

見過ごされてきた強力な鉛直地震動の構造物破壊への影響

地球システム総合研究所 正 会 員○前原 博
 神戸大学名誉教授 フェロー 櫻井 春輔
 大阪市立大学名誉教授 フェロー 園田恵一郎

破壊的な鉛直地震動の問題について、東日本太平洋沖地震直後に筆者達は研究グループを構成して活動を始めました。平成 24 年度より近畿地方整備局及び土木学会関西支部の年次研究発表会を各 5 カ年続け、その途中から地震学会や安全工学会等で各 3 年発表をしました。土木学会関西支部から、平成 27-28 年度は「都市直下地震での耐震問題に関する研究」の共同研究グループとして、平成 29-30 年度は「都市直下地震での鉛直方向の免震構造に関する調査研究」の調査研究委員会として採択されました。

その調査・広報活動の中で特に関心が持たれた話題を報告します。表 1 はルドルフの海震度階級表で、1898 年に作られています。海の地震波では横波(水平動)は伝わらず縦波(疎密波)が伝わります。船が破壊される場合を最上位の震度階として階級表が作られ、10 段階の物が表 1 で、後に 6 段階のシーベルグの震度階表(1923 年)が作られており、日本では両者共使われています。船舶工学の専門家から、「海震で船舶が損壊する時の地震波は疎密波である事は常識である」と指摘されて、前述の年次大会や学会の発表会等で、海震の 2 種類の震度階表とこのフレーズを紹介すると、構造物の破壊状態から破壊力を持つ鉛直地震動の存在を説明するより、はるかに容易にその存在を認識され易くなりました。陸では海震の事実がここ 60 年程忘れられていました。

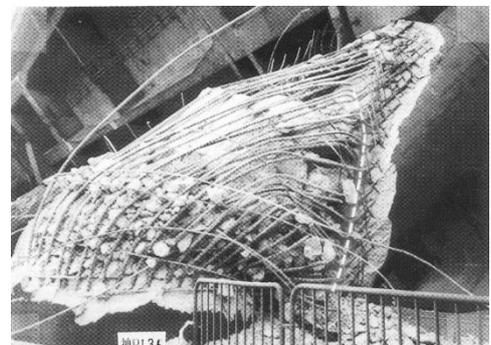
図 1 は阪神淡路大震災の被害を象徴する都市高速道路の倒壊ピルツ橋区間の航空写真で、低空で縦断方向に撮った物を横にして、白色の高欄線(幅約 1m)の変化状況を見易くした物です。途中で 3 カ所高欄線が低下した部分があり、その橋脚 4 基に曲げ破壊ではない破壊形態が見つかりました。図 2, 3 はその中の代表写真で、図 2 では柱が提灯座屈の破壊をして鉄筋が全周で外方向に曲がり、図 3 ではズレ破壊の痕跡が明確に見られます(白色破線部)。即ち、柱は軸圧縮破壊し柱長を短くした後で横倒れをしました。応答解析の結果では鉄筋の塑性率 3 程度なので、柱は損壊して主筋が裸状に露出しているが自立した状態だったと判断され、そこに鉛直波動が加わり柱を断続的に軸圧縮破壊させました。主震動より後で強力な鉛直波動が生じたという証言は、明石海峡の 2 隻のフェリーの船長、高速道路の 2 名の走行者およびかなり多数の住民の



白色の高欄線の低下部分 3ヶ所に着目
 図 1 ピルツ橋倒壊区間の斜航空写真



基部の鉄筋は東西共外側に大きく湾曲
 図 2 P133(南面)・提灯座屈の痕跡



鉄筋の直角クビレが分布(白色破線)
 図 3 P136(東面)・ズレ破壊の痕跡

表 1 ルドルフの海震度階級表 (1898)

