

構造物の地震時衝撃破壊の代表例について

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ア御池707号.分室)

²建設工学研究所 研究顧問 (〒657-0011神戸市灘区鶴甲1丁目3番10号)

地震現象の一つの海震について船舶工学の大家に伺う機会があり、船が壊される時の衝撃的な波は粗密波(縦波)であるという事は常識だといわれた。いわれてみれば当然の事ながら、陸の地震工学や耐震工学では横波(せん断波)しか破壊的な波の対象にしておらず、縦波(粗密波)に関する海の常識が欠けている事に気付かされた。これは重大な事なので、まず海震に関する資料から得られる重要な知見をまとめる。その後に構造物の衝撃破壊の代表例について、兵庫県南部地震での今迄に公表されてない事例等に関連事象や考察を交えて紹介し、地震時の破壊的な粗密波に関する研究が必要な事を述べる。

キーワード 地震波, 海震, 粗密波, 高周波, 衝撃破壊, 爆裂破壊

1. はじめに

兵庫県南部地震直後には、鉛直地震動による構造物の破壊現象が大きな話題の一つであったが、その後この話題は対応する記録波形が得られていないことから低調になっている。しかしながら近年、衝撃破壊やコンクリートの破壊工学の各専門家から発刊された書物^{1,2)}には、それぞれ独自の破壊形態についての見解が示されている。それらは地震時の記録波形から想定されてきた大きな水平動による破壊とは異なる見解であり、図-1にそれらの一部を示す。

筆者達も構造物の特殊な破壊形態に関する資料を集めており、その関連事象の海震に関する資料を集めている時に、冒頭の要旨で述べた衝撃的な粗密波(以下衝撃波という)が船を壊すという船舶工学者の海震での常識が、陸の地震工学や耐震工学関係者の常識に欠けている事に気付かされた。また他の地震関係の方々にも海震に関する事柄が意外に知られていないことが最近わかった。

そこでまず海震の代表事例と兵庫県南部地震時の海震証言から得られた重要な知見について述べる。その後に構造物の代表的な衝撃破壊例について紹介し、破壊的な衝撃波の発生原因についても言及する。

この地震時の衝撃波による破壊現象の問題は、緊急を要する重大な研究課題に現在なっている。

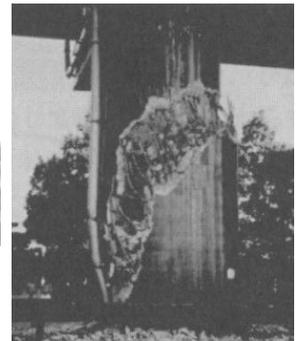
2. 海震とその観測記録や証言からの知見

(1) 海震の伝承事例

古くから海震についての体験や伝承がありそれらを「海震の話」、「海震・体験あれこれ」として文



(a) 衝撃的な上下動によって生じた輪切り状のひび割れ破壊¹⁾



(b) 道路橋脚の軸圧縮せん断破壊²⁾

図-1 専門書の橋脚破壊形態の説明例^{1,2)}

表-1 昭和8年三陸地震の海震体験例(1933.3.3)^{3,5)}

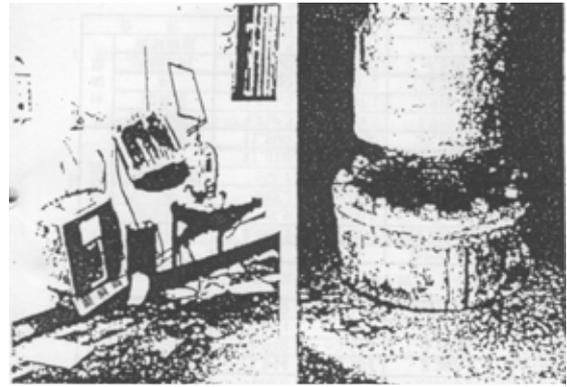
	船名	トン数	状況
1	もんでびあ丸	9,700	エンジンの racing のような強い振動 4 分間.
2	小倉丸	7,270	激動 3 分間.
3	摩耶丸	3,145	激動 3 分間. 全速でエンジンを後退したよう.
4	平安丸	11,500	上下の激動 5 分間、羅針盤が跳び出すかと思うほど.
5	得撫丸	220	強烈な振動 1 分間.
6	誠進丸	50	上下の激動 5 分間、船が折れると思うほど.
7	東星丸	5,484	激動 2 秒、その後 2 回の微動 (余震)
8	光洋丸	8,000	強い上下動、3 分間. (余震)

