

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

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 京都市中京区丸木材木町671,エクレース御池707号)

²神戸大学都市安全研究センター 内陸直下型地震における耐震問題研究会代表 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

地震時に構造物を破壊する衝撃的な鉛直地震動の現象があることが、本研究発表会等の過去3ヶ年の発表により明確になり、同時に現在の耐震基準に重大な欠陥があることも明らかになった。しかし問題の衝撃的な波はこれ迄に正確に観測されていないため、衝撃破壊現象のイメージや衝撃波の通念が人により異なる状況にある。そこで本文では過去の発表の要点を簡潔に纏めると共に、問題の波の局在性に着目して、発生状況と破壊の特徴を示す事例を紹介し、イメージを明確にする。そしてこの波の特性について非線形波動のソリトン(孤立波)の一種として、地震波に関する新しい分野の研究をすることを提案する。

キーワード 地震, 海震, 衝撃波, 衝撃破壊, 非線形波動, ソリトン

1. はじめに

一般に衝撃波とは、媒体内を物体や現象が動く速度が、その媒体の弾性波速度に達する時に発生する波のことである。この意味とは異なり本文では、波が物体に短い時間で作用する状況を衝撃的と表し、その時の波を衝撃的な波としている。しかし波の性質が定かでないので、表題では衝撃的鉛直地震動とした。以下本文では衝撃的な波を衝撃波という。

地震時の衝撃波による現象として、話題性がある事柄に跳び石現象がある^{1,2)}。この現象は石や岩、墓石や石碑、さらに家財類の他にもお寺の鐘楼や門構が飛び跳ねて移動する現象である。この現象は条件により水平地震動でも起こるとい議論がある³⁾。

これに対し海震の現象は粗密波しか伝わらない環境で起こるため、原因となる波の性質が明確である。そこで海震に着目して調べると、衝撃波は地震発生の初期段階だけでなく余震の時間帯でも、強烈な衝撃波が生じていることがわかった。過去の海震の体験例では余震時の事例もあるが、余震の時間帯で水平動を伴わず、衝撃波単独の作用が構造物を壊している現象が、阪神淡路大震災での海震と橋脚等の破壊事例の調査で明確になり、本研究発表会等で発表してきた⁴⁻¹³⁾。この現象の発見は重要で、従来の地震時衝撃波の通念を変える発見である。その点に焦点を当てて過年度の発表内容の要点を次章に纏める。

またこの発見の重要性は要旨の冒頭で述べたように、地震時衝撃波による破壊現象は耐震基準に考慮されてないので、現在の耐震基準には重大な欠陥がある事を明らかにしたことにある¹⁴⁾。これは重要施設に対して大変重要な課題を提起したことになる。

続いて3,4章では問題にしている衝撃波の局在

性に着目し、その特徴を示す破壊事例を述べる。

その特徴から想定される衝撃波のイメージに近い波として、非線形波動のソリトン(孤立波)^{15,16)}の一種の釣鐘型の波があることを5章で紹介する。そして非線形の波の基本的な特徴が、構造物の特殊破壊事例を説明する上で役立つことを述べる。むすびとして非線形の波の研究が必要であり、地震波に関する新しい分野の研究として取り組むことを提案する。

なお、この研究は従来の研究成果を否定するものではなく、それらに加えて必要なことを意味する。

2. これまでの発表内容の要点

(1) 海震の事例調査からわかったこと

海震の事例調査からわかった要点を、箇条書きで纏めると以下の通りである^{4,5,7-9)}。

a) 要点項目

- 1) 船舶工学の専門家の指摘から；
“海震で船舶が損壊するときの波は粗密波だという事は常識である。”との指摘から、この海の常識を陸の地震関係者や有識者を始め世間一般がここ50年程忘却している。
- 2) 海震の粗密波は破壊力を持つ。
- 3) 海震は本震でも余震でも起きる可能性がある。
- 4) 明石海峡を航行中のフェリー2隻の船長の証言では、それぞれが間隔をおき衝撃を2回受けており、2度目の方が遙かに大きい。
- 5) ハイドロホンにより60~70Hz, 120~140Hzの波が余震時に観測された。
- 6) この周波数帯の波は従来の地震計では記録できない。

