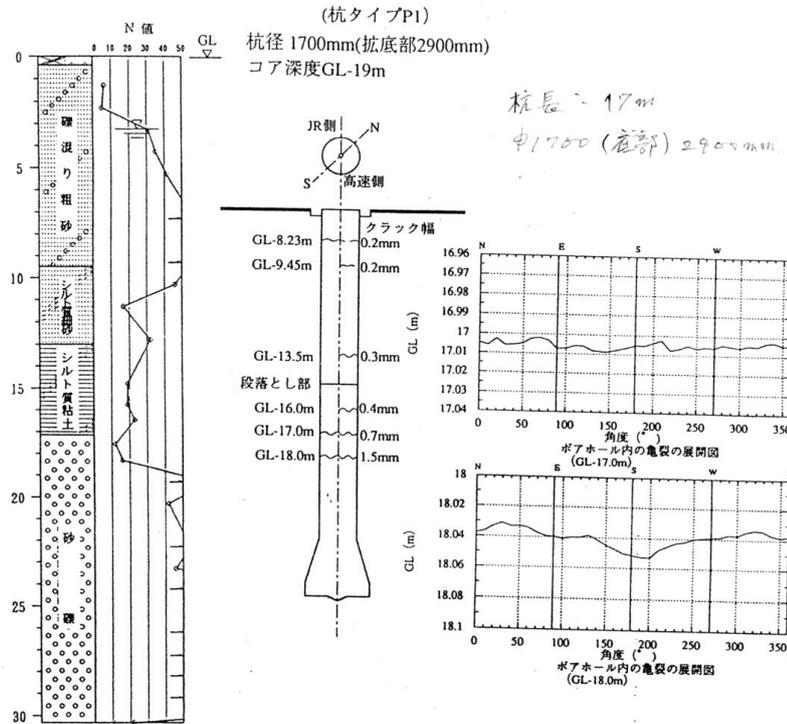


図 3.4.1 上載荷重の無い RC 杭のひび割れ損傷例

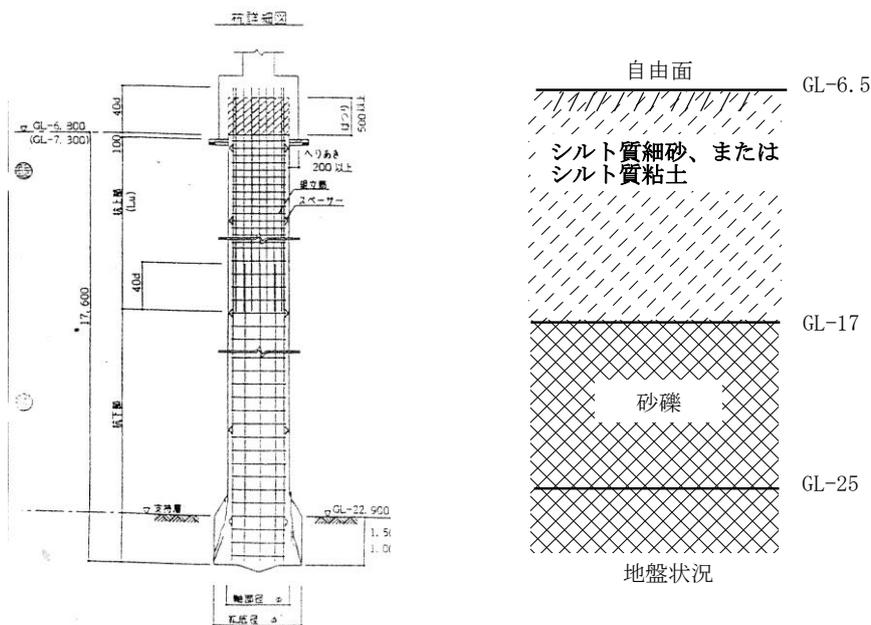


図 3.4.2 杭の配筋と周辺地盤状況

び割れ幅が 1.5mm になるような大きなひび割れが杭中央下部に見られた。なお、周辺地盤には液状化による噴射、不同沈下は認められていない。

本杭は拡底アースドリル工法で施工されたもので、この工法が認定工法に採用されただけに施工計画書に従って、とくに入念施工・品質管理が行われており、震災前には施工したすべての杭のコンクリート圧縮強度は材令 56 日で $387\text{--}496\text{kgf/cm}^2$ であり、震災後のコア抜き供試体でのコンクリート圧縮強度は、 $413\text{--}459\text{kgf/cm}^2$ であり、これらの強度はいずれも設計基準強度 (FC300) を十分満足していた。なお、杭長は 17m で杭径は 1.7m, 拡底部径は 2.9m である。

上部工が無ければ上部工の慣性力が無いので、地震時には RC 杭は周辺地盤と同じように運動し、曲げ応力が発生しないはずなのに、なぜひび割れが発生したのか？その原因については、いろいろな議論のあるところであるが、ここでは、RC 杭下端の拡底部からの突き上げ力によって誘発された圧縮力が上端で反射し、圧縮・引張力の反復によって杭断面に軸引張力が働いてひび割れが発生したと考え、ひび割れの発生に必要な突き上げ力の特性について検討を行う。

ひび割れが確認された杭の周辺地盤状況は、図 3.4.2 に示すように、杭上部の地盤はシルト細砂または粘土層であるが、杭下部の地盤は砂礫層になっている。したがって、杭下端の拡底部からの継続時間の短いパルス状の圧縮力が入射すると杭の上端は自由であることによる反射し、引張力として下端へ伝達され、杭断面には入射圧縮応力と反射引張応力の重畳が起こり、時間帯によっては軸引張が支配するので、RC 杭のコンクリートの引張強度を超えるような大きな引張応力が発生する入力条件について調べる。

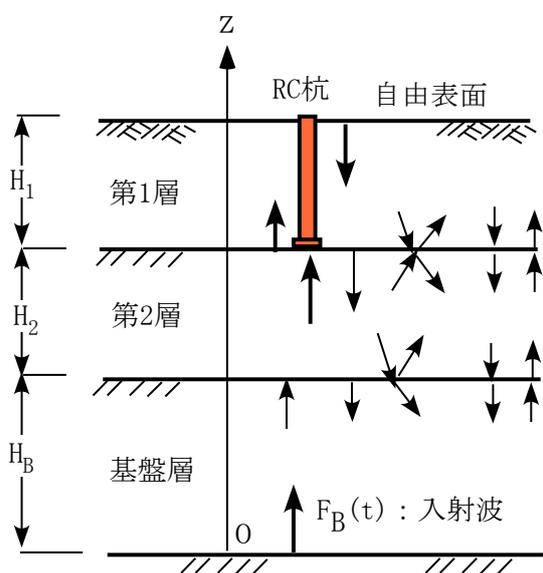


図 3.4.3 多層地盤内の RC 杭と入射波

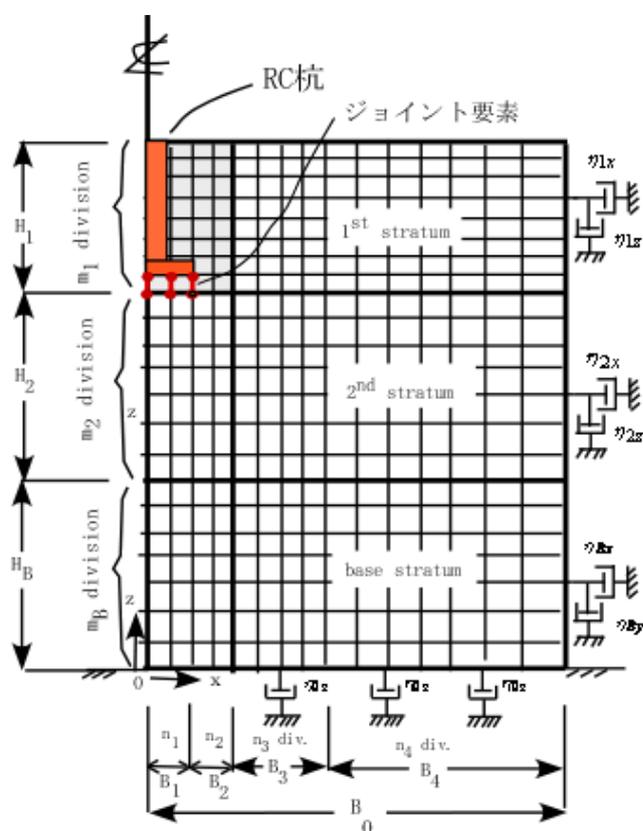


図 3.4.4 3次元軸対称 FEM モデル

図 3.4.3 に示すような 3 層弾性地盤の第 1 層は杭部を含む軟弱層であり、第 2 層は支持層、第 3 層は基盤層で、杭長は 17m であるので、 $H_1=17\text{m}$, $H_2=20\text{m}$, $H_B=40\text{m}$ とし、要素分割は図 3.3.2 の場合とほぼ同じで、 $m_1=17$, $m_2=20$, $m_B=20$ とし、 $B_1=1.45\text{m}$, $B_2=3\text{m}$, $B_3=20\text{m}$, $B_4=100\text{m}$ で、 $n_1=2$, $n_2=3$, $n_3=10$, $n_4=10$ とする。杭部は、図 3.3.7 に示した高架橋橋脚に適用した質量・バネモデル (ただし、拡底部は剛体と仮定) により取り扱い、分割数は 10 とした。また、杭拡底部と地盤との接触面にはジョイント要素を入れ、圧縮力のみが伝達するように配慮している。また、杭と周辺地盤との摩擦は無視しており、基盤層底面に適用した鉛直入射変位または速度は式(3.1)と同じ以下の式によっている。

$$U_z(t,0) = u_0(1 - \cos pt), \quad 0 \leq t \leq T_0, \quad V_z(t,0) = v_0 \sin pt, \quad 0 \leq t \leq T_0 \quad (3.4.1)$$

ただし、 $t > T_0$ では基盤層底面は粘性境界としている。

図 3.4.5 は、表 3.3.1 の地盤 A において $v_0=0.5\text{m/s}$ 、入射応力では、 $\sigma_0 = -\rho_B V_{pB} \cdot v_0$ により $\sigma_0 = -3\text{MPa}$ に相当、であるときの拡底部を除く杭断面での最大軸引張応力度の軸方向分布を示してい

る。周期： $0.04 \leq T_0 \leq 0.07 \text{ sec}$ （周波数： $25 \leq f \leq 14 \text{ Hz}$ ）の領域では、最大引張応力（ $\sigma_{t\max}$ ）は杭下端部に発生し、 $\sigma_{tm} = 12.5 \sim 13.5 \text{ MPa}$ （ $4.1 \sim 4.5\sigma_0$ に相当）となり、コンクリートのひび割れ発生応力度をはるかに超える値になっているが、図 3.4.1 での大きなひび割れ幅の発生位置は中央部の軸方向鉄筋の段落とし部の少し下部に発生しており、この部分に下端より大きな引張応力が出るのは、 $T_0 = 0.01 \sim 0.02 \text{ sec}$ （ $f = 50 \sim 100 \text{ Hz}$ ）の周波数領域であり、 $\sigma_{tm} \approx 8 \text{ MPa}$ 程度である。一方、表 3.3.1 の地盤 B を適用した場合の最大軸方向応力を示したものが図 3.4.6 である。杭中央部に最大引張応力が発生するのは $T_0 = 0.01 \text{ sec}$ （ 100 Hz ）の場合のみであり、 $\sigma_{tm} = 9 \text{ MPa}$ 程度になっている。なお、 $T_0 < 0.01 \text{ sec}$ の超短周期領域の解析には、FEM 要素分割の細密化が必要になりここでは省略しているが、図 3.4.2 の地盤図は表 3.3.1 の地盤 A と地盤 B の特性に含まれているものとする。