献^{3,4)}に紹介してある。海震に関しては海底火山の活動を想定する方が多いと思われる。その例では明神礁の調査中に大爆発(詳細不詳)に合い、乗員31名が船と運命を共にした測量船第五海洋丸の大惨事(1952.9.24(昭和27年))が述べてある³⁾。

一方海底火山活動とは関係しない海震では、東日

表-2 海震での船舶の損壊事例^{3,5)}

	日付	船 船	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	ノルウエイの ロフォテン諸島沖	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(図-2参照)



(a) 備品の落下 (b) 配管の切断
図-2 海震の損壊例 (3.25万トン・タンカー、ジブラルタル沖地震、M8.0, 1969.2)⁵⁾

本大震災の前の大津波を起こした昭和(8年)三陸地震時の事例の他多くがある^{3,4)}。表-1は別途提供戴いた資料⁵⁾と文献³⁾の記事から、昭和三陸地震時の船の位置を省き状況を簡素化して纏めた物である。上下の激動を5分間も受けたり余震でも受けている。

「海震の話し」には間隔を置いて長い間上下の大震動を受けた例等³⁾も述べてあるが、船が損傷した状況を報告した物は少ない。同文献と提供資料⁵⁾から海震での船舶の損壊事例を纏めた物が表-2であり、同表のタンカーの備品や配管の損壊写真が図-2である。この例では船殻補強材が座屈し、航海機器が全損する損壊が生じている。表-1の平安丸はこれに近い状況だったと想像される。これらの損壊は海中を伝わる粗密波が船に当たり生じている。

(2) 海震の観測例

伊豆半島東方沖地震(M6.7, 1980.6.29(昭和55年))の余震群の海震ををハイドロホンで観測⁶⁾してある。約千例観測したとありその中の一例が図-3で、周波帯50~100Hzと100~300Hzを対比した記録である。

地震の前兆の地殻破壊をAEとして捉える事が目的だったが、幸運にも震源近傍で本震に遭遇した。震源断層の推定精度が当時は悪く、震源断層付近で記録された余震の波形に頻度の変化(図-4(a))と波形の型に浅発型、深発型、中間型の3種類があり、断層位置を測地学的な境(図-4(b)のG)でもなく、精度良く定めたのがこの文献⁶⁾の趣旨である。

一方、観測されたデータは貴重で、大きな余震が続いたため船を突き上げる様な海震をたびたび感じたとの説明が文献⁷⁾にもあり、図-3の様な粗密波が余震毎に発生していた事がわかる。この観測波の周波数分析はされてなく⁸⁾、別の波形図から60~70Hzが判読され、主振動部ではその整数倍の120~140Hzや180~210Hzに近い周波数が推定された。このような周波数帯の波は普通の地震計では記録されない。

図-4(a)に示す頻度分布を文献^{9,10)}では海底と海面の水の粒子の上下方向加速度比で表してあり、それによると断層中心から2km離れると強度は約1/3になる。船が壊れるのは直近でないとい生じにくい事がわかる。