- 7) 群発地震では観測されなかった。
- 8) 強烈な衝撃波の正体はまだ観測されていない。

b)地震時衝撃波の振る舞いの特徴

第1は地震発生時のP波に似た粗密波は、高周波になれば減衰性が高くなり構造物を破壊するようなエネルギーを持たないと考えられてきた。しかし前述の項目1, 2)の通り強い破壊力を持っていることをこれ迄見逃してきた。表-1は海震による損壊例を纏めた表を再掲した。ジブラルタル沖で大型タンカーが大きな損傷を受けたのが1969年で、それ以来海震での大きな被害の話題は途絶え忘れられている。

第2は地震時衝撃波の体験例の多くは、地震発生の初期にドンと突き上げられ、主震動の体験中に物が跳んでいる事を目撃した証言である。この証言からの衝撃波の通念と項目4)の証言内容は異なる。項目4)は図-1に示す、フェリー2隻の船長の証言から得られた。両船が受けた2度の衝撃の間隔が問題で、主震動による海岸の揺れが海面に波を起し、それが伝わった時と片方の証言を解釈し約3分と推定した。この時間帯では主震動は治まり、特に大きな余震もない時である。この2度目の衝撃波は強烈で、地震の主震動でなくても構造物を破壊する力を持つ現象として、注目すべき現象と考えられる。

(2) 橋脚等の破壊事例からわかったこと

橋脚や他の構造物の特徴的な破壊事例の調査からわかった要点を列挙すると次の通りである⁴⁾⁹⁾。

a) 要点項目

- 1) 衝撃波によるRC柱の破壊形態には引張りと圧縮の2種類がある。
- 2) 柱頭部の裸鉄筋(籠)が直立した現象は、引張り(爆裂)または突上げ作用により発生する。
- 3) 裸鉄筋(籠)の直立は主震動後の破壊を表す。
- 4) 倒壊ピルツ橋の柱4基には軸圧縮破壊をした痕跡があり、それは倒壊前に生じている。
- 5) ピルツ橋の付近の住民の証言では、主震動が治まって、一息ついて時計を見て(5時48分)、その後階下に降りようと非常階段の踊り場に出たときに大音響を聞いている。
- 6) 強烈な衝撃波は数10Hz以上の高周波と推定。
- 7) 特殊破壊が発生した多くの場所で、衝撃波は局在的な発生状況を示す。
- 8) 衝撃波は震源断層の近傍で発生している。(注記;別の地震で遠隔地の発生例もある^{6,14)})
- 9) 強烈な衝撃波の正体はまだ観測されていない。

b) 特徴的事項の説明

衝撃波によるRC橋脚の破壊事例として最も特徴的な事例は、図-2に示す鉄筋籠および片面の柱鉄筋が裸で直立している状況である。この破壊では水平力は作用していない。また主震動の前に起きたならこの状態は保てないので、主震動の後に起きた事を意味する。これが項目3)であり、前節の末尾で述べた海震での現象を裏付ける事例になっている。

そこでピルツ橋の破壊事例と付近の住民の証言を調べると、倒壊17基の内4基の柱は約3m長さが短

表-1 海震による損壊例^{5,8)}

日付	船舶	場所	状態
1894.7.23 (明治27年)	ドイツ帆船 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
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 コミングの両側に亀裂 (横浜で修理)
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)
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



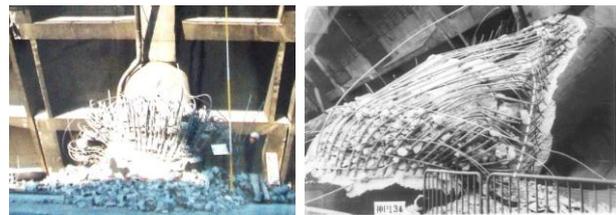
(☆ 震央、A 野島断層、B 須磨断層)

図-1 クイーンダイヤモンド号とあさぎり丸の位置図^{5,8)}



(a) 神 P465(山側) (b) 神 P472(海側)