以上の結果、衝撃引張荷重の下でのコンクリートのひび割れ発生応力度は静的引張応力度よりかなり大きくなると思われるが、 $\sigma_{tm} = 8 \sim 9 \text{ MPa} = 80 \sim 90 \text{ kgf/cm}^2$ はひび割れ発生を起こすのに十分な値と思われるので、基盤層での入射応力： $\sigma_0 = -3 \text{ MPa}$ は本 RC 杭の中央部にひび割れを発生させるに十分な値と推測でき、3.3.2 で取り上げた兵庫県南部地震での高架橋 RC 橋脚の柱部を引張破壊させるに十分な入射応力（ σ_0 ）の存在の証拠の一つになり得るものと思われる。

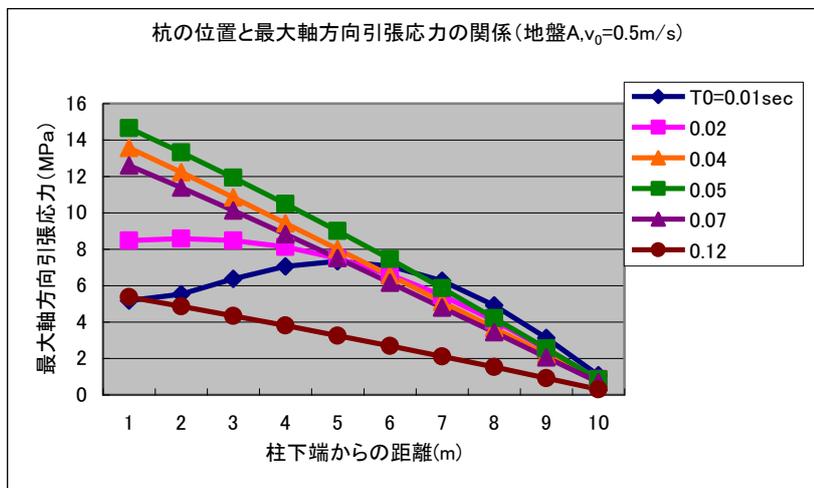


図 3.4.5 杭断面での最大軸引張応力度の分布（地盤 A, $v_0 = 0.5 \text{ m/s}$ ）

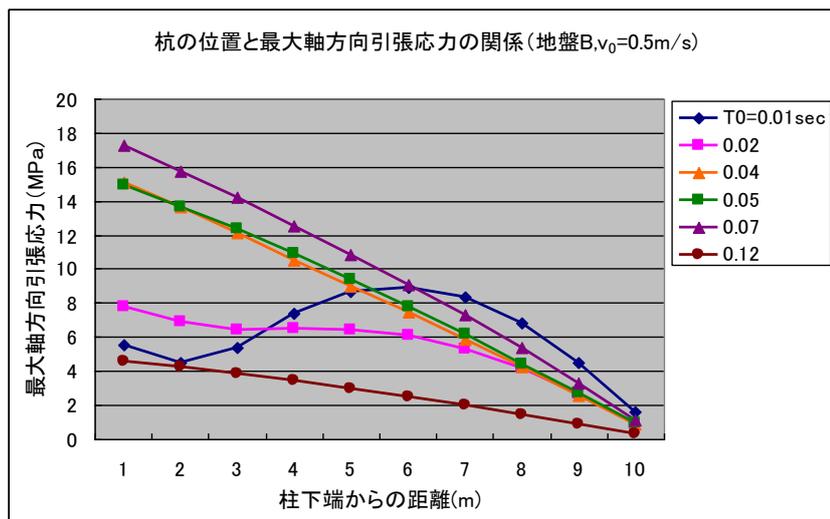


図 3.4.6 杭断面での最大軸引張応力度の分布（地盤 B, $v_0 = 0.5 \text{ m/s}$ ）

3.4.2 地震の観測からの入射波の周波数特性の検討

文献 3.5), 3.6), 3.7)によれば、兵庫県南部地震に播磨灘沖を航行中の「フェリーおおさか(9000 トン級)」（震央距離約 28km）では吹き抜け部のシャンデリア 2 個が落下破壊しており、また、明石海峡を航行中の「あさぎり丸(千トン級)」および「クイーンダイヤモンド号(九千トン級)」の船長らによる“衝撃

的上下動に見舞われ、一瞬操縦困難に陥った”との証言もあった。それらの船の航行海域での水深は30mから100m程度と推測される。

以下、図3.4.7に示すように、海震における浮体構造物の喫水面（ $z = -H_d$ ）での圧力応答について検討する。構造物は剛体と見なし、自重と浮力はつりあっているため、ここでは自重を考慮せず、厚さ H の水層と半無限弾性基盤の2層からなる弾性体への基盤層の深部からの鉛直入射波による浮体構造物の喫水面での圧力応答を調べる。

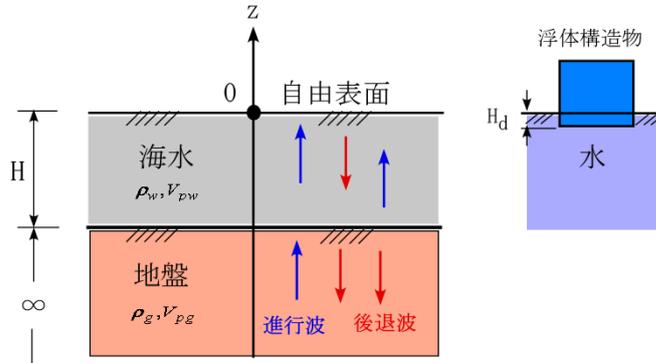


図 3.4.7 海震における浮体構造物への圧力

前述の式(3.1.9)および(3.1.10)で示したように、基盤層深部からの入射変位および速度ならびに応力波を以下のように与える。

$$U_2(t, z) = u_0 \cdot \cos(pt - f_2 z), \quad V_2(t, z) = v_0 \cdot \sin(pt - f_2 z), \quad S_2(t, z) = \sigma_0 \cdot \sin(pt - f_2 z) \quad (3.4.2)$$

ここに、 $v_0 = -pu_0$ 、 $\sigma_0 = -\rho_2 V_{p2} \cdot v_0$ 、ただし引張を正とする。

海水層での密度および縦波速度は、 $\rho_1 = 1.0t/m^3$ 、 $V_{p1} = 1500m/s$ とし、基盤層のそれらを $\rho_2 = 2.5t/m^3$ 、 $V_{p2} = 5000m/s$ とすれば、インピーダンス比： $\alpha = \rho_1 V_{p1} / \rho_2 V_{p2} = 0.12$ であり、式(3.1.13)より海水層での応力波は以下のように表せる。

$$S_1(t, z) = 2\alpha\sigma_0 \sin\left(q \frac{z}{H}\right) \cdot \frac{\cos\left\{pt - \tan^{-1}(\alpha \tan q)\right\}}{\sqrt{\cos^2 q + \alpha^2 \sin^2 q}} \quad (3.4.3)$$

つぎに、下層地盤の深部から上方に向かう弾性地盤内の鉛直入射変位波として式(1.3)の実部を採り以下のように与える。

$$U_2(t, z) = u_0 \cdot \cos(pt - f_2 z) \quad (3.4.4)$$

ここに、 u_0 ：入射波の鉛直変位振幅、 $p = 2\pi/T_0$ 、 T_0 ：周期、 $f_2 = 2\pi/L_2$ 、 L_2 ：入射波の波長($T_0 V_{p2}$)である。また、式(3.3.1)の鉛直入射変位波を、鉛直入射速度または鉛直入射応力で表せば、

$$V_2(t, z) = v_0 \cdot \sin(pt - f_2 z), \quad S_2(t, z) = \sigma_0 \cdot \sin(pt - f_2 z) \quad (3.4.5)$$

ここに、 $v_0 = -pu_0$ 、 $\sigma_0 = -\rho_2 V_{p2} \cdot v_0$ 、ただし引張を正とする。

海底地盤での密度と縦波速度を $\rho_2 = 2.5t/m^3$ 、 $V_{p2} = 5000m/s$ と仮定すれば、インピーダンス比： $\alpha = \rho_1 V_{p1} / \rho_2 V_{p2} = 0.12$ であり、式(3.4.3)を用いて、喫水面（ $H_d = -5m$ ）での最大圧力の入射応力（ σ_0 ）に対する比（ p_{\max} / σ_0 ）と周波数（ f/T_0 ）との関係を求めれば、図3.4.8のようになり、また、喫水面（ $H_d = -10m$ ）での同様の関係を示せば、図3.4.9のようになる。いずれの喫水面においても、 $H = 80m$ の海底では、 $T_0 = 0.03sec$ （ $f = 33Hz$ ）と $T_0 = 0.07sec$ （ $f = 14Hz$ ）の時に大きな圧力が発生しており、前述のクイーンダイヤモンド号の船長が経験された海震の周波数は $14Hz$ から $30Hz$ の領域にあったと推測される。

