

海震と証言による 橋脚の地震時破壊原因の見直し

前原 博¹・櫻井 春輔²

¹地球システム総合研究所 上席研究員 (〒604-8106 京都市中京区御池通堺町南角エクレーヌ御池707号,分室)

²神戸大学名誉教授 広島工業大学名誉教授 (〒651-1333 神戸市北区東大池3丁目17-10)

海震で船舶が損壊するのは粗密波であるという、海震の常識が忘れられている現状に気が付かれた事が一つの契機になり、海震の事例と証言を調べ、関連事象や橋脚の特殊な破壊形態等を見直すと、地震時衝撃破壊に関する重要な知見が得られたので昨年一部を発表した。それらに続き新たに得られた海震関連の重要な事例を紹介する。兵庫県南部地震での被災事例の代表であるピルツ橋脚の倒壊原因について、新たな知見を踏まえて住民の証言と共に破壊状態を見直すと、海震の考察と呼応し、衝撃破壊状況の一端を明確にできた。さらに過酷な被災事例等もあるので、安全対策上地震時の衝撃破壊現象に関する研究を急ぐ必要があることを述べる。

キーワード 地震波、海震、証言、衝撃波、粗密波、衝撃破壊

1. はじめに

兵庫県南部地震では構造物の特殊な破壊形態が多く見られたが、それらに対応する地震波の波形が、当時の地震計では記録されないことから、この現象に対する研究が下火になっている。しかし海震の事例や証言を基に、破壊状況を見直すと、地震時の衝撃破壊に関する状況の一端が明らかになり、得られた知見を基に衝撃破壊の代表として、橋脚の軸圧縮破壊と爆裂的な引張破壊の例を昨年発表した^{1,2,3)}。その中の文献²⁾を前論文と呼ぶ。

本論文では前論文の海震に関する重要な事項と、新たに得られた海震関連の資料^{4,5,6)}を活用し、破壊的な地震波の発生時期に関する考察を述べる。そしてピルツ橋脚の破壊状況を見直すと、倒壊の発生は主揺動の約3分後と証言から推定でき、橋脚の倒壊は地震の主揺動による大きな横揺れだけではないことを明らかにする^{7,8)}。

兵庫県南部地震では衝撃的な地震波による、過酷な破壊事例は、本論文で述べたもの以外に他にも多くあるので^{1,8)}、重要な施設の安全対策には、地震時の衝撃破壊現象に関する研究を急ぐ必要があることを述べる。

2. 海震関係の資料と証言に基づく考察

(1) 海震の観測波形の例

図-1から図-4に伊豆半島東方沖地震(M6.7, 1980.6.29)の余震の海震をハイドロホンで観測した例を示す^{9,10,11)}。

図-1は位置図で、図-2は海震の頻度(a)図と海底断層の位置(b)図を示す。陸上からの震源断層位置の推定精

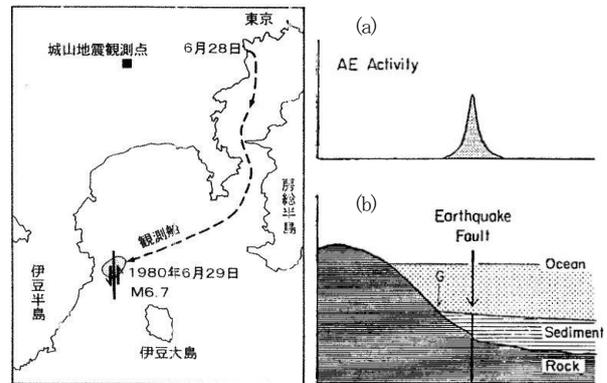


図-1 海震の観測位置図⁹⁾

図-2 断層位置と海震の頻度¹⁰⁾

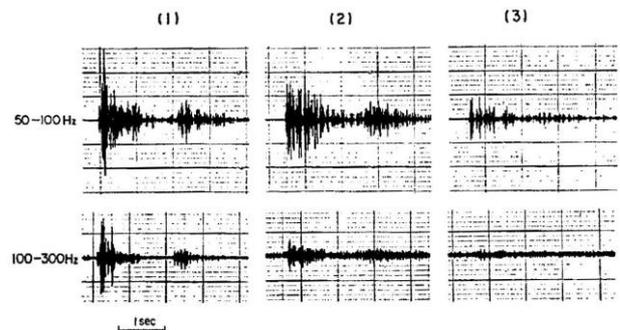


図-3 海震の観測波形・周波数帯別同時観測の例¹⁰⁾

(1)浅発型, (2)中間深さ型, (3)深発型の3分類

度が当時は悪く、地形上の境界(G)でない断層位置が海震の観測から決められた。約千例観測してあり、波形の代表例を図-3と図-4に示す。図-3は周波数帯別同時観測

の例で、図-4は詳しい波形の例である。記録波形のパターンを3分類してあり、各々浅発型(1),A type)、中間深さ型(2),B Type)、深発型(3),C type)である。図-3では100Hz以上の高周波の波形も示してある。これらの図の波は卓越周期が明瞭な波であるが、周波数分析は行われておらず¹²⁾、図-4のB、Cの波形から周波数を60から70Hzと判読した(図-3の高周波の波は120~140Hzと推定)²⁾。Cの波は4秒程続いている。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。