また文献¹¹⁾では、盤滝トンネルや魚沼トンネルの側壁等の被災例から、径と波長による側壁部の応力への影響を調べ、岩盤のP波速度を2km/s、径を10

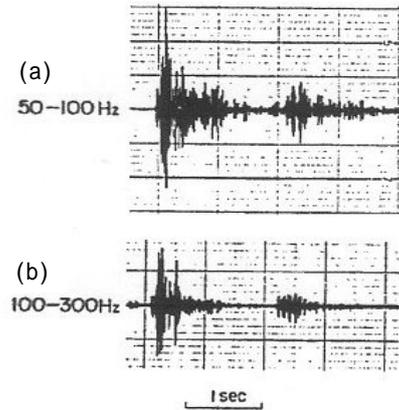


図-3 ハイドロホンでの海震の周波帯別観測波形⁶⁾

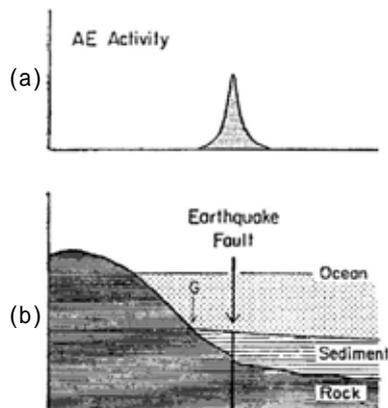


図-4 AEの頻度と断層の位置⁶⁾

mとして周波数を100hzと推定している。概略の値としては上記の観測値にほぼ合っている。

(3) 明石海峡での海震の証言と新たな知見

兵庫県南部地震(M7.2, 1995.1.17)での証言集¹²⁾の明石海峡の節に二隻のフェリーの船長の重要な証言がある。二隻は[あさぎり丸]と[クイーンダイヤモンド号]で、証言での陸地との位置や震央を図-5に示す。各証言の要点を以下に抜粋して述べる。

・フェリー[あさぎり丸]は明石港と岩屋港を連絡している。「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二度目の衝撃がきた。船底にダメージを受け、潜水艦とぶつかったかと思った」との証言がある。
 ・フェリー[クイーンダイヤモンド号](9,023トン)は大型のフェリーである。「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」との証言がある。

これらの証言で重要な事は、大きな衝撃波を二度受けており、後の方が遙かに大きな衝撃を受けていることである。その二度目が発生した時刻は、[あさぎり丸]のエンジン停止と点検の時間経過を考えると、本震の継続時間は20秒程で主震動は始めの10数秒間であり、本震の後に受けたと考えられる。

一方、当時は火災の煙がまっすぐ上がる無風に近い気象状態なので海面に大きな波はなく、大型船の[クイーンダイヤモンド号]が大きな波に翻弄されて、ウォーターハンマーより激しい二度目の衝撃を受けたのは本震の後と予測される。

なお、陸上部で本震より後に二度目の大きな衝撃的な上下動を受けた証言が証言集¹²⁾に18例ある。

従来地震時の衝撃波というと地震初期のP波の到達と同じ頃に起こる物と理解されてきた。また殆ど全ての証言に「ドンと突き上げられて…」という言葉が始めにあり、そのこと自体は事実である。しかし構造物を壊すような強力な衝撃波(粗密波)は、別に本震の後からも発生している事を、船長の海震の証言は如実に表している。

(4) 被害をおよぼす海震の特徴のまとめ

以上に述べた海底火山活動以外の、船舶に被害をおよぼす海震の特徴を纏めると以下の通りである。

1. 地震発生初期に到達するP波と異なり、海震は船を損傷さす大きな破壊力を持っている。
2. 海震の衝撃波は粗密波(縦波)である事は船舶工学では常識で、余震毎に何度も発生している。
3. 海震の周波数は60~70Hzや120~140Hz程度が観測され、普通の地震計では測れない波である。
4. 破壊的な衝撃波は本震の後からも発生している。

3. 兵庫県南部地震での衝撃破壊の代表例

(1) 顕著な被害が生じた区間の概要

神戸市中央区波止場町から弁天町迄の区間約650mは橋脚の横梁をなくし、復員17.6mの高架橋の桁の横梁を剛な梁にして主桁と剛結した、非合成RC床版・3径間連続鋼I桁を基本構造としている。その剛な横梁を二本のRC単独柱の橋脚で支える区間である。図-6に代表構造の写真¹³⁾を、図-7に代表断面図¹⁴⁾を示す。柱は横断方向の制約から幅は1mに統一しており、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-8参照¹³⁾)。類似の二本柱の橋脚が25基(P455~P479)