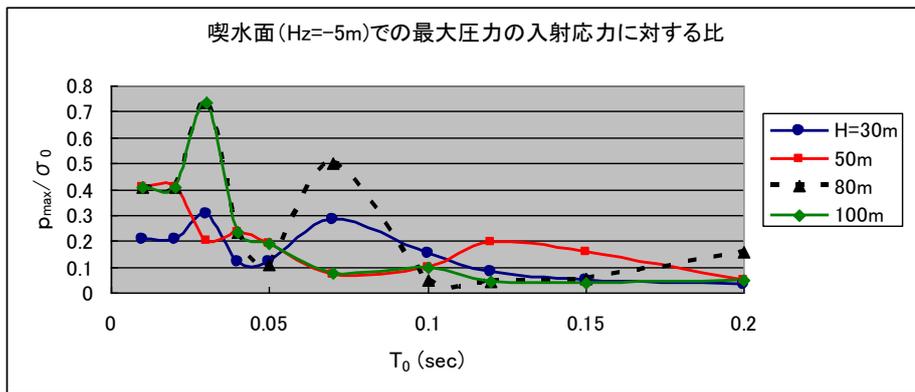


図 3.4.8 喫水面 ($H_d = -5m$) での圧力の周波数特性

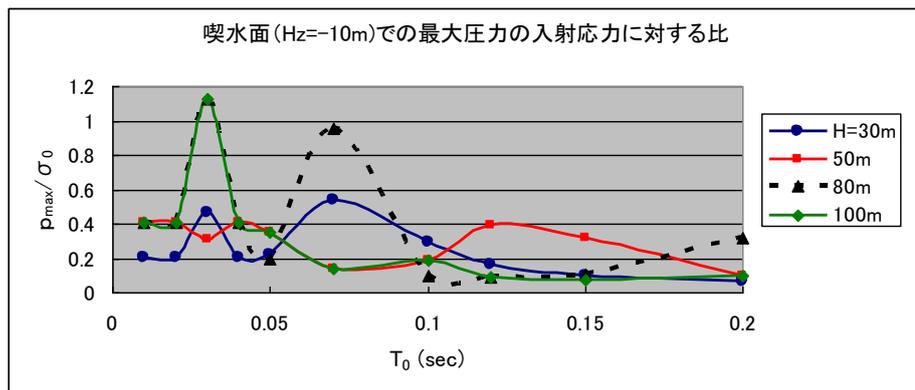


図 3.4.9 喫水面 ($H_d = -10m$) での圧力の周波数特性

参考文献

- 3.1) Sezawa,K. and Kanai,K.: Decay Constants of Seismic Vibrations of a Surface Layer, Bull.Earthq.Res. Inst., 8,1930, pp.1-11
- 3.2) Kanai,K. : The Requisite Conditions for the Predominant Vibration of Ground,Bull. Earthq.Res. Inst.,35 (1957),pp.457-471.
- 3.3) Sonoda,K and Kitoh,H:Vertical Impulsive Forces to a Structure on Multi-layered Grounds at Near Field Earthquake, Memoirs of the Faculty of Engineering, Osaka City University, Vol.56 Dec.2015
- 3.4) 阪神・淡路大震災調査報告, 建築編-4, 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会, 日本建築学会,他, 1996年
- 3.5) 園田恵一郎, 小林治俊, 永野 圭: 兵庫県南部地震-初期上下動の証言について, 大阪市立大学工学部紀要・震災特別号, 1997年1月
- 3.6) Uenishi,K. and Sakurai,S.:The Generation of Seaquakes and its Impact on Floating Bodies, International Journal of Protective Structures, Vol.5,No.2, June 2014
- 3.7) 「科学」 Vol.66,no.2, より引用

(文責：園田恵一郎)

4. 積層繊維補強ゴムを用いた衝撃緩衝材の提案

4.1 はじめに

衝撃緩衝材として、ゴムに繊維を積層埋設し剛性と強度を向上させた積層繊維補強ゴム（写真 4.1）に着目した。積層繊維補強ゴムは、繊維の非可逆的な塑性変形や破壊によって衝撃エネルギーを吸収するとともに、ゴム本来の柔軟性による衝撃荷重の低減効果をも期待した緩衝材である。

ここでは、積層繊維補強ゴムの静的な力学特性や衝撃的な外力が作用した際の力学特性について整理するとともに、それらの結果から、積層繊維補強ゴムを衝撃緩衝材として適用する際の定量的な設計手法について提案を行った。

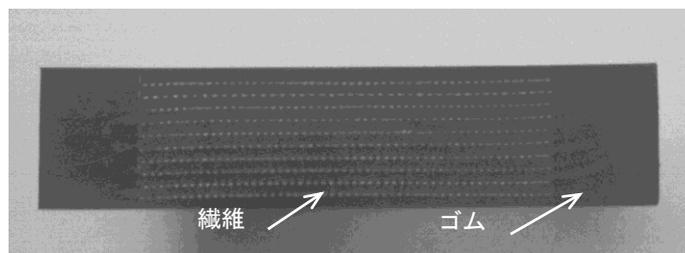


写真 4.1 積層繊維補強ゴム（断面写真）

4.2 静的力学特性

積層繊維補強ゴム試験体の埋設繊維の種類は、表 4.1 に示す破断強度が異なる 3 種類の汎用繊維とし、ゴムは硬度 65 の天然ゴムを使用した。試験体の形状は、縦 150mm×横 150mm×厚さ 50mm とし、表 4.1 に示す繊維材を硬度 65 のゴム中に、厚さ方向に対して均等に 1, 5, 25, 50 枚積層埋設した。

静的圧縮実験より得られた荷重～変位関係を図 4.1 に示す。図 4.1 に示す荷重～変位関係には、剛性が急激に変化する降伏点（埋設繊維の初期破断点）が存在する。その後も埋設繊維が逐次破断することにより、変位が進行してもほぼ一定の荷重レベルを示すことがわかる。

この降伏荷重は、図 4.2 に示すように各繊維強度とも積層枚数と比例関係にあることから、埋設繊維の強度や積層枚数を適宜選択することにより、任意に降伏荷重を設定できるといえる。すなわち、積層繊維補強ゴムは、降伏点の存在により、ゴム単体では実現できなかった従来の耐力を基にした設計手法が可能になるとともに、任意に降伏荷重を設定できる非常に設計自由度の大きい材料であるといえる。

表 4.1 ゴムおよび繊維の材料諸元

	積層繊維補強ゴム				ゴム	
	高強度繊維	中強度繊維	低強度繊維	ゴム		
材質	ナイロン	6,6-ナイロン	ビニロン	天然ゴム(NR)系	天然ゴム(NR)系	
引張強度	1764 (N/cm)	882 (N/cm)	588 (N/cm)	10.2 (MPa)	20.4 (MPa)	10.2 (MPa)
破断時の伸び	40 (%)	25 (%)	20 (%)	600 (%)	600 (%)	600 (%)
硬度	—	—	—	65	50	65
構成糸	2520 (denier)	1260 (denier)	1200 (denier)	—	—	—

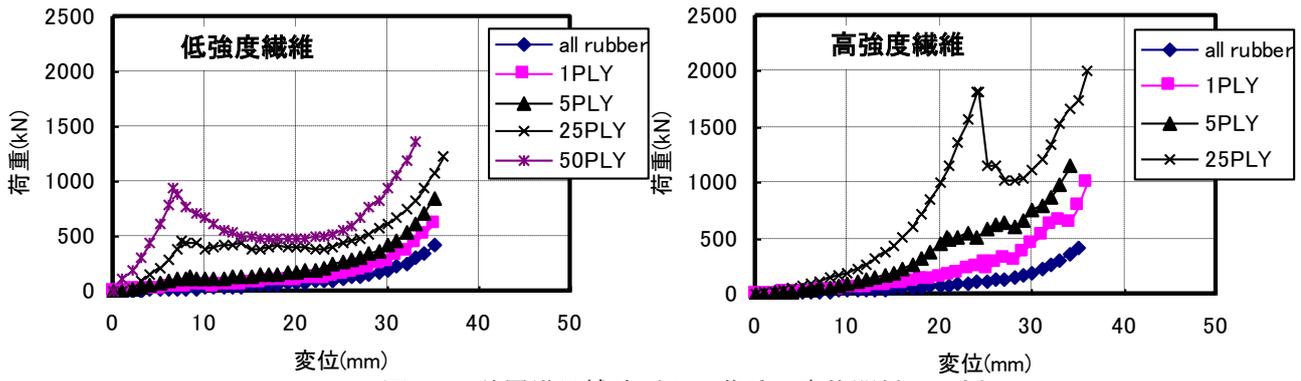


図 4.1 積層繊維補強ゴムの荷重～変位関係の一例

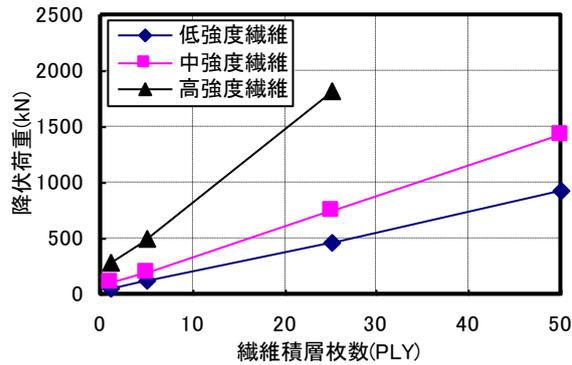


図 4.2 降伏荷重～積層枚数関係

4.3 動的力学特性

衝撃緩衝材として積層繊維補強ゴムを適用する際には、高速圧縮されると考えられる。そのため、静的圧縮実験と同様の供試体を用いて、急速載荷装置を用いて、載荷速度 10^{-2} 、 10^{-1} 、 1.0m/sec にて高速圧縮をおこなった。得られた荷重～変位関係を図 4.3 に示す。図 4.3 より、積層繊維補強ゴムは、降伏点までの荷重～変位関係では通常のゴムと比較して載荷速度の影響が小さく、降伏点以降では、繊維の破断によりゴムの影響が支配的になるため、やや速度依存性を有することが確認された。

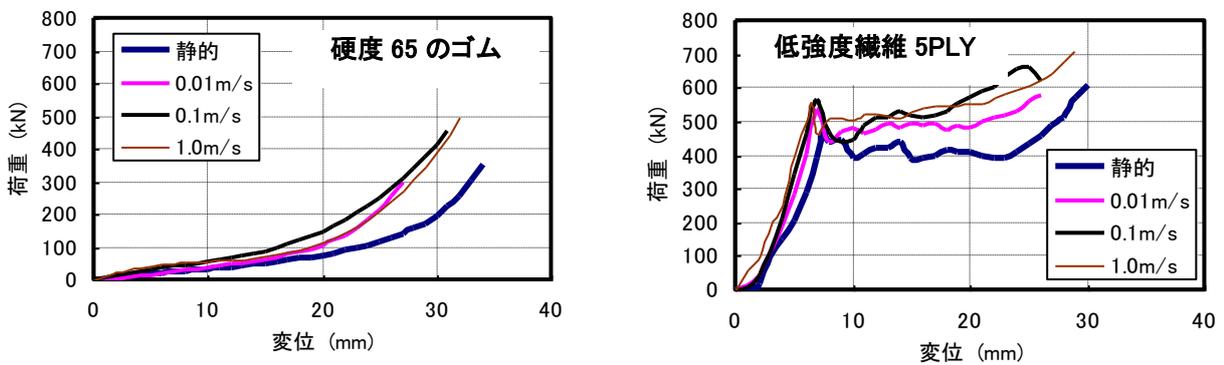


図 4.3 高速載荷実験結果の一例

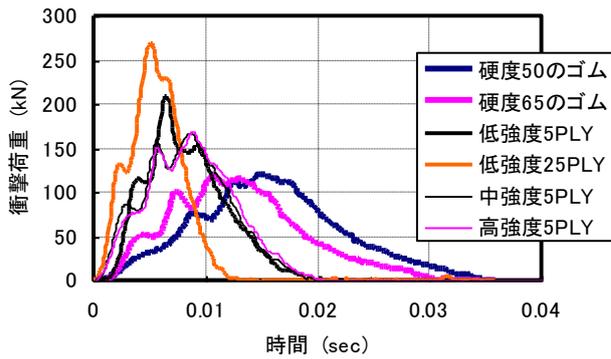


図 4.4(a) 衝撃荷重～時間関係
入力エネルギー1.0kN・m

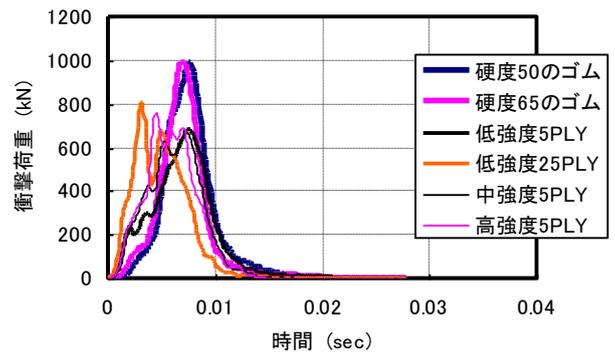


図 4.4(b) 衝撃荷重～時間関係
入力エネルギー10.0kN・m

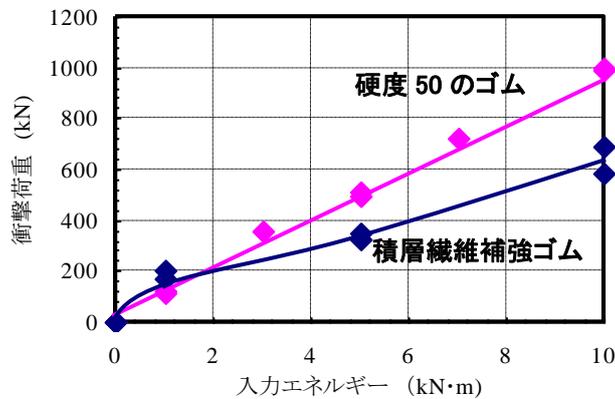


図 4.5 硬度 50 のゴムと積層繊維補強ゴム (低強度繊維 5PLY) の比較

4.4 衝撃緩衝効果

積層繊維補強ゴムに衝撃的な外力が作用した際の緩衝効果を検証することを目的として、落錘式衝撃実験を実施した。本実験に使用した供試体も静的圧縮実験と同じとした。作用する衝撃的外力（エネルギー）は、積層繊維補強ゴムの埋設繊維が破断しないエネルギー量 1.0kN・m と確実に破断するエネルギー量 10.0kN・m に相当する。