図-2 RC柱頭部の衝撃波による破壊の典型例⁹⁾



・鉄筋が提灯座屈 (a) 神 P133

・鉄筋クビレ分布(白色破線) (b) 神 P136

図-3 ピルツ橋脚の軸圧縮破壊⁸⁾

くなって、軸圧縮破壊をしていた。図-3に軸圧縮破壊をしたピルツ橋脚の中の最も特徴を表している2基の状況を示す。これらは鉄筋の提灯座屈と鉄筋クビレ分布の状況である。倒壊前に軸圧縮破壊を起しているわけで、これが項目4)である。ピルツ橋脚の転倒原因は主震動による曲げ破壊だけでは倒壊に至らなく、軸圧縮破壊した4基の内3基の柱が北西側に落ちた事が直接原因になったと考えている。

項目5)の住民が聞いた大音響は、主震動の後約3分頃になる。この大音響は図-3に示す軸圧縮破壊が衝撃波により生じた時の破壊音と仮定すれば、前節で述べた海震での衝撃波の発生推定時間と一致する。あるいは、この大音響は主震動が要因の橋脚の遅れ破壊により生じた転倒音とも想定される。倒壊時の



図-4(a) 神P66と西側の状況(西方の老番側を望む)¹⁸⁾



図-4(b) 神P67と東側の状況(東方の若番側を望む)¹⁸⁾

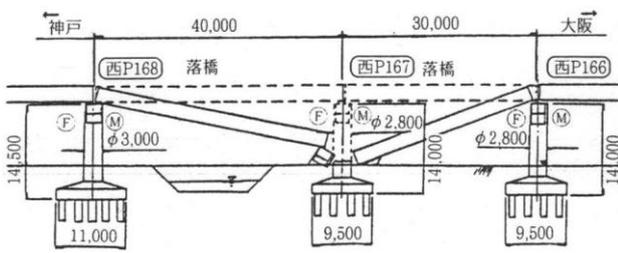


図-5 側面図(西P167とその前後)¹⁹⁾



図-7 西P166(軽微)と西P165(圧縮破壊)の状況¹⁸⁾



図-6 西P167の崩落状況¹⁸⁾



(軸圧縮破壊) (損傷軽微)
図-8 西P165柱の状況¹⁸⁾ 図-9 西P168の状況¹⁸⁾

状況は‘スローモーション映画をみているようだった’と住民の証言にある^{7,8)}。

なお、項目6)の周波数はトンネルの損傷事例¹⁷⁾や海震の項目5)を参考にして、高周波でないと図-2(a)の状態は生じないと推定した。項目7), 8)は本文の主題に関係し次の3章以降で改めて詳しく述べる。

3. 局在波が二つ連成した形の破壊事例(2件)

(1) 耐震工学で想定する被害の一般的な状況

特殊な被災状況を調べる前に、現在の耐震工学が想定している地震波が作用したと仮定して、それによる被害に近い状況を図-4(a),(b)に示す。地震時の主震動の波長を300m程度とし、その波が移動して被害が広がるとすると、両図に示すように似た被害状況が連続して生じる。両図とも手前の柱は北西方向に曲げせん断破壊をしており、両奥の場所に柱基部の曲げ損傷が連続的に見られる(←部)。

(2) 西P165と西P167の破壊と前後の状況

この2基の橋脚は似た破壊形態だが、西P167は崩落し被害が拡大した。この西P167と前後の橋脚の側面図を図-5に、崩落状況を図-6に示す。図-7には若番側の西P166と西P165の状況を示す。図-8には西P165の軸圧縮破壊の状況を示す。図-9には老番側の

西P168の状況を示す。西P165と西P167は甚大な破壊状況を呈しているが、西P166と西P168の隣接橋脚には殆ど損傷は見られず、また大きな変位を起こした痕跡もない。西P168から若番方向の径間割りには40+30+30+50(m)である。荷重に多少の違いはあるが、同じ地震動を受けるなら、隣あう橋脚でこれ程極端に被災程度の違いが出るとは考えにくい。

