

(一財) 地球システム総合研究所 正会員 ○前原 博

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 フェロー 櫻井 春輔

1. はじめに

今年には阪神淡路大震災 20 周年になる。この震災では多くの特殊な破壊事例が見られたが、当時それらは例外とされた。しかし、その後新潟県中越地震(2004,10) で 2515gal, 岩手・宮城内陸地震(2008, 6)で 3866gal が、クリストチャーチ地震(2011,2) で 2159gal が生じ、都市部で 1851gal が記録され、大きな値の鉛直動が注目された。そして東日本太平洋沖地震が起き、大津波で原発の重大事故を生じた。

この事故以来想定外は許されなくなり、阪神淡路大震災の被災事例を海震の事例と共に見直してきた^{1-6,8,9)}。その結果強力な衝撃的鉛直地震動が本震の後 3 分頃に発生し^{5,8)}、特殊な破壊形態は主震動後に起きた事が判明した。この調査中に船舶工学者から‘海震で船を損壊さず地震波は粗密波である事は常識だ’との指摘があり^{2,5,8)}、陸上の耐震工学ではその配慮が欠けている事が鮮明になった。

この衝撃的地震動（以下衝撃波と呼ぶ）は高周波で従来の地震計では記録されないため、正確な波形記録がなく正体はまだ不明で、これを正確に観測するには地震直前予知の実用化が必要になる^{7,8)}。その波の特徴を調べるには、現状では被災状態と体験証言を綿密に調べなくてはならない。問題の衝撃波の規模的な形態に着目した検証はこれ迄にされてないので、本文ではその試みの一端を紹介する。

2. 局在波が二つ連成した形の破壊事例 2 件

耐震設計での阪神地区の地震波の波長は約 300m 程度と考えられる。その半波長と較べて著しく短い間隔で、中間に見かけ上損傷がない橋脚を挟んで、二つの橋脚が軸圧縮破壊をした例が 2 件ある。

それを図-1 と図-2 に示す。図-1 は橋脚西 165-167 の 3 基の被災状態の写真で、図(a)は東方から、図(b)は西方から見たものである。橋脚西 165 と 167 は軸圧縮破壊し、後者は落下している。中間橋脚前後の径間長は 30m+40m である。

図-2 は橋脚神 55-57 の 3 基の写真で、図(a)は西方から、図(b)は東からそれぞれ見ている。橋脚神 55(鋼製)はこの写真では見にくいですが、中央の柱部が四方に開き、上の横梁が水平位置を変えずに落下している。橋脚神 56 は見かけ上損傷はないが、南東部のアンカーボルトが一部切れていた(曲げ損傷)。橋脚神 57 は柱部が軸圧縮崩壊し、北にずれ落ち柱高さが約 3m 短くなっている。中間橋脚前後の径間長は 45m+30m である。この 2 件の事例とも破壊した橋脚は前後の状況と較べると損傷形態と程度が極端に異なり、破壊した 4 橋脚は水平動による破壊ではなく、鉛直衝撃波による破壊と判断される。その衝

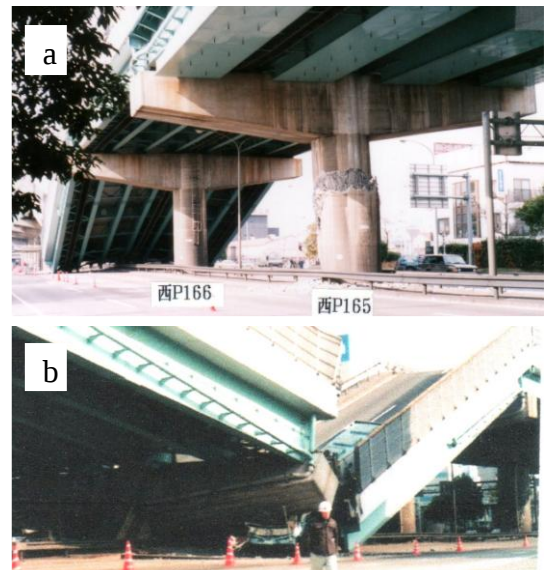
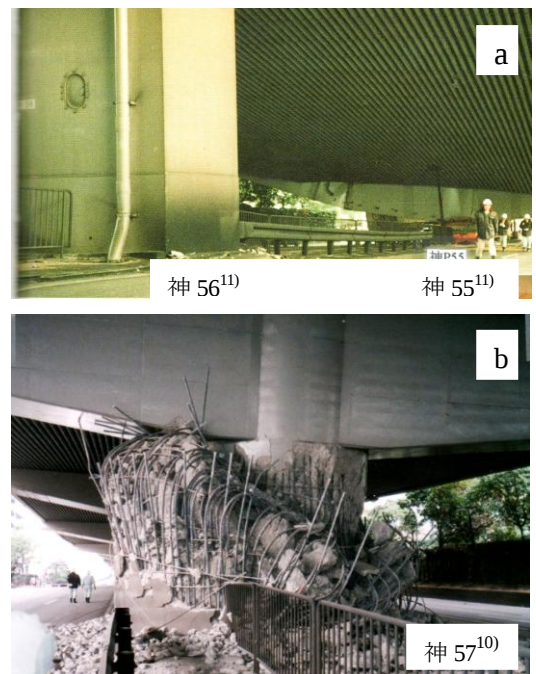
図-1 橋脚 西 165-167 の破壊状況¹⁰⁾