得られた衝撃荷重～時間関係を図 4.4 に示す。図 4.4 より、埋設繊維が破断しない外力レベル (1.0kN・m) では、通常のゴムと比較して、積層繊維補強ゴムの方がゴム単体と比較して剛性が大きいと衝撃荷重が大きい値を示すが、繊維が確実に破断する外力レベル (10.0kN・m) では、繊維が破断することで通常のゴムより衝撃荷重が小さい値を示した。

以上のことを、図 4.5 に示す硬度 50 のゴムと積層繊維補強ゴム (低強度繊維 5PLY) の衝撃荷重～入力エネルギー関係を比較して示した。積層繊維補強ゴムは、通常のゴムと比較して、あるエネルギー量を境に衝撃荷重が小さくなるのがわかる。さらに、埋設繊維が破断し始める入力エネルギーレベルでは、衝撃荷重の増加率も小さくなり、通常のゴムと比較して、幅広いエネルギーレベルで衝撃荷重を低減する効果を有するといえ、非常に有用な衝撃緩衝材といえる。

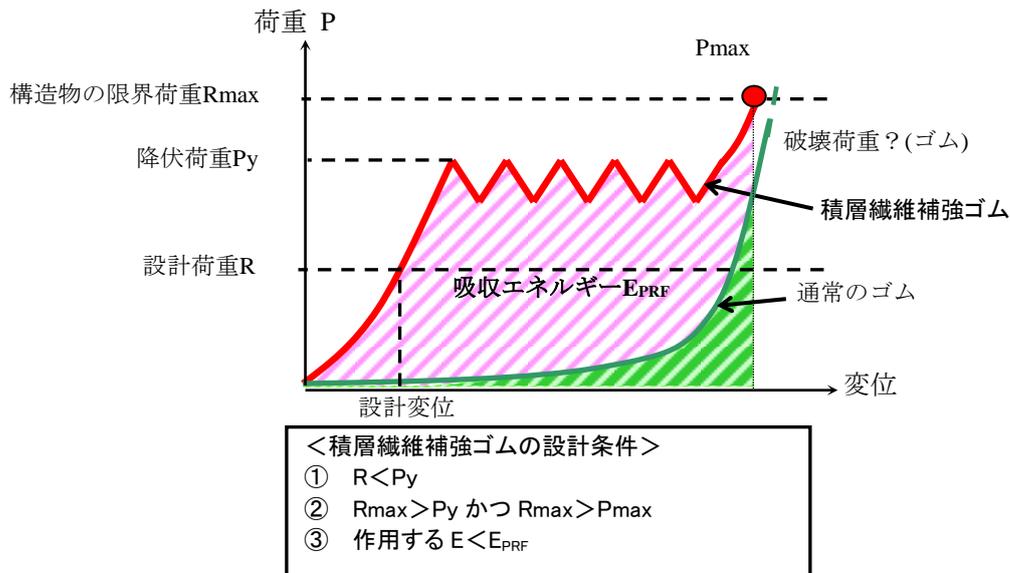


図 4.6 PRF 緩衝材の設計概念図

4.5 積層繊維補強ゴムの設計手法の提案

一般に、ゴムなどの弾性材料では、荷重～変位関係が 2 次曲線的に増加するため、エネルギー～発生荷重関係も同様の傾向となり、与えられるエネルギーが増加するとともに発生荷重も増加する。このような力学特性では、構造物に想定以上の衝撃エネルギーが作用した場合、発生する衝撃荷重が構造物の設計耐力以上となる可能性が懸念される。

しかし、積層繊維補強ゴムは、ある荷重レベルに達した後に変形が進行しても荷重レベルをほぼ一定値に保つような力学特性を示すため、その荷重レベルを十分に考慮して設計すれば、与えられるエネルギーが増加しても発生荷重をある一定値に抑えることができるといえる。積層繊維補強ゴムでは、この荷重レベルを降伏点（降伏荷重）と設定することで、構造物の安全性を向上させる緩衝材としての機能を確実に発揮するものといえる。

以上のことを要約すると、積層繊維補強ゴムの設計概念は図 4.6 に示すようになる。図 4.6 より、供用期間中に発生する確率が高いものの比較的小さい外力に対しては、積層繊維補強ゴムの弾性範囲内で対応し、供用期間中に発生する確率は小さいものの大きな外力に対しては、積層繊維補強ゴムの降伏点以降の変形性能で対応し、想定される構造物の限界強度以下で、かつ、作用するエネルギーを吸収するように設定されることが望ましいといえる。

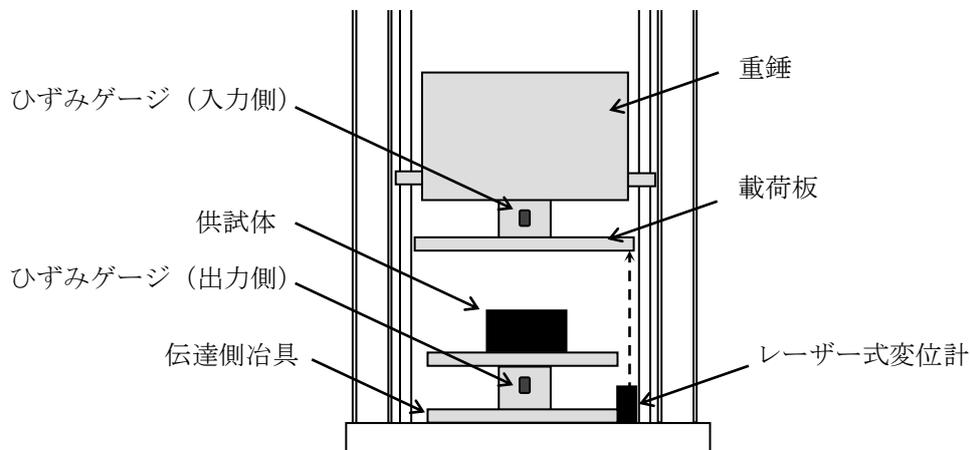


図 4.7 衝撃的な外力が作用した際の応答特性の評価実験のイメージ図

4.6 おわりに

本報告では、積層繊維補強ゴムの力学特性と衝撃緩衝効果について述べ、それを衝撃緩衝材として適用する際の設計手法について整理した。これまでの研究では、積層繊維補強ゴムの素材としての力学特性や衝撃的な外力を作用させた場合の衝撃伝達荷重（出力側）について着目していた。

今後は、積層繊維補強ゴムの特性を活かし、図 4.7 に示すように、衝撃的な力が作用した場合の衝撃外力（入力側）と衝撃伝達荷重（出力側）の応答特性の違いなどについて実験的に考察するとともに、実橋梁に適用する際のデバイスとしての構造検討を行うなどして、あらゆる方向に対して有効な衝撃緩衝材の提案を行う予定である。

参考文献

- 1) 西本安志, 梶田幸秀, 石川信隆, 西川信二郎: 落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの動的特性に関する実験的研究, 構造工学論文集 Vol.46A, pp.1865-1874, 2000.03.
- 2) 西本安志, 梶田幸秀, 石川信隆, 西川信二郎: 落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの落錘式衝撃実験と伝達荷重の予測に関する一考察, 構造工学論文集 Vol.47A, pp.1655-1664, 2001.03.
- 3) 西本安志, 梶田幸秀, 彦坂熙, 石川信隆, 西川信二郎: 繰返し衝撃荷重を受ける積層繊維補強ゴムの衝撃緩衝効果に関する研究, 構造工学論文集 Vol.49A, pp.1333-1342, 2003.03.
- 4) 西本安志, 園田佳巨, 小野田忠弘: 積層繊維補強ゴムの設計手法に関する一考察, 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集 Vol.8, pp.231-236, 2006.11.
- 5) 下仲結城, 金冶英貞, 大濱浩二, 西本安志, 浮島徹: 港大橋すべり支承免震システムにおける落橋防止装置用緩衝材の設計と性能, 第 8 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.169-175, 2005.02.

(文責 西本安志, 石丸和宏)

関連した発表論文

- 1) 前原博, 櫻井春輔: 構造物の地震時衝撃破壊の代表例について, 国交省近畿地整局 平成 24 年度研究発表会, 防災・保全部門 No.19, 2012.7
- 2) 前原博, 櫻井春輔: 海震と証言による橋脚の地震時破壊原因の見直し, 国交省近畿地整局 平成 25 年度研究発表会, 防災・保全部門 No.13, 2013.7
- 3) 前原博, 櫻井春輔, 園田恵一郎: 地震時の破壊的な粗密波の存在と橋脚の破壊原因の見直し, 安全工学シンポジウム 2013, GS3-2, 2013.7
- 4) 前原博, 櫻井春輔: 地震時の破壊的な衝撃動の特徴と地震直前予知の実用化について, 国交省近畿地整局 平成 26 年度研究発表会, 防災・保全部門 No.22, 2014.7
- 5) 園田恵一郎, 前原博, 櫻井春輔: 都市直下型大地震での公共構造物の被害の特徴ー阪神大震災からの教訓ー, 安全工学シンポジウム 2014, GS6-2, 2014.7
- 6) 前原博, 櫻井春輔: 阪神淡路大震災での衝撃的鉛直地震動とその局在波的性質, 国交省近畿地整局 平成 27 年度研究発表会, 防災・保全部門 No.19, 2015.6
- 7) 前原博, 園田恵一郎, 櫻井春輔: 見落とされている強力な衝撃的鉛直地震動の問題を考える, 安全工学シンポジウム 2015, GS6-2, 2015.7
- 8) 長谷川尚輝, 浅田宗磨, 山内里絵, 石丸和宏: 直下地震で見られる跳び石現象に関する一考察, 土木学会, 土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), 2015.9
- 9) 前原博, 園田恵一郎, 櫻井春輔: 巨大地震での高架橋 RC 橋脚の鉛直衝撃破壊とその出現形態, 日本地震学会, 日本地震学会秋季大会, SS22-13, 2015.10
- 10) 櫻井春輔, Chouw Nawai, 石川信隆: 兵庫県南部地震(1995)における上下地震波存在した., 日本地震学会, 日本地震学会秋季大会, SS22-14, 2015.10
- 11) 園田恵一郎, 櫻井春輔, 野中泰二郎: 直下型地震における構造物への衝撃的突き上げ力, 日本地震学会, 日本地震学会秋季大会, SS22-15, 2015.10
- 12) 前原博, 園田恵一郎, 櫻井春輔: 破壊的な鉛直地震動の発生形態と特徴, 安全工学シンポジウム 2016, GS9-2, 2016.7