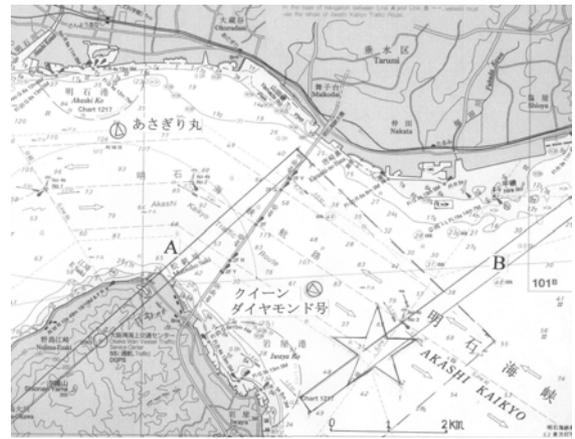


図-5 明石海峡での海震とフェリーの位置
 : 震央, A: 野島断層, B: 須磨断層



図-6 代表構造写真¹³⁾ 図-8 支承側面(横桁方向に見る)¹³⁾

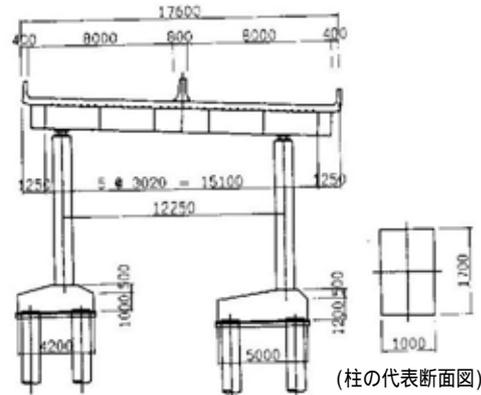


図-7 単独RC二本柱区間の代表的構造断面図¹⁴⁾

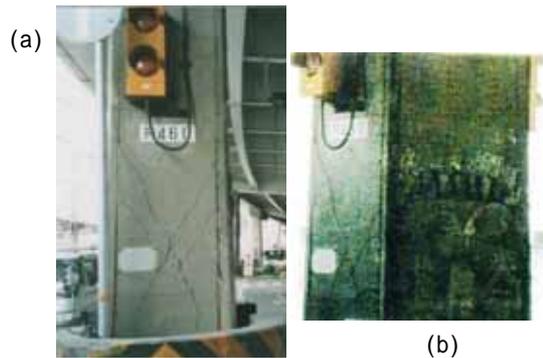


図-9 RC橋脚下部の西面のX型亀裂¹⁵⁾と南面の局部座屈鉄筋の露出(P460橋脚)¹³⁾



図-10 RC柱両振載荷実験¹⁶⁾斜めひび割れの他に曲げ引張りひび割れが多数発生(鉄道総研)



(a)P472 橋脚¹⁵⁾ (b)P477 橋脚(山側柱は南に傾斜)¹⁵⁾

図-11 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-12 柱基部の軸圧縮破壊の例(いずれも山側の柱)¹³⁾

あり，平均径間長は 27mである．

この区間で兵庫県南部地震により橋脚に二種類の特異な破壊が生じた．いずれも水平動では説明がつかない破壊形態であり，以下に状況を説明する．

(2) 柱の軸圧縮破壊

図-9(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¹⁵⁾．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所的に，柱両脇のコンクリートを残して露出している¹³⁾．この状態は軸圧縮破壊での，せん断破壊面のズレが始まり，端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を表している．

図-9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ず，さらに図-10の実験結果¹⁶⁾が示す通り曲げに伴う細かい水平ひび割れを生じるがそれがない．

軸圧縮破壊が進み崩壊した例がP472とP477橋脚にあり，図-11に各橋脚の遠景を示す¹⁵⁾．図-12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¹³⁾．なお両橋脚は，海側の柱は頭部が次節で述べる爆裂破壊をして，両柱で破壊形態が違う橋脚である．

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作用すれ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．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

図-13にP465橋脚山側の柱頭部の破壊を三面から見た状況を示す¹³⁾．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¹⁷⁾．図(c)は南面で鉄筋籠の中に落ちた下沓がある．帯筋は西面ではズレているが東面では残って



(a) 西面(P465 山側柱) (b)東面(P465 山側柱)¹⁷⁾



(c) 南面

図-13 P465 橋脚(山側)柱頭部の爆裂破壊¹³⁾



(a) P472 橋脚¹⁷⁾ (b) P477 橋脚

図-14 柱頭部爆裂破壊の典型例(いずれも海側柱の東面)¹³⁾

いる．各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時間で跳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跳び出しているのので，このような破壊を爆裂破壊と呼ぶ事にした．



図-15 P458 橋脚(海側)柱の破壊状態(西より見る)¹⁵⁾
(奥に P457, P456 の海側柱が連続して壊滅的な破壊をしている)