震度	説 明
1	単に一種に音響と感ずる程度にして、多くは甲板以下に在る乗員のみに感得す。
2	睡眠中の乗員を醒ましむる位の程度にして、多くは甲板以下の人に感ず。
3	船体全部に震動を感じ、あたかも甲板上に重き器具を転落したる感を起こさしむ。
4	あたかも錨を深所に投じ、錨が急に繰り出される時に感じる震動に似たるもの。
5	船体が珊瑚礁、砂州、海底等に触れ、これ乗り越したる如く感じ、また他の小なる船体と衝突しこれ乗り越したる様に感ず。
6	皿鉢などの食器またはコップ等が動き出し、ガチャガチャと鳴り響く程度の震動。
7	甲板上に直立するの不可能なる程度の震動
8	帆柱、帆架、卓子など並びに甲板上の物体は、衝突に為に震動し、羅針儀、寒暖計などの破損することある程度。
9	船体が一方に押しやられ、震動を起こし、航行不可能となる程度。
10	甲板上の人は投げ出され、重き物体も投げあげられ、甲板の接合部は剥がれ難船することある程度。

地震、海震、縦波、鉛直キラーパルス、局在波、構造物破壊、

連絡先：〒569-1042 高槻市南平台 5-53-29, E-mail:h.maehara1@gaia.eonet.ne.jp

証言があります。そしてその波は連続して構造物を壊す場合もあるが、多くは断続的とか散在的に生じており局在波の特徴を呈します。また別の橋脚の破壊状況からこの波はかなりの高周波であることが推定されます。従来の地震波の概念にはない波なので、「後発鉛直キラーパルス」と便宜上呼ぶことにしました。この波の特徴から、その全容を正確に観測する事は容易でないと頷け、正確にはまだ観測できていません。

最近の地震について検討すると兵庫県南部地震とマグニチュードが同程度の地震であった熊本地震でも破壊的な鉛直波動による現象が見られ、かなりの数のビルでピロティの層間破壊・パンケーキクラッシュがありました。その他に図4は益城町の辻ヶ峰の慰霊塔の施設と石碑が飛び散る被害の状況です。推定約3tの石碑が6m弱跳んでおり、片方の石灯籠の宝珠も6,7m跳んでいます。長野県西部地震で5t程の岩が数m跳んだ事例に次ぐ写真です。石碑の推定鉛直初速度は5~7m/sを得ました。図5は辻ヶ峰の東方で地表断層が水路の護岸と交差する場所で、破壊された北側の護岸壁の塊が向きを逆転して南側の護岸に寄り掛っている写真です。水路幅から見て横回転ではなく、跳ね上がり回転をしたと考えられます。その推定鉛直初速度は4~5m/sが得られ、局地的に大きな初速が生じています。図6は益城町内の旧国道443号の第1畑中橋のRC柱列式橋脚の柱の一部のみが破壊した例で、破壊力持つ局在波の特性を如実に示しています。

図7は大阪府北部地震(M6.1)で煙突が3分割破壊をした例です。下段(a図)に対し中段の縦半分(b図)は東隣の建物と塀の間に挟まり、上段は(c図)は南の建物の上に落下しています。横揺れでは中段が元の上下を保ちb図のように挟まる筈がない。

図8は門建築の屋根が北側の道路に反転して落下した例である。屋根の裏側の束柱等が全て抜けている。水平動によるロッキングでは全数抜ける筈がない。

図9はJR向日町駅改札口近くのRC柱の損壊例である。この柱は1階の張出し屋根を支えており上載荷重は小さい。2本が損傷した内の1本である。軸圧縮破壊の特徴をよく表している。これらの3例は震央が高槻市の城跡公園付近である事に較べ遠く離れた場所で局地的に起きている。破壊力の程度は他の事例と比べそれ程大きくはないがM6クラスの地震から構造物を損傷さず鉛直波動が生じている事を示す重要な事例である。

こうした破壊力を持つ鉛直地震動の存在が今まで見過ごされてきていた。その地震波を観測しようとした時、高周波の問題を置いたとしても、現在の広域観測網での地表地震計が置かれているのは1.5t程度の埋込みコンクリート台の上である。約3tの石碑を跳ね飛ばす鉛直動がまともに作用すれば、台は浮き上がり正確な観測はできない。さらに局地的に生じる現象は捉えにくい。したがって既存の事例や今後起る事例を丁寧に観察し、解析をすることがより重要になる。



図4 辻ヶ峰-石碑と燈籠類の飛散状況[益城町]



堂園地区
図5 水路護岸の反転



第1畑中橋(木山川,旧国道443号)
図6 RC柱列橋脚の部分破壊



図7 煙突三分割破壊と証言：ドンと突き上げる音の後に揺れて外に出た時に崩れていた。[枚方市]