あとがき

“地震による構造物の損傷に与える影響は水平動によるものがほとんどで、鉛直動によるものは少ない”と一般的には言われてきましたが、直下地震のように震源から比較的近い位置にある構造物に対してもこの考えが当てはまるのでしょうか？本研究グループは、兵庫県南部地震での構造物の被害を中心に分析した結果、高架橋の橋脚や地下鉄駅舎などの柱部の損傷は短周期の上下動による影響との見方を固め、平成 27, 28 年度の 2 年間の活動を続けて参りました。

“地震動は「複雑さの 3 乗」である”とは、確か、故・金井清先生（元東京大学地震研究所教授）のお言葉であったように思いますが、構造物に与える地盤振動の卓越周期は水平動に比べて上下動がはるかに短く、高周波領域での地盤と構造物の動的特性の評価は非常に複雑な問題と言わねばなりません。

本報告書は 2 年間の成果をまとめたものでありますが、課題の大きさに比べて得られた知見はごく限られたものであり、今後のより広範な議論のきっかけにでもなればと願うところであります。

付録

都市直下地震における耐震問題に関する研究 平成 27 年度第 1 回議事録

- ・日 時：2015 年 4 月 21 日(火) 13:30～16:30
- ・場 所：神戸大学都市安全研究センター 2 階会議室 R208
- ・出席者：石丸委員(代表), 櫻井委員, 野中委員, 園田委員, 前原委員, 中岡委員, 西本委員
 - ・欠席者：酒造委員, 佐藤委員

- ・配布資料：
 - 1-1. 開催案内・議事次第
 - 1-2. 情報交換会 議事録(3 月 25 日)
 - 1-3. 資料手渡しメモ(4.18, 4.20), 説明と資料手渡しメモ(2.20)
 - 1-4. 年次講演・発表会等の投稿の取組状況
 - 1-5. 地震時の強力な衝撃的鉛直動の局在波的な形態の検証に向けて(平成 27 年度土木学会関西支部)
 - 1-6. [随想]見落とされてきた地震時鉛直キラーパルス(検討用,常磐 No.75 用原稿)
 - 1-7. 仮題：直下型地震での構造物への突き上げ力と発生機構

- ・議 事：
 - (1) 本研究会の研究代表石丸委員より挨拶および研究会の開催経緯について説明された。

 - (2) 出席者の自己紹介が行われた。

 - (3) 前原委員からの活動報告：
 - 1. 情報交換会の報告：

櫻井委員が代表を務める内陸直下型地震における耐震問題研究会にて行われたオークランド大学教授・東京工業大学客員教授 Nawawi Chouw 先生との情報交換会の講演要点の報告がなされた。

その中で、兵庫県南部地震での水平動より強い鉛直動の話題と外国では鉛直ばね付き免震ゴム支承が使われている話題の報告があった。
 - 2. 活動紹介資料の配布状況：
 - ・2 月(20 日)から 4 月(18 日,20 日)の資料の配付状況を報告。その中で藤永准教授(2.20)に面会して説明できたことで藤谷教授, 向井准教授を含め 3 名の建築学科の先生に説明できた。数学科の先生 3 名にも既に説明いる。しかし土木系の先生方にはまだ接触できていない。
 - ・資料外であるが 1 月 24 日には石橋克彦神戸大学名誉教授にも資料を渡している。川島一彦名誉教授(東京工業大学)には 4 月 20 日に資料を手渡す依頼をしている。(23 日の状況確認で事務局担当者は手渡し損ねました。資料には手渡し不可と修正記載の予定)
 - 3. 例年の年次発表会等 3 件の取組状況：
 - ・関西支部の年次講演会(5 月 30 日)の投稿原稿が資料 1-5 で, 表題は, 「地震時の強力な衝撃的鉛直動の局在波的な形態の検証に向けて」。
 - ・近畿地整局(A4-6 頁)と安全工学シンポジウム(A4-4 頁)も申込み課題の採択通知があった。表題はそれぞれ, 「阪神淡路大震災での衝撃的鉛直地震動とその局在波的性質」, 「見落とされている強力な衝撃的鉛直地震動の問題を考える」。
 - ・上記の 3 件の今年の発表は局在波的な特徴に着目したもので, 関西支部の原稿・資料 1-5 が概要に相当し, 資料の補足量と説明の焦点を少し変化させて, 後の 2 件の原稿を作成する予定。
 - ・資料 1-6 は同窓会誌用の原稿(資料 1-4 の第 4 項)で, 本音の話を随想として少し書き込んでいる。安全工学の原稿ではその部分を除き, 現象(海震・跳び石)や破壊事例を中心に纏める予定。

- (4) 今後の共同研究グループとしての活動について石丸委員より説明があった。
- ・関西支部事務局とのやりとりと今日の開催経緯について報告があった。
 - ・共同研究会は年4回を予定している。ワークショップは来年の関西支部の年次大会に予定する。
 - ・助成金の使途で、旅費の対象者を野中委員、中岡委員、西本委員とする。
 - ・衝撃問題の古い年代の研究者の話があり、谷村先生(大阪府立大学)や小林先生(大阪市立大学)の話があった。
 - ・鉛直ばね付き免震ゴム支承の現状に関し GERB 社(独)等を含め西本委員に調査戴くことにする。
- (5) 日本地震学会 2015 年度秋季大会（神戸国際会議場）における論文発表について園田委員より説明された。
- ・多層弾性地盤を1次元のマス・バネモデルで表し、重複反射理論(金井の解)の検討では、層厚を反映した1/4波長則に相当する固有周期のピークが現れた。小さい周期で大きなピークが出ている。
 - ・3次元軸対称 FEM モデルによる橋脚(単柱)と多層地盤に似せるように、地盤と構造体との間にジョイント要素(引張力は0)を入れ、段階的にモデルの形態を変えて、入射波の周期 T_0 と入射速度 V_0 、構造物の自重を変化させて試算をし、傾向を順次確かめながらモデルの精度を上げた。
 - ・3次元軸対称 FEM による試算結果の特徴的な事柄は、入射速度 V_0 が小さいと自重による応力内で発生応力波は振動する。 $V_0=0.1\text{m/s}$ では入射波周期 $T_0>0.05\text{sec}$ でパルス状の突き上げ力が発生する。 $T_0=0.1\text{sec}$ の時には地盤中央の最大応力は自重の3.5倍に達した。観測時間($T_{\text{obs}}<0.28\text{sec}$)内で第2波の応答値が大きくなる場合がある。
 - ・橋脚と地盤をモデル化した試算結果は、圧縮側の最大応答値は $T_0=0.1-0.25\text{sec}$ の広い周波数帯域で現れるが、引張側では $T_0=0.05-0.1\text{sec}$ と比較的狭い周波数帯域で現れる。自重による応力を加味すると、高周波域の動的最大応力は圧縮側と引張側でほぼ同じになっている。
 - ・入射波の周期が高架橋の鉛直固有周期がほぼ同じような状態で、大きな鉛直速度を受けるとコンクリートのひび割れ破壊が発生し、その後、圧縮力による交番損傷に繋がること指摘される。
- (6) 投稿の取組状態について前原委員より説明があった。
- ・櫻井委員、園田委員及び前原幹事の3名が地震学会の会員申込をし、今日開かれる理事会で承認されると通知と一緒に会費納入書が届く予定。秋季大会は10月26日(月)–28日(水)に開催予定。
 - ・秋季大会の案内は7月のニューズレター等で公開される予定で、予稿集原稿はA4-1頁です。
 - ・題名については3題を予定しており、下記の方針になった。
 1. 前原幹事担当分は「強烈的な衝撃的地震動の存在と構造物の破壊形態及び分布の特徴」
 2. 園田委員担当分は「直下型地震での構造物への突き上げ力と発生機構」3 題目は櫻井代表が担当される。連名者は後日調整するが、2 題目には園田委員、櫻井代表を、3 題目では櫻井代表、Nawawi 先生、石川委員を予定する。
- (7) 次回の研究会は西本委員のお世話になり、シバタ工業での開催を予定する。

以上

都市直下地震における耐震問題に関する研究 平成 27 年度第 2 回議事録

- ・日 時：2015 年 8 月 19 日(水) 13:30～16:30
- ・場 所：明石工業高等専門学校共同教育センター
- ・出席者：石丸委員(代表), 櫻井委員, 野中委員, 園田委員, 前原委員, 西本委員
- ・欠席者：酒造委員, 佐藤委員, 中岡委員

・配布資料：

- 2-1. 議事次第
- 2-2. 積層繊維補強ゴムの衝撃緩和効果に関する基礎的研究
- 2-3. 落橋防止壁用緩衝材 PRF(Poly Rubber Fiber)緩衝材
 - 2-4. 千切れたホールダウン金物（中越地震）
- 2-5. ダイヤモンド座屈したタンク
 - 2-6. [随想] 見落とされてきた地震時鉛直キラーパルス（常磐 No.75 用原稿,7.18 発刊）

・参考資料：

- ・共同研究の目的と調査研究事項（都市直下地震における耐震問題に関する研究）
- ・直下型地震における構造物への衝撃的突き上げ力（日本地震学会 秋季大会 投稿予稿原稿）

・議 事：

- （1）次年度に向けての研究課題の方向性（櫻井委員より）；
 - ・前回 4 月の研究会の後、今年を中心課題の一つである地震学会秋季大会での発表の件では、吉岡先生が進められたと思われる特別セッション S22 に 3 題予稿原稿の投稿ができた。初めての経験であり手続きに気を遣い少し間が開いた。3 題とも採択される事を期待している。
 - ・免震支承が耐震対策として普及していることに対し、衝撃的突き上げ力の対策は日本では遅れている。外国の状況を調べ、情報を西本委員の下に集めて戴きたい。衝撃的突き上げ力対策を日本で最初に発案すれば特許の取得を目指すことができる。
 - （2）シバタ工業の工場見学の計画；
 - ・次回の研究会は西本委員のお世話になり、シバタ工業の見学会の開催を予定する。
 - ・石川先生とシバタ工業の都合を伺い、地震学会秋季大会後の 11 月に開催するように調整する。
 - ・その時の検討会には地震工学関係のふさわしい方（伯野先生など）の参加が戴けるとよい。
 - （3）物体の跳躍に関する研究（石丸委員より）；
 - ・物体の跳躍現象に関する研究で、石丸委員の主な実験やシュミレーション等を投影で報告された。
 - ・大町先生等の実験にも不完全さがあるので、跳び石現象を実験的に正確に再現してみたい。
 - （4）ゴムと繊維を複合した衝撃緩衝材の研究（西本委員より）；
 - ・船舶や大型構造物の緩衝材について、その性能などを資料 2-2 に関し投影で説明戴いた。参考として資料 2-3 も合わせて説明された。
 - ・外国の情報として DIN の規定も調べてみたい。地震時の衝撃問題では上下動とか地震動という表現は馴染まず、地震時の衝撃力は応力波によると考えられるが、単に衝撃波という表現もその専門家の立場からはふさわしくない。また地震に対して直下型とか型を付けた表現も馴染まない。そこで「直下型地震」でなく名称や用語は「直下地震」とする提案がされた。
 - ・局部的な衝撃的突き上げ力対策だけでなく、部分が破壊されても全体は崩壊しないというフェールセーフの思想を構造系には反映させたい。
 - （5）その他；
 - ・前原幹事長より資料 2-4、2-5(共に A4-1 枚は言葉を知るための写真が主体)及び 2-6 について簡単に紹介した。
- *次年度の活動の目標やアイデアに関する項目の案を 9/10 迄に石丸委員に提出する。 以上