この2基の柱の破壊形式の解釈についても疑問があり、震災後に出された図書^{19,20)}では、曲げによる亀裂が先行し、その亀裂の一部が進展し斜めに入った段階で、斜めの亀裂にそってせん断破壊が進行したと想定されている。しかし図-2(a)と図-8の様に、上部工の自重だけでは斜め亀裂が多少大きくても崩落はしない。破壊した2基の橋脚には、間に1基を挟んで強力な鉛直衝撃波が作用したと考えられる。

(3) 神P55と神P57の破壊と前後の状況

神P55橋脚は出入路部の広幅員の路面を受ける2径間門型橋脚で、その上横梁と中柱は鋼製で両脇はRCの柱になっている。この橋脚の崩壊前後の正面図を図-10(a), (b)に示す。鋼製の中柱が崩壊し、横梁が水平変位を伴わずに約6m落下した。その落下

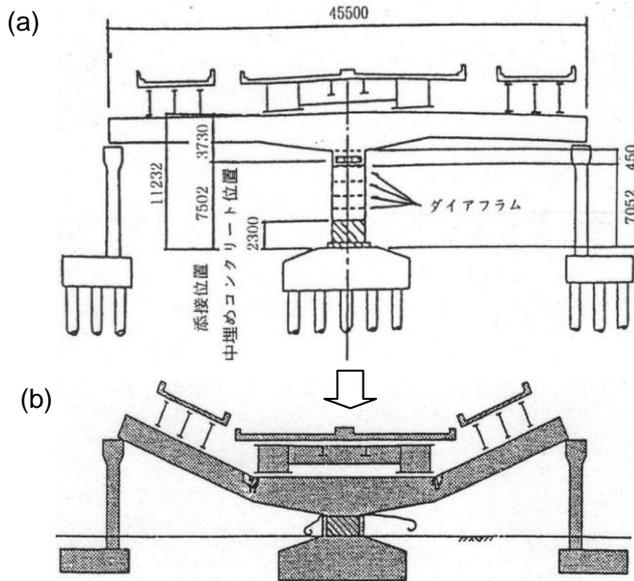


図-10 神P55の正面図(a.崩壊前, b.崩壊後)¹⁹⁾



図-11 神P55柱の崩壊状況(南東面)¹⁸⁾

後の状態を図-11に示す。横梁中央部の柱との接合部が水平変位を殆ど起こしていないことがわかる。柱の四面の鋼板は4方向に開いて飛散し、鋼板の断裂部にカールができています。

図-12は東側若番橋脚の神P54の状態で柱基部に曲げ損傷を受けている。図-13は西側老番橋脚の神P56の状態で見かけ上損傷はない。(注記；後日の詳細点検で南東部のアンカーボルトが破断していた¹⁹⁾)

図-14はさらに西隣の橋脚神P57の状態、柱が甚大な軸圧縮破壊をしている。図-15はその西隣の橋脚神P58の状態、柱の基部に曲げ損傷があり、隣の神P57が北側にずれ落ちた影響で北に傾いている。

図-16は神P57(図-14)の梁の位置を元の位置に戻した復元図で、柱の崩壊による梁の落下高さは3m弱と推定した。この長さはピルツ橋脚の4基の柱が短くなった長さに匹敵している⁸⁾。なお神P54からの径間割りは70+45+36+36(m)である。

橋脚神P55と神P57は間に1基を挟んで、前後の橋脚の損傷状態とは全く異なる破壊形態をしている。前節で述べた西P165と西P167の破壊事例と共通しており、軸圧縮破壊の状況がより鮮烈である。

上記2件の橋脚破壊の例では、それぞれ着目した2基が同時期に破壊したことも予想されるので、局的な衝撃波が2波連成した形の事例に選んだ。



図-12 神P55(崩壊)と神P54(基部の曲げ損傷)²⁰⁾



図-13 神P56(左)と神P55崩壊状況(奥)²⁰⁾



図-14 神P57柱の軸圧縮破壊(東面)¹⁸⁾



図-16 神P57橋脚復元図

図-15 神P58の損傷¹⁸⁾

4. 孤立波的な衝撃波による破壊例(3件)