図-2 橋脚 神 55-57 の破壊状況

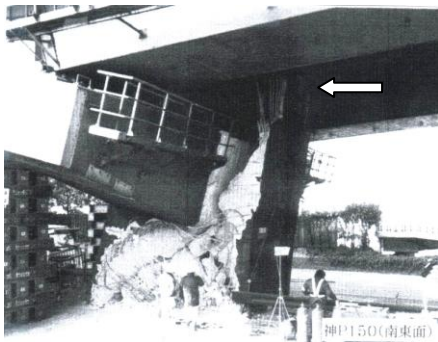


図-3 橋脚 神 150(南東面)¹²⁾



図-4 橋脚 神 240(北面)¹¹⁾

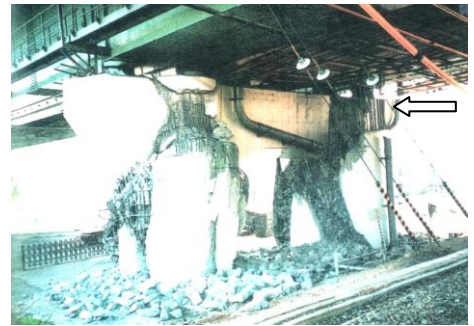


図-5 橋脚 神 688(北東面)¹¹⁾

撃波の平面的な規模は 30～40m 程の局在波と考えられる。この事例 2 件では、それぞれ二つの局在波が同時に生じた事も考えられ、連成した形の事例に選んだ。

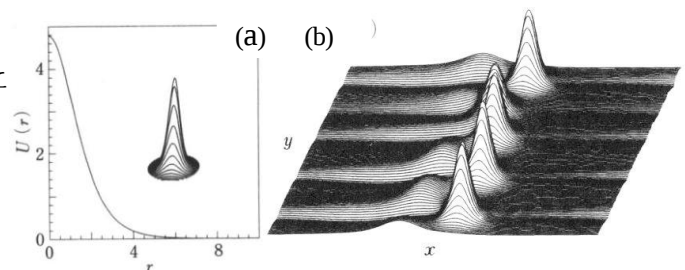
3. 単独の局在波による破壊事例 3 件

図-3 から図-5 は前後の橋脚とは著しく異なる状況で、軸圧縮破壊をした代表的な 3 件の事例を示す。これらの 3 件の橋脚は単純な軸圧縮破壊をしておらず、片側の柱鉄筋の上端で横梁の側面部に位置している部分が

裸で鉛直に立っている（各図の $\leftarrow$ 部）。この状態は圧縮破壊を起こす前に上方に突き上げられて、横梁に巻き込んでいる帯筋を切断し、その直後に軸圧縮崩壊をしている事を示す。高周波の波動でないこのような破壊は生じない。図-3（神 150）と図-4（神 240）では橋脚を見る向きが南北で異なり、柱の斜めせん断破壊面の向きは両方で方向が異なる。図-5（神 688）は門型橋脚で両方の柱が X 型の崩壊をしている。これらの柱を崩壊した鉛直力は非常に大きな力でなくてはならない。強力なエネルギーが局所的に集中して釣鐘状の形をした局在波と想像される。

4. 非線形波動のソリトンの例

エネルギーを減衰することなく伝える波にソリトン（孤立波）というものがある。図-6 はその一種で、非線形発展方程式のサハラフークズネツォフ方程式の数値解の図を文献 13) から編集したものである。図(a) は孤立波の切断図と立体図で、図(b) は孤立波が列状に生じている例である。非線形方程式を成立させる条件が揃えばこのような波が生じる訳で、前二節で述べた局在波のイメージとよく似ている。非線形の波を研究する必要があることを表している。



(a) 切断図と立体図 (b) 列状の孤立波の発生例
図-6 ソリトンの例（非線形波動の釣鐘型孤立波）¹³⁾

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。
- 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。
- 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) 前原博収蔵の写真資料。
- 11) 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。
- 12) 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。
- 13) 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－，p161，朝倉書店，1993.5。