都市直下地震における耐震問題に関する研究 平成 27 年度第 3 回議事録

- ・日 時：2015 年 11 月 20 日(金) 13:30～17:30
- ・場 所：シバタ工業株式会社 本社工場および会議室
- ・出席者：櫻井委員，野中委員，園田委員，西本委員，酒造委員，中岡委員，前原委員
- ・招聘講師：石川信隆先生(防衛大学校名誉教授)
- ・欠席者：石丸委員(代表)，佐藤委員

・配布資料：

3-1. 議事次第

3-2. 『衝撃的上下動に関する実験的研究』防衛大学校名誉教授 石川信隆、2015 年 11 月 20 日

3-3. 神戸新聞記事 2 篇と日本地震学会秋季大会 S22 の掲載予稿 4 篇

3-3'. (前記 S22-15 の拡大版) 直下型地震における構造物への衝撃的突き上げ力

3-4. シバタ工業株式会社 ～ゴム製品のご紹介～ (PT.原稿印刷版)

3-5. 公開講演会「地震火山噴火予知に挑む」2015 関西サイエンスフォーラムの次第(A4-2 頁)

・参考資料：

- ・ダイヤモンド座屈したタンク(写真・A4-1 頁)

・議 事：（*野中先生の到着を待って議事に入る。）

(1) 石川先生の話題提供「衝撃的上下動の実験について」；

- ・石川先生から PT.により、下記の項目別に高速変形負荷装置(衝撃試験機)を用いての、小型円柱供試体および橋脚の模型体についての実験的研究の概要を説明戴いた(資料 3-2 参照)。

1. コンクリート供試体の損傷および鋼板巻き立て補強対策
2. 衝撃的上下動を受けたコンクリート供試体の水平動による損傷
3. 鋼管供試体の損傷

- ・上記 3 項に関する資料 3-2 は順に、別府先生、原田耕司博士、森雅美先生の博士論文より載荷装置や試験体の形状と種類および結果などの要点が抜粋してある。説明では載荷装置の衝撃荷重の伝達手段や実験目的、載荷速度の記録、試験結果の概要等を少し詳しく説明戴いた。

- ・なお、上記 2 項の実験は西松建設の研究所の試験機による実験が含まれている。また、3 項の鋼管の円周座屈の話題に際し、タンクの円周座屈事例の写真(参考資料)を配布した。

(*工場見学の開始時間の関係から議題の順序を下記に変更した。)

(2) シバタ工業の衝撃緩衝材に関する紹介；

- ・西本委員から資料 3-4 および PT.により、会社の概要と環境・防災・安全に重点をおいた経営コンセプトおよびゴムの特性と代表的製品の長靴や主力製品の防舷材について紹介戴いた。

(3) 工場見学：

- ・見学は①原料の天然ゴム[板状]、②素材練り合わせ(等級別均質化)、③配合練り合わせ(製品別配合と練り条件約 4 百種は企業秘密)、④板状材料からゴムシート(品質・厚さ別)、⑤製品別パーツ(切り抜き)、⑥製品別金型に立体貼り付け、⑦高温加圧器(架橋接着[化学反応])、⑧製品仕上げ、と工程順に見学して、主力製品の防舷材の工場(大型高温加圧器は 2 社のみ)も見学した。

- ・そして実験室で防舷材の載荷試験(50%圧縮)と品質試験(ダンベル型試験片、600%引張)を見学。

(4) 今回の地震学会の 3 篇について；

- ・地震学会での発表報告として資料 3-3 を基に、前原委員は海震の事例と RC 橋脚の引張(弁天工区)および圧縮(ピルツ橋脚)の破壊事例の紹介を簡単に報告した。

- ・櫻井委員は PT.でトンネルとビルの損壊事例の報告の他、Nawawi 先生からの資料の紹介と余震(直近～40km 離隔)の観測例で直近の波形のみに初期衝撃波が観測できた事を説明された。

- ・そしてサンテレビの番組司会者の、今後上下動対策の研究に取り組む締め括りを報告された。

- ・園田委員は PT.で衝撃的突き上げ力の発生過程を、予稿資料 3-3'より詳しく報告された。

(5) その他の審議事項；

- * 時間の関係で資料 3-5(大地震直前の電離圏電子数の変動)の説明は省略した。 以上

都市直下地震における耐震問題に関する研究 平成 27 年度第 4 回議事録

・日時：2016 年 1 月 18 日(月) 14:00～17:00

・場所：大阪市立大学文化交流センター 小セミナー室

・出席者：櫻井委員，野中委員，園田委員(新代表)，西本委員，前原委員

・欠席者：石丸委員(前代表)，佐藤委員，酒造委員，中岡委員

・配布資料：

4-1. 土木学会関西支部共同グループの審議事項 [A4-4 枚綴]； 1)議題・石丸先生からの引継事項，
2)ワークショップ 実施計画書書式， 3)ワークショップの開催及び成果公表について， 4)石丸先生からのメール

4-2. 西本・園田・小野田：積層繊維補強ゴム緩衝材の設計手法に関する一考察

土木学会 第 8 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集(2006.11)

4-2' .(リフレット) 落橋防止壁用緩衝材 PRF*緩衝材，シバタ工業株式会社 (*Poly Rubber Fiber)

4-3. K.Sonoda, H.Kitoh : Vertical Impulsive Forces to a Structure on Multi-layered Grounds at Near Field Earthquake, Memoirs of the Faculty of Eng. Osaka City Univ., Vol.56, Dec.2015

4-4. PR 活動の報告資料 [A4-4 枚綴]；

1) (表紙)忘れないで神戸から伝えよう地震時の鉛直衝撃波による驚異的な現象と体験も， H27.12 編集(3)

2) 配布先一覧(控)， 3) 第 34 回御蔵学校案内びょう， 4) 跳び笠石と大前氏宅の被災状況(写真)

・回覧資料：

※大阪市大保管資料綴一冊 (阪神高速道路の被災概要， 重度の被災写真綴[橋脚編,支承編])

・議事：

(1) 経過報告と代表者の交代について；[資料 4-1,1),4)参照]

・園田新代表から石丸前代表の手術経過の状況説明があり，代表を交替戴いた事を報告された。

(2) ワークショップの開催準備について；[資料 4-1,2),3)参照]

・6 月 11 日(土)に立命館・草津校でのワークショップを開催する方針。希望時間帯は 14～15 時，年次学術講演会概要集への掲載は希望しない案で実施計画書を作成し 25 日までに提出する。

・当日の発表内容は石丸前代表が纏められた研究成果と活動報告の他，これから纏める成果の一部を発表し，今後の取り組み方を討議する。ワークショップ後 1 ヶ月以内に成果を支部に報告する。

(3) 本年度の活動の纏め方と今後の活動計画について；

*議題のその他の話題提供(1)西本委員,(2)園田代表の内容を先に説明戴くことにした。

・西本委員の話題‘衝撃緩衝装置について’では，積層繊維補強ゴムの荷重-変位曲線の特徴と緩衝材の設計の主眼点(吸収エネルギーの取り方)をポイント(PT)で説明戴いた。[資料 4-2, 2' 参照]

・園田代表の話題‘阪神・淡路大震災での高架橋の損傷・破壊事例と考察’では，上記の回覧資料を紹介戴いた後，PRF のバネ特性に似せた支承バネのマス-バネ系モデルでの，地盤・橋脚の試算例を PT で紹介され，変位制御に要注意だが発生応力に著しい低減効果がある事を説明された。

・資料 4-3 は地震学会への投稿予稿の基の研究内容を，工学部の紀要に掲載された論文です。

・本年度の活動の纏めには前述の石丸前代表が纏められた物に，上記の資料 4-3 を加える。

・ワークショップ迄にある次の件に関して，

1. 地球惑星科学連合大会への投稿は見送り，秋の地震学会への参加を目指す。

2. 土木学会関西支部の年次学術講演会への投稿の件では，共同研究の成果とは別に昨年同様に，前原委員が証言を中心に纏める資料の内容を投稿する(A4-2 頁，重複の課題有)。

(4) 今後の会合予定について；

・年度末の報告資料の取り纏めと提出は園田代表にお願いする。

・次の会合は，6 月 11 日(土)に立命館・草津校でのワークショップの開催前に集まる。

(5) その他；

・話題提供(3)前原委員の‘PR 活動の報告’は資料 4-4 で状況報告と跳び笠石写真の紹介をした。

・資料 4-4 の題名にある用語の衝撃波は衝撃的地震動に改め，それを編集(4)とする。

以上

都市直下地震における耐震問題に関する研究 平成 28 年度 第 1 回議事録

- ・日 時：2016 年 4 月 14 日(木) 14:00～17:00
- ・場 所：大阪市立大学文化交流センター 小セミナー室
- ・出席者：櫻井委員，野中委員，園田委員(代表)，酒造委員
石丸委員，西本委員，中岡委員，前原委員
- ・欠席者：佐藤委員

・配布資料： 〈資料提供者〉

- 1-1. 第 1 回共同研究会 議事次第 〈園田代表〉
- 1-2. 平成 27 年度土木学会関西支部 共同研究グループ報告書
都市直下地震における耐震問題に関する研究 〈石丸委員〉
- 1-3-1. 土木学会関西支部 共同研究グループ ワークショップのご案内(チラシ案) 〈園田代表〉
- 1-3-2. " " " " 開催のご案内(作成中の案) 〈前原委員〉
- 1-4. 建築物に対する震動制御システム ゲルブ社の広報資料 〈西本委員〉
 - 1-5-1. コイルばね防振軌道システム 清水建設の広報資料 〈中岡委員〉
 - 1-5-2. コイルばねを用いたフローティングスラブの設計(土木学会第 56 回年次講演会) 〈中岡委員〉
 - 1-6-1. 配布先一覧(控 2) [この初夏の発表予定論文 3 題の題名付き] 〈前原委員〉
 - 1-6-2. 被災事例と海震および証言に基づく強力な鉛直地震動について
(土木学会関西支部 H28 年次講演原稿) 〈前原委員〉
- ・参考資料：ワークショップのチラシの例(2 件・事前配布) 〈園田代表〉