孤立波的な衝撃波により破壊したと判断される橋脚3基(神P150, 神P240, 神P688)の例を述べる。

図-17は神P150の崩壊状況で、柱上端の鉄筋が裸で直立している(←部)。この橋脚の破壊状態は単純な軸圧縮破壊ではなく、破壊前に梁部は上方に突き上げられ、梁側面部の柱を巻く帯筋を切断し、その直後に下向きの力が働き柱を圧縮破壊している。

この橋脚の前後の状況を図-18と図-19に示す。図-18の神P149では柱の下部が曲げせん断破壊を、図-19の神P151では柱の基部が曲げ損傷をしており、破壊形態が異なっている。神P150を南から撮影した写



図-17 神P150崩壊状況(南東面)¹⁸⁾



図-21 神P240崩壊状況(北面)²⁰⁾



柱基部曲げ損傷
図-19 神P151²⁰⁾



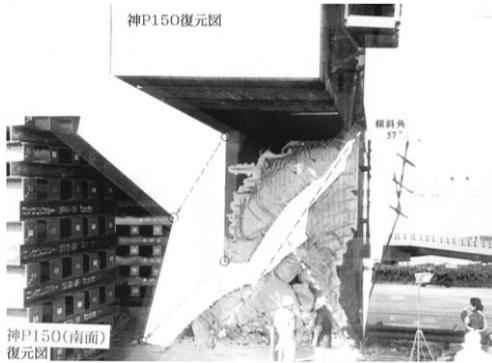
柱下部曲げせん断破壊
図-18 神P149¹⁸⁾



柱曲げせん断破壊
図-22 神P239¹⁸⁾



柱基部曲げ破壊
図-23 神P241¹⁸⁾



せん断面(傾斜角57°)は西向き
図-20 神P150柱の復元図(南面)



せん断面(傾斜角57°)は東向き
図-24 神P240柱の復元図(北面)

真で、梁の位置を元に戻した復元図が図-20である。せん断面は西向きで傾斜角は57°である。

図-21は神P240の崩壊状況で、柱上端の鉄筋が裸で直立している(←部)。柱の破壊経過は前述の例と同じと推定できる。図-22と図-23は前後の橋脚の状況で、神P239では柱下部が曲げせん断破壊を、神P241では柱基部が曲げ損傷をしており、前後の橋脚の破壊形態とは異なる。神P240の梁の位置を元に戻した復元図が図-24で、柱のせん断面の傾斜角は同じ57°だが、向きは東向きであり異なる。

図-25は神P688の門型橋脚の破壊状況である。2本の柱共X型の甚大な軸圧縮破壊をしている。右側(西側)の柱上端に裸鉄筋が直立(←部)しており、前述の2例と同じ特徴がある。したがって破壊経過も同じと推定できる。資料は省くが、この橋脚の前後の橋脚の損傷は非常に軽微である。

以上の3例に図-2(a)の状態を考慮すれば、これらの橋脚を破壊した衝撃波は、平面的には橋脚間の径間長以下の規模であり、高周波でエネルギーが集中した局在波(孤立波)であると推測される。なお、この3例の破壊は震源断層直上付近で起きている。



図-25 神P688門型柱の軸圧縮破壊(X型)²⁰⁾

5. むすび

以上の事例で説明した通り、地震時に構造物を破壊するエネルギーを持った鉛直衝撃波が存在する。しかし、この鉛直衝撃波は正確には把握されておらず、現在の耐震基準には重大な欠陥がある。

その衝撃波の性質はエネルギーが集中した局在波で減衰しにくい高周波と考えられる。この波のモデ

ルとして、エネルギーが集中して減衰しにくい点に着目すると、形を変えずに伝わる波のソリトン(孤立波)が想定される。ソリトンは非線形の波で数学の分野で研究が進んでいる。

図-26はソリトンの一種で非線形発展方程式の、サハラフ・クズネツォフ方程式の数値解の図¹⁵⁾である。(a)図は釣鐘型の孤立波の切断図と立体図で、(b)図は2次元平面上に孤立波が列状に発生した例である。波の形が釣鐘型であり、エネルギーが集中した波の形としてふさわしいものと考えられる。それが単独の場合もあり、また列状に生じる場合もあることが、本文の4章と3章で説明した事例での局在波のイメージと重なってくる。