図-14は図-11で紹介した二橋脚の海側の柱上端の破壊状況を示す^{13,17)}。いずれも上端1.5m程のコンクリートが破壊され、図(a)ではその位置まで横桁が落下し、図(b)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各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。この破壊は水平動で起きたのではない事を表している。

図-13と図-14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、図-14は爆裂破壊の典型例に当たる。

図-11のP472とP477橋脚では海側と山側の柱で異なる破壊形態していた。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。高いエネルギーを持った衝撃波によりコンクリートが飛ばされたと考えられる。

(4) 爆裂破壊のすさまじい例と初期の例

図-15は爆裂破壊のすさまじさを示す例である。手前の柱がP458橋脚の海側の柱で、柱の上半分のコンクリートが完全に破壊している。ここでは海側の柱が三基連続して壊滅的な破壊をしている。P456では山側と海側の両脚がP458海側の柱と似た崩壊をしている。中間のP457海側の柱はどちらかといえば柱の中間部が崩壊している。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の極端な違いを呈している事である。

図-16はP458橋脚海側の柱を北側から見た物で、セットボルトが付いたままの支承が見える¹⁸⁾。図-15にも見えており、支承は横桁のほぼ所定の位置にある。横桁下面のキズは放射状で円周的ではない。

このことはこの破壊は支承に大きな力が働かず、前後左右の大きな水平移動を起していないと推定される。また3mを超す長さの相当数の鉄筋が裸状で付着がなくなっている。3m余りのコンクリートが



図-16 P458 海)柱の破壊状態(北面)¹⁸⁾
(支承のセットボルトが残存)



図-17 P463 山側柱の破壊(北面)¹³⁾

完全に壊されているが、支承は元の位置のほぼ真下に落下している。これらの状況は局地的に強力な鉛直衝撃波が働き破壊した事を示している。このような破壊が地震の主揺動の後で起きたと考えると、2.(3) で述べた船長の証言の特徴と合ってくる。

図-17は柱頭部の爆裂破壊の初期の状態と見られるもので、P463橋脚(山側)柱北面の状態を示す¹³⁾。柱厚が薄い長辺側のコンクリートが、小ブロック化し外側にふくらみ、その中に支承が埋まっている。支承のセットボルトはなくなり孔が見える。柱上端の長辺部でコンクリートが小ブロック化し、支承の下が壊れ支承が埋まる事は水平動では起こらない。

4. 簡単な試算例による検討と考察

(1) 跳び石現象等による柱の導入応力の推定

兵庫県南部地震の時、当時の神戸商船大学(現神戸大学海事科学部)構内の大型溝蓋が反転したり、二階の書棚が飛んだ例があり、その時の上向き初速度は2.4m/sと2.2m/sと推定¹⁹⁾してある。また長野県西部地震(M6.8, 1984.9.14)の跳び石現象の例では上向き地表速度は2.6m/sとの試算²⁰⁾がある。

速度 v の運動がコンクリート部材の端から導入される場合、概算的な発生応力は $\sigma = C v = E v / C$ で計算される。ここに ρ は密度、 C は弾性波速度、 E はヤング率、 v は導入速度である。

普通のコンクリート柱の端に速度 $v = 2\text{m/s}$ を導入すると、概算応力は $13.8 \text{ N/mm}^2 (140\text{kgf/cm}^2)$ になる ($\rho = 2.3\text{kN}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$, $C = 3\text{km/s}$, $E = 2.06 \cdot 10^3 \text{ kN/cm}^2 (2.1 \cdot 10^5 \text{ kgf/cm}^2)$ の場合)。

(2) 爆裂破壊と軸圧縮破壊の検討

コンクリートの柱の経験的な破壊強度は約35 N/mm²で、引張強度は3.5 N/mm²程で、動的効果で強度が2倍になる場合、引張強度は7 N/mm²(71kgf/cm²)程になる。

地表速度2m/sは局地的にあり得る値と考えられ、このような運動が柱に入射され圧縮応力 =13.8 N/mm² (140kgf/cm²)が柱上端で引張力になり、図-3の様に瞬間的に数波が働けばコンクリートが飛び散る事が予想できる。