・議 事：

(1) 経過報告；

- ・園田代表から開会挨拶を戴き、資料 1-1 により本日の会合の経緯と目的を説明戴いた。
- ・本共同研究会の開催番号の表示は平成 28 年度第〇回とする。

(2) 平成 27 年度の活動報告書(案)；〈担当石丸委員〉

- ・石丸委員が資料 1-2 の構成内容の説明をし、1 頁目の本文の締め括り部に昨年度にした事と今年度する事を分かり易く書き加えて、完成させ提出したい旨を説明し、その方針の了承を得た。
 - ・一部修正の指摘 3 点：‘(1 頁下 7 行目右 1/4 部分)と委員→と、委員’，‘(1 頁下 2 行目右 1/4 部分)と土木→と発表した土木’，‘第 4 回議事録の配付資料 4-4 1)以降の行の配置乱れ’。

(3) 6 月 11 日(土)のワークショップの内容検討；(前半)

- ・場所は立命館大学草津校フォレストハウス 1 階 F111 教室(定員 84 名)に決定済み。
- ・時間は 14 時から 16 時で、学会支部事務局の了解を得た(電話連絡)。
- ・園田代表がパワーポイント(PT)でのチラシの例(2 件)と、資料 1-3-1 を説明して、前原委員が資料 1-3-2 を説明した。そしてワークショップのプログラム案に関しては次の議題(4)を先に説明戴くことにした。

(4) 話題提供；

(1) 兵庫県南部地震における余震の震源直上における地盤震動特性について(仮題)

- ・櫻井委員から神戸大学都市安全研究センター近くの構内のトンネル内で、余震活動時に高周波用の振動計で観測された事例をパワーポイント(PT)で紹介戴いた。直下の余震では発生初期に高周波の波形を観測したが、40km 離れた余震では初期の高周波の波形は観測されなかった。

(2) 既往の免震構造・装置について(その 1)

- ・西本委員が PT でゲルブ社の建物の振動制御システムの一例として資料 1-4 の要点を説明した。
- ・櫻井委員から鉛直震動は対象になっていないようなので、特許取得の余地があると指摘された。

(3) 既往の免震構造・装置について(その 2)

- ・西本委員が PT で資料 1-5-1,-2 のほか、清水建設の既往の制振装置の研究例等を紹介した。

※6 月 11 日(土)のワークショップの内容検討；(後半)

- ・チラシの表題は資料 1-3-1 の様に一般の人の関心を引き易い表現のフレーズにする。
- ・ワークショップのワークショップ案は、始めの開会の挨拶と、終わりの平成 28 年度の活動計画の間に、1.石丸委員担当の平成 27 年度の研究成果の概要の中に跳び石現象の話題も入れ、その後には昨年の地震学会で発表した 3 題(2.前原委員、3.櫻井委員、4.園田代表担当)を入れ、そして 5.西本委員担当の

ゴムの緩衝材の話題の5題を入れることにし、時間配分は1題20分以内とする。

- ・チラシには構成員の表(名前と所属)と問合わせ先(前原委員の名前と連絡先)も記入する。
- ・チラシの案は石丸委員で纏めて戴く事にし、各担当者が題名を石丸委員に連絡する。
- ・今月末までにチラシの成案を土木学会関西支部の事務局に提出する。

(※会合後の16日未明に熊本地震の本震が起こり、鉛直地震動による被害も見られるので、チラシや担当の題名の工夫や副題を付けるなど、この地震の話題も可能な範囲で取り入れる。)

(5) 新年度の活動計画と作業方法について；

- ・次の会合は、6月11日(土)に立命館・草津校でのワークショップの開催前に集まることにし、詳細は後日メールで連絡をする。

(6) その他；

- ・議事前に交通費の事務処理作業を行った(酒造委員、石丸委員、西本委員、中岡委員は学校及び会社で交通費を負担戴く)。
- ・佐藤委員には前原委員から今回の案内は送っている。後日議事録と共に本日の資料も送信する。

以上

都市直下地震における耐震問題に関する研究 平成28年度第2回議事録

- ・日時：2016年9月13日(火) 13:00～15:00
- ・場所：大阪市立大学文化交流センター（駅前第2ビル6階）小セミナー室
- ・出席者：（構成員5名）石丸和宏、櫻井春輔、酒造敏広、西本安志、前原博、
[欠席者] 園田恵一郎、野中泰二郎、中岡健一、佐藤裕一、
- ・講師：野口二郎(川金コアテック)
- ・オブザーバー：(4名) 三浦輝之(大産大・院)、森田征樹(川金コアテック)、
三谷尚也(川金コアテック)、炭村透(川金コアテック)、【参加者合計：10名】
- *配布資料：〈資料提供者〉

3-1. ゴムの免震支承に関する講演資料（講習会の内容、平成28年9月13日(火)） 〈野口講師〉

3-2-1. 阪神・淡路大震災における石油タンクの座屈強度に関する調査研究報告書[抜粋]
消防研究所技術資料第31号、平成8年3月。 〈前原委員〉

-2. 20年のうごき、神戸市危険物安全協会 設立20周年記念誌[抜粋],平成10年6月。 〈同〉

3-3-1. 2003年5月26日宮城県沖の地震 被害調査報告書、防災科研、[速報版抜粋] 〈同〉

-2. 高架橋の柱の典型的な地震時衝撃破壊事例,第47回地盤工学研究発表会,2012.7. 〈同〉

*議事：

(1) ゴムの免震支承に関する講演、講師：野口氏、

・資料3-1の内容をPPTにより講演戴いた。主な内容はゴム支承の種類、積層ゴム支承の構造・機能、同支承の設計、橋梁の耐震対策・耐震支持システム、負反力対策等について概要を説明戴いた。

・耐震対策の三種類の用語について、「耐震」は補強を、「免震」は長周期化を、「制震」はエネルギー吸収を基本的な目的として使い分けている。しかし実際の橋梁に対しては二つの機能が複合して、免震・制震装置として使われる事が多い。

・積層ゴムの水平ばね剛度について、高減衰のものと普通のものとの違いは、地震荷重に対する立ち上がり勾配(剛度)と降伏点の値が前者の方が大きく、最終歪み量はほぼ似ている。

・ダンパーは緩衝材(エネルギー吸収)として使われ、免震支承とはゴムの剛度の与え方が異なっている。

(2-①,②) ①ダイヤモンド座沓の資料、②東北新幹線の橋脚被害資料、(説明、前原委員)

・①は資料3-2-1と同-2の一体綴じの資料で、②は資料3-3-1と同-2の一体綴じの資料で、時間が押しているのでそれぞれ二つの資料を抜粋して綴じている事のみを説明した。

(2-③) ③地震学会の話題、(櫻井委員)

・最近の地震学会の話題について、簡単に説明戴いた。

(3) その他、

・来年度の活動案として、調査研究委員会活動の申請をする課題がある。共同研究グループの活動を継続する意味で、委員会活動の申請を検討する。メンバー構成、委員長候補者、研究テーマ等について意見交換をした。早急に主な委員の方達で申請案を整理する。

以上

都市直下地震における耐震問題に関する研究 平成 28 年度第 3 回議事録

- ・日 時：2016 年 12 月 8 日(木) 13:00～17:15
- ・場 所：シバタ工業 本 社 会 議 室
- ・出 席 者：(構成員 8 名) 石丸和宏、西本安志、櫻井春輔、園田恵一郎、野中泰二郎、酒造敏広、中岡健一、前原 博、 [欠席者] 佐藤裕一、
- ・オブザーバー：(2 名) 三浦輝之(大産大・院)、岡村哲也(ヒューマン)、

【参加者合計：10 名】

- *配布資料： 〈資料提供者〉
- 3-1. 平成 28 年度第 3 回都市直下地震における耐震問題に関する研究のご案内 (兼議事次第) 〈石丸委員〉
 - 3-2-1. 前回提出資料の要点補足説明 (1)ダイヤモンド座屈 (含-(2)東北新幹線の橋脚被害) 〈前原委員〉
 - 2. 日本地震学会 南海トラフ沿いの巨大地震の発生予測にかかる共同勉強会- シンポジウムの開催予定について 〈 同 〉
 - 3-3-1. 衝撃試験機の概要 〈三浦輝之氏〉
 - 2. 資料 2 第 3 章 杭の衝撃支持力実験 〈 同 〉
 - 3. 資料 3 1.はじめに (モルタル供試体—衝撃圧縮・衝撃引張・衝撃割裂実験) 〈 同 〉
 - 4. 資料 4 玉野富雄 他：モルタル・花崗岩におけるクラック伝ば速度に関する衝撃実験 〈 同 〉
 - 3-4-1. ANALYSIS OF SEA SHOCK ENCOUNTERED BY A SHIP IN NORTH EAST JAPAN 〈石丸委員〉
 - 2. 吉村 浩 他：福岡西方沖地震による海震について 〈 同 〉
 - 3. 浅田 昭：海震との遭遇・地震音響を求めて 〈 同 〉
 - 番外. 海震の周波数特性について (別途配信資料・ppt 原稿) 〈園田代表〉
 - ・シバタ工業 会社案内パンフレット 〈西本委員〉

- *工場見学：(13:10~14:15、旅費等の清算事務後に見学、会社案内のパンフレット参照、参加者 9 名)
- ・ゴム工場での制作工程の概要 (原料練・材料整形—調合練—シート加工—型貫—張合せ・製品形成—加圧架硫接着—脱型) と試験室での品質管理 (引張試験) を西本委員の案内で見学。
 - ・変位計測(標点シールをレーザーで追跡)で標準試験片(ダイヤモンド型供試体)は 450%伸長。

- *議 事：(14:15~17:15、岡村氏は会議から参加)
- (1) ゴムの基礎の解説と衝撃実験の提案 (説明：西本委員)
 - ・ゴムの基礎的な知識と用途について、社内研修用の ppt を用い説明頂いた。
 - ・繊維補強積層ゴムの荷重-変位曲線について、塑性域からの徐荷時の経路は鉛直状に横軸迄下がり、その後はゴムの特性により原点 (元の形状) に戻っていく。
 - ・会社ごとの製品により履歴曲線は多少変化するかもしれない。衝撃実験の具体案については石丸委員と西本委員で検討頂くことにした。
 - (2) ①ダイヤモンド座屈の資料・②東北新幹線の橋脚被害資料の説明、地震学会秋季大会の参加報告、海震の年表の作成報告 (説明：前原委員)
 - ・資料 3-2-1 を投影して説明。①ダイヤモンド座屈に関しては座屈応力度に達するための必要水平震度が算定(主に 0.5~0.6)してある。着目タンクがある深江浜は必要震度 0.57 に達しないと推定する。
 - ・②東北新幹線の橋脚被害に関して、宮城県沖地震(M7.0、2003.5)での被害位置図が注目され、震源断層からはるか遠方の場所で生じたこと、また被害が生じた多数の柱は立体 T 型橋の端部で起きている。同じ現象は東日本太平洋沖地震(中曽根高架橋)でも中越地震(和南津高架橋)でも見られる。
 - ・地震学会秋季大会の参加報告では、地震短期予知に関する投稿予稿が関心を誘い、秋季大会中日の昼に 9/30 地震予知シンポジウムの報告会があり、翌日の発表でも短期予知の話題は 1 題しかなく関心を引いた。そして来年に災害情報学会との共同勉強会が企画された事を資料 3-2-2 で報告した。
 - ・海震の年表の作成報告は時間が押してきているので省略。
 - (3) Geophone で観測された海震の周波数特性について (説明：園田代表)
 - ・ppt により下記の説明を頂いた。資料は別途事前に配信してあり、それを参照ください。
 - ・F.S.Birch 氏の論文：AN EARTHQUAKE RECORDED AT SEA にある Geophone をインターネットで調べる