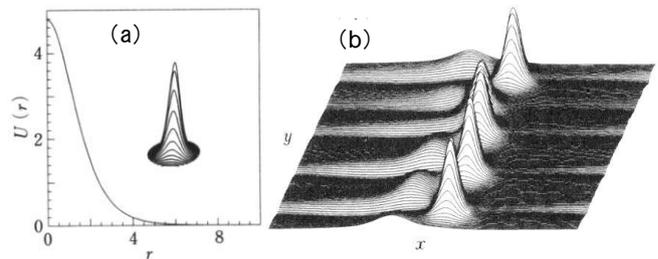
ところで、非線形の波の基本的な性質である形が保たれる理由は、図-27に示すように方程式が持つ非線形効果と分散効果が釣り合い、波の形が保たれるとされている¹⁶⁾。鉛直波動はこの図の波とは進行方向が異なるがこの特性は保たれる。

もう一つの基本的な特徴に、振幅が大きい程速度が速い特徴がある。これは非常に特殊な地震波の特徴になる。主震動後に強烈な鉛直衝撃波が出ている現象と合わせて、この特徴は複雑な構造物被害の実態を解釈する上で役立つ、考慮すべき特徴であると考えられる。

局在波としての波の形態的な面と、強いエネルギーを持つ波の質的な面との、両方の面で非線形の波について研究することを提案する。また一方では物理的な裏付けをする研究が望まれ、これらの研究は地震波に関する新しい分野を開拓することになる。

参考文献

- 1) 西澤修, 佐藤隆司, 杉原光彦: 跳躍現象から推定される断層近傍での強いゆれ, 地質ニュース491号, p.9-16, 1995.7.
- 2) Y.UMEDA, A.KUROISO, K.ITO, I.MURAMATU: High accelerations produced by the Western Nagano Prefecture, Japan, earthquake of 1984, Tectonophysics, 141, p.335-343, Table 1, 1987.
- 3) 大町達夫: 直下地震の揺れ方, 横浜東ロータリークラブ第15回例会・卓話, 平成18年10月20日.
- 4) 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.
- 5) 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]
- 6) 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.
- 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, I-30, 平成25年6月.
- 8) 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]



(a)切断図と立体図 (b) 列状の孤立波の発生例
図-26 ソリトンの例 (非線形波動の釣鐘型孤立波)¹⁵⁾

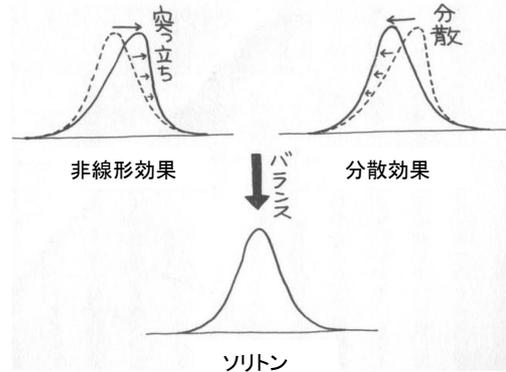


図-27 ソリトンが形を保つ理由¹⁶⁾

- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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]
- 12) 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.
- 13) 前原博, 櫻井春輔: 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, 土木学会関西支部 平成27年度年次学術講演会, I-44, 平成26年5月.
- 14) 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, GS5-1, 平成27年7月.
- 15) 川原琢治: ソリトンからカオスへ-非線形発展方程式の世界-, p.161, 朝倉書店, 1993.5.
- 16) 渡辺慎介: ソリトンの非線形のふしぎ-, p.67, 岩波書店, 1992.1.
- 17) 櫻井春輔, 上西幸司: 新潟中越地震について思うこと-内陸直下型地震は波長の短い衝撃的な地震波をとまなうか?-, 土木学会誌, p.48-51, vol.90 no.6 June 2005.
- 18) 前原博收藏の写真資料.
- 19) 阪神高速道路公団: 大震災を乗り越えて-震災復旧工事誌一, 平成9年9月.
- 20) 阪神高速道路公団監修, 阪神高速道路管理技術センター: 震災から復旧まで [写真集], 平成9年1月.