観測時に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る⁹⁾が、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⁹⁾。

高周波の地震波の観測記録はこの時の記録^{10,11)}しか現在なく、海震は粗密波であり、後述する破壊的な粗密波の発生原因と特性を考える際の貴重な参考資料なので、図-4に記録波形の特徴をわかり易く示した。

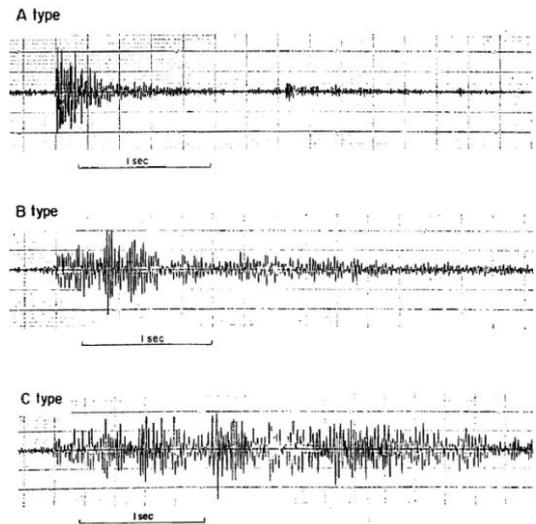


図-4 海震の観測波形・3分類の波形の詳しい事例¹⁰⁾
(A 浅発型, B 中間深さ型, C 深発型の3分類, 横棒長さ=1秒)

(2) 海震の伝承と体験証言

海震の伝承と体験^{13,14)}の古くからある例の代表として、昭和8年の三陸地震での体験を纏めたものが表-1で、損壊を伴う事例を纏めたものが表-2と図-5¹⁵⁾である。共に事例として重要なので、文献²⁾のものを再掲した。表-2には兵庫県南部地震の事例⁹⁾を追加している。

これらの事例は海面上の粗密波が、機材を壊す強烈な破壊力を有していることを示しており、前節の例と同じく余震でも生じている。なお、文献16,17)には図-2(a)の頻度グラフを、海底と海面の鉛直加速度比の分布で類似させた報告がある。

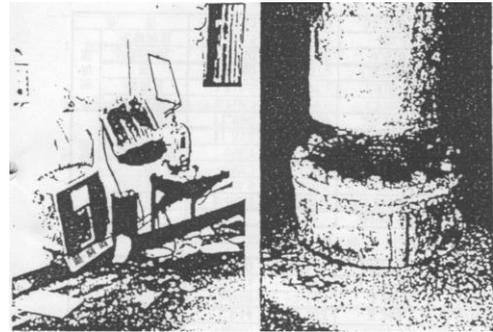
このように古くから伝承や体験例は多くあり、海震の存在は常識化していた。ところが海底火山活動以外に、国内では重大な事故が起こらなかったため、注目されなくなり近年には本論文の冒頭で述べた通りなぜか忘れられている。

(3) 海震の重要な証言と考察

兵庫県南部地震での海震の証言から重要な事実が得られ、新たな資料^{4,5,6)}を入手できた。それらの要点と考察を以下に述べる。

図-6は地震発生時の旅客船の位置図⁴⁾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⁵⁾した(表-2に追記)。この事は震源域近くではより強い粗密波が生じることを示唆する。

図-7は明石海峡を航行中の図-6の「あさぎり丸」(千トン級)と「クイーンダイヤモンド号」(九千トン級)の詳しい位置図を示す²⁾。両船長の証言¹⁸⁾は重要なので要点を転記する。
・「あさぎり丸」の船長の証言:『衝撃的な上下動に見舞われ、一瞬操船困難に陥った。



(a) 備品の落下 (b) 配管の切断
図-5 海震による損壊例¹⁵⁾ (3.25万トン・タンカー、ジブラルタル沖地震, M8.0, 1969.2)

表-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15)に文献13)を参照し加筆)

	船名	トン数	状況
1	もんてびあ丸	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 海震による損壊例
(馬場栄一氏の資料15)と文献13,14,5)から作成)

	日付	船名	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 ユミグの両側に亀裂 (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



図-10 倒壊区間の東部(神P130→神P126)の状況²⁰⁾
(西側から東方を望む, 図-11 も同様)