と、反射法地震探査で地下の地質調査に使うヴイの形の計測器だった。それを1m間隔で20m程つないだ組をいくつか、水深-5mで曳航し観測に使うものがR/V CHAINと呼ばれる。

- 1964年10月23日に大西洋で中央海嶺を地震探査法で調査中、地震(M6.4、深さ25km)にあって、船は激しく揺さぶられ停止した。そのため計器の深さが変わり、地震の正確な応答値の算定はできなかった。しかし記録された波を再生でき、波形図や相対音圧比の周波数分析結果が得られ、波の伝播の計算と考察がしてある。相対音圧比の最大値は80Hz付近で生じ値が約2.7になっている。
 - その論文の地層モデル図を単純化して水深4.8kmと半無限地層の2層モデルを作り、1次元の波動方程式を適用して、入射圧力に対する相対圧力比等を算定した。海底での圧力比の最大値は2.0で、深さ別の圧力比の分布を調べると、1/3深さでの第2共振点でも2.0になる。
 - 第1共振点に着目し水深を-5mにすると、共振周波数は12.5Hzが得られた。水深-5mでの圧力比の周波数変化を調べると、75Hz付近で最大値0.55程度になる分布の変動図が得られた。
 - その2層モデルを明石海峡付近に応用して計算した結果は、水深-5mでの圧力比の変化は、6,19,31,44,56Hzに漸増ピーク値を持つ変動分布図(最大値約1.7、56Hz)が得られた。19Hzにピークが表れることに注目している。
- * 海震に関連して、資料3-4-1~3-4-3を石丸委員から簡単に紹介頂いた。
- 資料3-4-3の駿河湾での観測波形-図2(伊豆大島近海地震M7.5、1978.1.14)の周波数分析図に13Hzと17Hz付近にピークがある点が、上記の結果と似ており、大いに興味を持たれる。
 - 資料3-4-1の観測記録の分析が注目されたが、5Hz以上はカットしてあり、落胆させられた。
- [追記; 資料3-4-1のFig.7のz方向加速度とFig.12の針路方向ヨーイングの図は同じ波形図とみられる。現象の特徴から推定すれば後者の図に疑問を持たれる。Fig.8とFig.10の図の類似性も疑問。なお、著者の笹先生(神戸大学海事科学研究科)との接触は石丸先生にお願いする。]
- (4) 大阪産業大学の衝撃試験機の概要説明(説明:三浦氏)
- 資料3-3-1~3-3-4により大阪産業大学にある衝撃試験機の種類と使用例を説明頂いた。
 - 試験機の機構は重錘落下型で最大荷重が、W40Kg×H2.0mとW100Kg×H2.8mの2種類(玉野先生作成)があり、超高速ビデオカメラ(撮影100万コマ/秒)を備え、現象の可視化を図っている。
- (5) その他(次回の日程調整)
- 来年度に行うワークショップでは2年分の活動成果を纏めて報告することになる。どのように纏めるかを次回に相談したい。次回の候補日として2.14~2.24の間で、交流センターの会議室(大阪駅前第2ビル)の都合を確認し調整する。

以上

都市直下地震における耐震問題に関する研究 平成 28 年度第 4 回議事録

- ・日 時：2017 年 2 月 22 日(水) 13:00～17:00
 - ・場 所：大阪市立大学文化交流センター 小セミナー室（大阪駅前第 2 ビル 6 階）、
 - ・出席者：（構成員 8 名）石丸和宏、園田恵一郎、櫻井春輔、野中泰二郎、酒造敏広、
西本安志、中岡健一、前原 博、【欠席者】佐藤裕一、
 - ・オブザーバー：（2 名）三浦輝之（大産大・院）、岡村哲也（ビークレーム）、
- 【参加者合計：10 名】

- *配布資料： （資料提供者）
- 4-1. 平成 28 年度第 4 回都市直下地震における耐震問題に関する研究のご案内（兼議事次第）〈石丸委員〉
 - 4-2. 共同研究グループ「都市直下地震における耐震問題に関する研究」の成果報告(案)〈 同 〉
 - 4-3. 土木学会関西支部共同研究グループ ワークショップのご案内 〈 同 〉
 - 4-4. 直下地震での高架橋単柱式 RC 橋脚への突き上げ力と免震・緩衝支承の検討 〈園田代表〉
 - 4-5. 1)緩衝ゴム支承の鉛直変形（ひずみ）速度について 〈石丸委員〉
 - 4-6-1. H29.2.22 平成 28 年度第 4 回 都市直下地震・共同研究 G 4-3)資料(講演報告)〈前原委員〉
 - 2. 海震の年表と現在の問題点 [H29.1.16 修正] 〈 同 〉
 - 4-7. 横転自動車の事例 鈴木康弘教授(名古屋大学)の資料より 〈 同 〉

I. 議 事：

*先に資料の配布確認(番号付)を行い、旅費の清算事務は議事の後にした。

(1) 関西支部概要掲載の原稿について（説明：石丸委員）

・資料 4-2 で、頁構成上の余白の幅と表 1(メンバー表)の大きさを調整し、表現も各担当者に提出前に再確認戴く。提出は 27 日にしたい。

(2) ワークショップについて（説明：石丸委員）

・ワークショップは 5 月 27 日(土)に関西支部年次学術講演会会場(大工大,大宮キャンパス)で行います。
・チラシの表題は共同研究グループ活動の継続性から昨年と同じものにする。
・各報告の題名について、報告(2)は地震学会・平成 28 年度秋季大会の発表報告とし、副題を地震予知の効果的な普及に向けてとする。報告(3)の題名は資料 4-4 と同じ題名にして、次に書かれている衝撃緩衝材の提案の報告後に順序を入れ替える。(報告(4),(5)は→(3),(4)に番号修正)

* 資料 4-4 の多層地盤上の単柱式 RC 橋脚の突き上げ力の検討（説明：園田代表）

・基盤から単位速度波を入射させた時に、周期が 0.04, 0.05 秒あたりに地盤反力の応答値にピークが生じ、自重 500tf に対し(動的)反力は 8 倍以上になり、自重が増すとそれに伴い大きくなる。

・柱ではこの周期が柱の固有周期に近く、平均底面圧力(0.57MPa)が柱とフーチングの底面積比(25 倍)を超える 25MPa(圧縮、引張 21MPa)になる(共振現象と推測)。 「(隣接緩衝効果?)

・支承部に弾塑性の鉛直免震支承モデルを考え検討すると、変形制御に工夫がいるが柱の応力は大幅に低減する結果が得られた。支承材料の性能と鉛直波の実態等に関する正確な情報が望まれる。

・この資料には補足として、A; RC 杭本体のみが地中にある場合、B; ピルツ橋脚、門型鋼製脚(神 P55)、2 径間落橋部(S40, S41)に関する検討や考察が述べてある。

・周期が 0.04, 0.05 秒(周波数 20~25Hz)に関する話は後の話題 II-2 にも関連して注目される。

(3) 調査研究委員会について（説明：園田新委員長、補足：前原新幹事）

・申請していた「都市直下地震での鉛直方向の免震構造に関する調査研究委員会」の活動が、2 月 8 日付で正式に承認されました。期間は 2 年間で、運営費は年間 50 万円の支給です。

・事務手続きに関する資料は前原新幹事の元に届いています。各委員への委嘱状は関西支部長から 4 月 1 日以降に出されます。委員の委嘱依頼が事前に必要な事もあるので、園田委員長名での依頼状の件と、新委員会の名簿は 3 月半ば迄に提出なので、記載内容を再確認頂く件は追って準備します。

II. 話 題

(1) 鉛直免震支承開発のための繊維補強ゴムの衝突実験（説明：石丸委員、西本委員）

・資料 4-5 から弾塑性支承のモデル計算での圧縮変形速度の最大値は 1.8m/s とした(0.18m/s が正)。

・実験は積層ゴムを対象にした静的と動的の実験とし、動的には鋼球の落錘方式で落下速度 3m/s を目途にして、計測はひずみゲージと変位計とする案が提案された（落錘の最大重量 200kgf）。

・実験は材料の性能を確かめる事を主目的とする。しかし、実際のモデルを想定することが必要なの

で、実物の免震ゴム支承の反力・サイズを参考に、試験体の大きさ等を検討する。

(2) 兵庫県南部地震の余震の地震波形記録—衝撃的上下動の存在— (pptにて説明：櫻井委員)

・神戸大学都市安全研究センターの地下10mのトンネル内と地上1階とで、兵庫県南部地震の余震を2月3日から2年間、感震器(サーボ型加速度計：DC-100Hz)で測られた結果を、前回(4月14日)の報告後見直すと、直近の震源の波形記録に他より大きい衝撃的上下動が記録されていた。

・加速度応答スペクトルから最低で20Hzの記録(サンプリング周波数の関係)があり、それを越す周波数の存在が予測される。因みに、余震時に発破のような音が聞こえていた(可聴音は20Hz以上)。

・震源が10km以内の場合は、水平動より大きい衝撃的な上下動の記録が得られている。

・デジタルデータは共同研究者の斎藤悦郎氏(元フジタ技研)のもとに保管されているかも知れない。

(3) NPO小グループでの講演報告と彦根城内の地震の間 (説明：前原委員)

・資料4-6-1で、NPO法人関西木造文化研究会(略称；KARTH)で行った講演「見落とされてきた破壊的鉛直地震動の現象について」の要点(代表的破壊事例、海震の年表、地震予知)と、別の講演者渡辺一正氏(NPO市民文化財ネットワーク鳥取、理事長)の地震の間の図面を基にして編集した資料(彦根城楽々園・御茶座敷)を紹介した。

・この講演には川瀬博教授(京大防災研、建築学)・松島信一教授(同)も来られていた。

・資料4-6-2は小林英一先生の意見により、現在の問題点の表現を的確で優しい表現に直した。

・資料4-7で、地震時の横転自動車の事例を紹介すると、乗用車では車体バネの影響で、ツボにはまると異常な事も起こりうるとの指摘があった。

(4) 海震の文献について (説明：石丸委員)

・東日本太平洋沖地震での海震の文献に関し、著者の笹先生(神戸大学海事科学研究科)と連絡が取れ、面談の承諾を得られた。石丸委員と園田代表の二人で面会して頂くことになった。

(5) その他(新規の委員会関連、都市安全研究センター関連、次回の日程調整等)

・新規の調査研究委員会の委員就任の件で、佐藤先生には同じ講座の金子教授への現況説明の件も合わせて問い合わせ中ですが、返事をまだ貰っていません。

・都市安全研究センターの関係者への現況説明の件は、議事録を作成した後に対応を考えます。

なお、向井洋一准教授(建築学)には3月1日午後面会の予定です。

・次回(WS打合せ、新委員会)の候補日として、4月下旬を念頭に、場所の都合も確認し調整する。

以上