

地球システム総合研究所 正会員 ○前原 博
 建設工学研究所 櫻井春輔

1. はじめに

阪神淡路大震災では水平加速度が 800gal を越す値が記録され構造物の破壊は水平動によるとされてきた。しかし近年発刊された衝撃工学¹⁾やコンクリートの破壊力学²⁾の本では、写真-1 と写真-2 に示すように異なる解釈の説明がされ、各専門家は異なる判断をしている。改めて関連事象や破壊例を調べると重要な事柄が推察された。その要点を述べる。



写真-1 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⁾

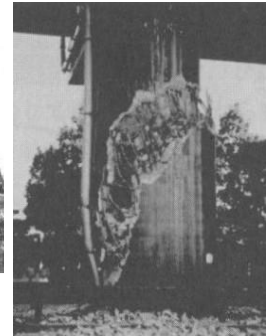


写真-2 道路橋脚の軸圧縮せん断破壊²⁾

2. 海震に関連した事象

古くから海震を受けた船舶の話^{3,4)}や、強い衝撃で船殻補強材が座屈し配管の切断や装備品が落下した例⁵⁾がある。図-1 は伊豆半島東方沖地震(M6.7,1980)での余震の波(粗密波)を観測船でハイドロホンにより周波数帯 50~100Hz、100~300Hz で観測した波形⁶⁾を示す。これらの周波数帯の波は普通の地震計では捉えられない。このような波が船体をどンドンと突き上げたとの説明⁷⁾がある。また、阪神淡路大震災時の証言集では明石海峡上のフェリーの船長の証言に、初めの衝撃を受けエンジンを止め、船を点検した後に潜水艦と衝突したような大きな衝撃を受けた旨の証言⁸⁾がある。この点検の時間を考えると主地震動の後で強い衝撃波を受けたと考えられる。

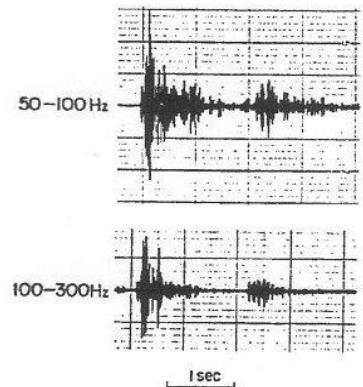


図-1 ハイドロホンでの地震の周波帯別観測波形⁶⁾

3. 跳び石や大型溝蓋反転の例

長野県西部地震(M6.8,1984)での跳び石現象の例では上下の地表速度は 2.6m/s との試算⁹⁾がある。また阪神淡路大震災時に当時の神戸商船大学構内の大型溝蓋が反転した例があり、その反転運動では図-3 のように、上下の地表速度は 2.4m/s と推定¹⁰⁾してある。

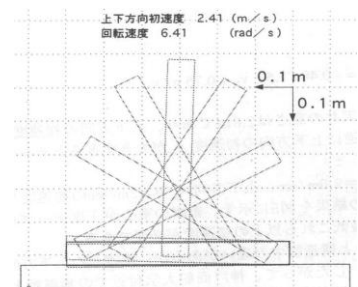


図-2 大型溝蓋の想定反転運動⁹⁾

4. 橋脚の破壊事例が示す重要な特徴

高速道路の上部工を単独に二本の柱で支持する写真-3 に示す構造区間(延長約 700m)で、特殊な破壊形態の柱が多く見付き、その一部を写真-4 と写真-5 に示す¹¹⁾。写真-4 では RC 柱の上端が破壊され、帯鉄筋がある鉄筋籠が露出して立っているが、内部のコンクリートの多くが跳び出してなくなり、向こうが透けて見える。



写真-3 高速道路の二本柱区間の代表的構造

写真-5 ではより破壊が進み、鉄筋が露出している部分のコンクリートはなくなり横桁が落下しているが、片面の鉄筋が裸で直立している。鉄筋が直立している事はこの破壊が起きた部分では、水平せ

ん断作用を受けていない事と、この破壊は主地震動より前には生じていない事を意味している。なお、これらの柱の前後の柱(径間約 27m)は目立つ損傷を受けていない。これらの状況から写真-4 と-5 の破壊は水平地震動では生じず、柱上端のコンクリートは高周波の鉛直衝撃波により破壊したと推定される。その衝撃波は主地震動の後に生じている。

5. 簡単な一つの推算と考察

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 σ は、 $\sigma = \rho C v$ で計算される。ここに ρ は密度、 C は弾性波速度、 v は導入速度である。普通のコンクリートの柱の端に速度 $v=2\text{m/s}$ の運動を導入すると、概算発生応力 σ は $13.8 \text{ N/mm}^2(140\text{kgf/cm}^2)$ になる ($\rho = 2.3\text{kN}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ 、 $C = 3\text{km/s}$ の場合)。

コンクリートの柱の経験的な破壊強度は約 35 N/mm^2 で、引張強度は 3.5 N/mm^2 程で、動的効果で強度が 2 倍になる場合、動的引張強度は $7 \text{ N/mm}^2(71\text{kgf/cm}^2)$ 程になる。地表速度 2m/s はあり得る値で、このような運動が柱に輸入され上記の応力 σ が柱上端で引張力になり、図-1 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。写真-4 や-5 の橋脚より過酷に破壊した橋脚もあり、局地的に大きな破壊エネルギーを持つ衝撃波が発生したと推定される。

6. まとめ

以上の考察から構造物を破壊する地震時鉛直衝撃波は、地震の主揺動より後から、局地的に大きな破壊エネルギーを持つ衝撃波が発生していると推察できる。写真-2 の橋脚がこの破壊状態で崩落してないのは、地震の主揺動の後に軸圧縮破壊したので余震に耐えられたと理解しやすい。地震時の破壊構造物の資料は断片的にしか公表されてなく、阪神高速神戸線の被災区間の全橋脚の写真集が民間(非公開)で最近発見され、橋脚毎の被災状況を再検証する事が可能になった。阪神高速以外の被災状況もきちんと再検証をする必要がある。原子力発電所の事故が発生した現状を踏まえると、この現象の解明には特に重点を置き、安全対策について十分な措置を講じねばならない。

○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.
- 3,4) 佐藤孫七: 海震の話, 気象, pp6-9, 1968.2. および: 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)提供資料(ジブラルタル沖地震 M8.0, 1969.2, 3.25 万 t タンカーの事故).
- 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), 1981.3.
- 7) 茂木清夫: 地震予知を考える, 岩波新書, pp84, 1998.12.
- 8) 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, pp191, 明石海峡 向所彊氏の証言, 1997.1.
- 9) 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.
- 10) 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, 図-4, 平成 9 年 1 月.
- 11) 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.



写真-4 柱上端の破壊・鉄筋籠の残存と透視 11)

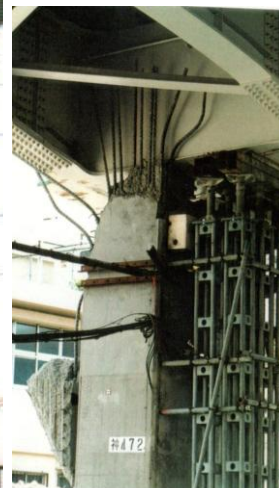


写真-5 柱上端の破壊・裸鉄筋が直立 11)