図-11 ピルツ橋倒壊区間の斜め航空写真²¹⁾
(白色の高欄線が極端に下がっている部分に着目)



図-12 倒壊橋脚の代表例 神P132(西面)²⁰⁾



図-13 代表例 神P132(南面)²⁰⁾
(東西共ほぼ対称的な破壊形態, 基部の外側へのふくらみ少なし)



図-14 神P133(東面)²²⁾

(a. 基部の鉄筋が南側にも湾曲, b. コンクリートの破壊線が柱の軸線に直角, c. 基部の鉄筋は東西共外側に大きく湾曲)

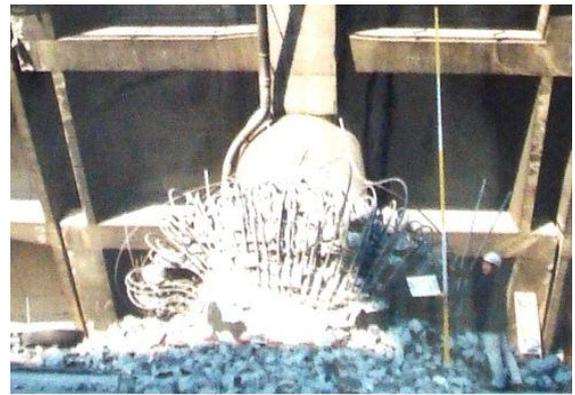


図-15 神P133(南面)²⁰⁾

(c) 図は柱頭部のコンクリートがなくなった所迄横梁が約1.5m落ちて, その部分の側面の柱鉄筋約1.2mが裸で直立している. この状態はコンクリートが壊れた区間には, 水平力(せん断力)は作用していない事を表し, 地震の水平主揺動で壊れたものではない事を意味する.

(b) 図のコンクリートが跳び出すのは瞬間的に生じた筈で, この破壊形態を爆裂破壊と呼ぶ事にした²⁾. これは衝撃波による引張破壊の代表例である. この破壊が主揺動の前の衝撃で起きると, 鉄筋は直立状態を保てないので主揺動の後で生じていると判断でき, 前章で述べた海震の考察と整合する.

(2) ピルツ橋脚の倒壊原因の見直し

図-10は倒壊区間の東側の状況²⁰⁾を示し, 図-11は倒壊全区間約650m(神P126～神P142)を, 西側の低空から見た写真²¹⁾で, 高欄線(白線)の下がり状況を際立たしている.

図-12, -13は倒壊した柱の代表例²⁰⁾で, このように全てが倒壊すれば, 高欄側面が大きく下がることはない. 図-11の区間中央部と西側2箇所が高欄線は下がり, その場所の橋脚は神P133, 神P134, 神P136, 神P140である. この4基に着目して柱基部の破壊状態を特徴づける写真を, 2枚ずつ示したものが図-14～図-21である^{20, 22)}.

図-14, -15は神P133基部の破壊状態を示す. 柱基部の



図-16 神P134(南西面)²⁰⁾
(柱の南西面に大きな斜め割裂塊)



図-17 神P134(南面)²⁰⁾
(柱基部は北西側に着地、北東から南西方向に割れが発達)

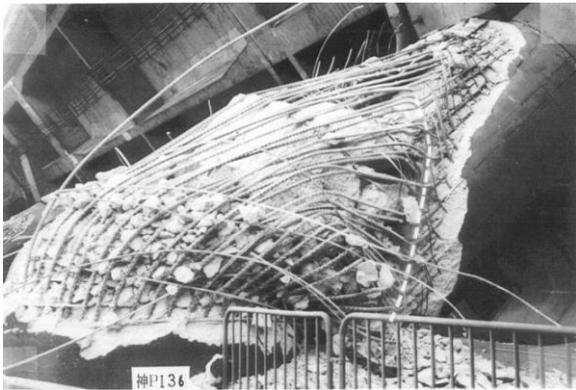


図-18 神P136(南東面)²²⁾
(引張域迄鉄筋の直角クビレが分布(白色破線)・ズレ破壊の痕跡)



図-19 神P136(西面)²⁰⁾
(北東から南西方向に割れが発達・北西部に落下の痕跡)



図-20 神P140(東面)²⁰⁾
(コンクリートの破壊面に沿い鉄筋のクビレが分布)



図-21 神P140(南面)²⁰⁾
(北東から南西方向に割れが発達・北西部に落下の痕跡)

鉄筋は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-16、-17は神P134基部の破壊状態で、破壊部が北西側に拡大している(図-17)。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-16)。

図-18、-19と図-20、-21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-18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れが発達している(図-19、-21)。

すなわち、神P134、神P136、神P140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。神P133も含め、このような破壊形態は水平動だけでは生じない。