圧縮破壊に対しては動的強度が70 N/mm²と想定され =13.8 N/mm²の5倍の値である。これに対しては基礎からの入射波が柱部で増幅されたり、よりエネルギーが大きい衝撃波であったり、先行する地震の主揺動で損傷が柱にできれば破壊しやすくなる。この場合は横桁や支承に大きな変状を生じない状態で柱が破壊することが考えられ、3.(2)で述べた柱の軸圧縮破壊が生じている状況と整合する。

(3) 地震時衝撃波の発生要因に関する考察

文献 21,22)によると地震の震源には 1.地殻のズレ破壊,2.地中の爆発,3.マグマの運動,4.突然の岩石相転移などが挙げられている。特に文献 22)では岩石の相変化による弾性波の放射は、特定の条件のもとに実験室で確認されており、その可能性を否定できないとしてある。

地殻内で臨界状態にある岩石塊が、特定の方向の節理を持ち、地殻のズレ破壊による地震活動で圧力環境が変化し相変化が励起されると考えると、地震の主揺動の後から特定の方向性を持った衝撃波が放射され、体積的に生じるので高周波で大きな破壊力を地表で発揮する現象が生じるという仮説も可能である。

岩石の相変化は地震現象の全体ではなく、限定的な現象として捉えても、構造物を破壊する威力を発揮すると考えられる。岩石相変化は震源断層近傍に限らず条件さえ整えば生じる。重要構造物の安全性を確保する観点から、構造物を破壊する衝撃波と地殻構成物質の相変化に関する研究は、今後必要になると思われる。

5.まとめ

本論文ではまず海震に関する事柄を紹介し、兵庫県南部地震での衝撃破壊の代表例としてコンクリート橋脚の軸圧縮破壊と爆裂破壊の事例を少し詳しく紹介した。その要点と課題を以下に纏める。

- (1) 海震の粗密波により船舶が壊される海の常識が陸の地震工学や耐震工学に活かされていない。
- (2) 構造物を破壊する衝撃波は主地震動の後からも起きると考えると証言と破壊状況が整合する。
- (3) 衝撃波による構造物の破壊現象について、既存の資料を再検証し、規準化を図る必要がある。
- (4) 破壊的な衝撃波を正確に把握する観測態勢をつくる必要がある。

- (5) 地震発生の一つの原因である地殻構成物質の相変化に関する研究を促進する必要がある。

参考文献

- 1)石川信隆,大野友則,藤掛一典,別府万寿博:基礎からの衝撃工学,森北出版,pp110, 図 4.57, 2008.3.
- 2)三橋博三,六郷恵哲,国枝稔:コンクリートのひび割れと破壊の力学,技報堂出版,pp136, 図 6.6(b), 2010.7.
- 3)佐藤孫七:海震の話,気象,pp6-9, 1968.2.
- 4)佐藤孫七:海震・体験あれこれ,気象,pp26-28, 1978.1.
- 5)馬場栄一・広島大学名誉教授(船舶工学)より提供.
- 6)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.
- 7)茂木清夫:地震予知を考える,岩波新書,pp84, 1998.12.
- 8)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.
- 9)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.
- 10)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.
- 11)櫻井春輔,上西幸司:新潟中越地震について思うこと, 土木学会誌, pp48-51, 2005.6.
- 12)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.
- 13)前原博; §2.地震時衝撃的鉛直波動による弁天工区の破壊例?, 内陸直下型地震における耐震問題研究会 内部資料, 2010.11.
- 14)阪神高速道路公団:大震災を乗り越えて-震災復旧工事誌-, pp464, 1997.9.
- 15)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, 1997.1.
- 16)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.
- 17)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.
- 18)兵庫県南部地震震災対策委員会:兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査 中間報告書, pp2-7, 1995.3.
- 19)西岡俊久:衝撃的地震力による構造要素の動的破壊に対する基礎研究, 神戸商船大学震災研究会研究報告 第2号, pp273-295, 1997.1.
- 20)Y.UMEDA, A.KUROISO, K.ITO, I.MURAMATU: High accelerations produced by the Western Nagano Prefecture, Japan, earthquake of 1984, Tectonophysics, 141, pp335-343, TABLE 1, 1987.
- 21)T.Lay, T.C.Wallace, 柳谷俊:地震学 上巻 地球内部, 古今書院, pp13, 表 1.2, 2002.1.
- 22)茂木清夫:地震-その本性をさぐる-, 東京大学出版会, pp20, 1981.4.