付近の住民の証言を調べると、『(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」と思った最初の揺れが治まった。時計は5時48分。階下の孫二人が気にな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)』との証言がある¹⁸⁾。

大音響がしたのは5時48分より後である。既存の時刻暦応答解析の結果²³⁾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。鉛直衝撃波の影響が加わった事を証言は示唆しており、5時46分の主揺動後の3分程の時間差は、2章で述べた海震の考察と呼応している。

このピルツ橋の倒壊は阪神大震災の被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表しており、その衝撃波による破壊は主揺動より時間差をおいて生じている。

4. まとめにかえて

本論文の2章で述べた海震の現象とその被害状況から、これまでに地震計に記録された地震波以外に、構造物を破壊する威力を持った高周波の粗密波が存在する。この過去には常識であった現象が近年忘れられている。

3章では兵庫県南部地震でのピルツ橋脚の破壊事例から、その衝撃的な破壊現象は地震の主揺動より約3分後に生じており、海震の現象と呼応している事を述べた。これにより陸上での破壊的な波の性質を、粗密波と想定すると現象と整合しやすいし、また理解もしやすいが、まだ波の性質を特定する課題は残されている。

陸上での構造物の衝撃破壊的な被害状況はいろんな状態があり、壊滅的な事例だけでなく破壊の中間状態の事例や破壊状況の証言も収集し、被害の状況と分布を丁寧に見直すことが必要です。

しかし破壊的な地震時衝撃波の発生原因は、工学的な分野だけでは解明できない。震源断層近傍の上下震動に関する最近の文献²⁴⁾には、逆断層モデルの波も検討してあり注目される。けれども地震時の衝撃破壊現象はその文献より高周波領域の現象と考えられ、強烈な破壊力の衝撃的地震波の正確な記録はまだ得られていない。

ところで昨年に、この破壊的な地震時衝撃波の問題の一端を、発表できたことが契機になり、地震時衝撃波の捕捉を意図しての観測態勢をし、努力がなされているものと推察する。ところが破壊的な地震波の発生状況は、非常に局地的に変化しており、地震計を設置しただけで、問題の衝撃波の全容を捉えることは容易ではないと思われる。そして地震時の衝撃破壊の現象は、現在の耐震対策や災害予想には考慮されてなく、原発事故が起きた現状からは、十分な観測データが揃うまで、地震時の安全対策を保留できるような状況ではありません。

兵庫県南部地震では本論文で述べたもの以外に、過酷な破壊状態の物と資料が多くある¹⁸⁾。したがってそれらの状態をできるだけ正確に見直して、地震時の安全対策のための知見を得る研究を急いで行う必要がある。

また一方では、地震時の衝撃破壊は簡単には防げない領域も残ると考えられ、防災上の減災を意図する地震予知の実用化に関する研究も推進する必要がある。

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, 1-48, 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) 神戸海運監理部運輸部運輸管理官: 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.
- 5) 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.
- 6) 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).
- 7) 前原博, 櫻井春輔: 兵庫県南部地震でのピ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, 1-30, 平成 25 年 6 月.
- 8) 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, 平成 25 年 7 月.
- 9) 茂木清夫: 地震予知を考える, 岩波新書, pp84, 1998. 12.
- 10) 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, Fig. 7(1), 15, 1981. 3.
- 11) Kiyoo Mogi: *Experimental Rock Mechanics*, CRC Press, pp267, 2006.11.
- 12) 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), 5.07.2012.
- 13) 佐藤孫七: 海震の話, 気象, pp6-9, 1968. 2.
- 14) 佐藤孫七: 海震・体験あれこれ, 気象, pp26-28, 1978. 1.
- 15) 馬場栄一・広島大学名誉教授(船舶工学)より提供の資料.
- 16) Eiichi Baba: *A Study on the Effect of Seaquakes on a Floating Body*, 日本造船学会論文集, 162 号, pp90-98, 1987.
- 17) 馬場栄一: 海震に対する浮体の加速度応答について, 第 8 回海洋工学シンポジウム, pp305-311, 1988. 1.
- 18) 園田恵一郎, 小林治俊, 長野圭: 兵庫県南部地震一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.
- 19) 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.
- 20) 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.
- 21) 朝日新聞社: 報道写真全記録大震災一年, pp4, 1996 年 1 月.
- 22) 前原博收藏の写真資料.
- 23) 阪神高速道路公団: 大震災を乗り越えてー震災復旧工事誌一, pp191, 平成 9 年 9 月.
- 24) 中村真貴, 原田隆典, 金井則之, 野中哲也, 児玉善秀, 本橋英樹: 震源断層近傍の地震動上下成分・位相波特性の解析とそれに基づく上下成分波形の作成方法, 土木学会論文集 A I (構造・地震工学), Vol. 68, No. 4(地震工学論文集第 31-b 巻), 1_1-1_12, 2012.