1984 年長野県西部地震での石の跳躍現象から 推定した震源域の地震動強さ

東京工業大学大学院総合理工学研究科* 翠川 三 郎・竹田 尚 史**
年 縄 巧・大町 達 夫

(昭和 63 年 4 月 28 日受付; 昭和 63 年 7 月 25 日受理)

Intensity of Near-field Ground Motion Estimated from Upthrow of Boulders during the 1984 Western Nagano Prefecture Earthquake

Saburoh MIDORIKAWA, Yoshifumi TAKETA, Takumi TOSHINAWA and Tatsuo OHMACHI

The Graduate School at Nagatsuta, Tokyo Institute of Technology,
4259, Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 227

(Received April 28, 1988; Accepted July 25, 1988)

It is important for earthquake resistant design of critical structures like nuclear power plant to evaluate characteristics of near-field ground motion. The intensity of the near-field ground motion during the 1984 Western Nagano Prefecture earthquake ($M6.8$) is estimated from the observed upthrow of boulders. To simulate the upthrow, the Distinct Element Method is employed, because it can take into account not only interaction but also separation of soil and boulder. According to ambient vibration test of the boulders and seismic prospecting of surface ground in the field, the parameters used in the simulation are determined. As a result of the simulation, the intensity which cause large displacement of boulder due to the upthrow is approximately estimated to be $2g$ in terms of peak horizontal acceleration, 150 to 200 cm/s in terms of peak horizontal velocity and $1g$ in terms of peak vertical acceleration. These values are consistent with those of the previously observed strong-motion records in near-field.

§ 1. はじめに

厳しい安全性を要求される重要構造物の耐震設計の際には建設敷地近傍に震源を持つ地震が想定される場合があり、そのため震源域での地震動の強さを推定することが耐震工学上要求されている。しかしながら、現在までに震源域で得られた強震記録は数少なく、震源域での地震動の特性について不明な点が多い。従来より大地震の被災地域での地震動強さを推定するため、被害状況の調査が行われてきた。これらの調査の結果には非常に大きな地震動の強さを示唆するものが含まれている。例えば、1897 年アッサム地震では、石が、ドラムを叩いた時にその上に置かれた豆粒が跳ね上がるような挙動を示したと [RICHTER (1958)] が、1906 年サンフランシスコ

地震では複数の石のブロックからなる記念碑がほぼ原形のまま反転したこと [LAWSON (1908)] が、1943 年鳥取地震や 1948 年福井地震では、神社の狛犬や墓石が投げ飛ばされたこと [松沢 (1944), 末広・他 (1948)] が、1949 年今市地震では地面に置いてあった石臼が何度も飛び跳ねたこと [KAWASUMI (1950)] が、1971 年サンフェルナンド地震では消防自動車タイヤの跡を残さずに水平に移動したこと [MORRILL (1971)] が、それぞれ報告されている。

また、1984 年長野県西部地震では、土中に半ば埋もれていた石や倒木が飛び上がり最大で $2m$ 程度水平に移動したことが調査されている [伊藤・他 (1985), 黒磯・他 (1985)]。この調査は地震直後に綿密に行われたもので、調査結果の信頼性は従来の物体の跳躍現象の報告に比べてかなり高いものと考えられる。この現象から、石の移動距離に必要な石の初速度が地動の速度振幅

昭和 63 年 4 月 7 日発表

* 〒227 横浜市緑区長津田町 4259

** 現所属: 熊本県庁

に相当すると仮定して、地動の強さを見積ると、地動の周波数が 8~10 Hz の場合には 30g 程度という非常に大きな加速度が得られる [梅田・他 (1986)].

一方, NEWMARK (1973) は、地震による物体の跳躍現象は物体と地盤とで構成される振動系の地震応答加速度が重力加速度を上回れば生じ、必ずしも地動の鉛直加速度が重力加速度を上回った証拠とはならないことを指摘している. BOLT and HANSEN (1977) は、より具体的な振動モデルを用いて NEWMARK と同様の結論を得ている. PSYCHARIS and JENNINGS (1985) も、剛体と地盤の動的相互作用を考慮した数値解析を行い、水平動の入力のみで剛体の跳躍現象が生ずることを示している.

筆者らも、彼らの考えにならって石の跳躍現象は地盤と石の動的相互作用によって生じたものと考え、1g をやや上回る程度の水平加速度で石の跳躍現象が生じうる

Fig. 1. Areas where remarkable dislodgements of boulders and fallen-trees were observed, after Iro *et al.* (1985) and Iro and SAEKI (1987). Slight dislodgements of boulders were found also in the area enclosed by dotted line, after Iro *et al.* (1985).

ことを簡単な模型実験および数値実験により示した [大町・他 (1987)]. しかし、この模型実験や数値実験での条件は現地の石の条件を再現したものではないため、石の跳躍現象が生ずるためにはそれ程大きな加速度は必要としないという可能性を示すだけにとどまっている. 本研究では、現地での石の振動特性および地盤性状の調査に基づいて、石と地盤をモデル化し、石の跳躍現象の数値実験を行い、石の跳躍現象のみられた地点での地震動の強さを推定することを試みた.

§ 2. 跳躍現象を示した石の振動特性とその地点での地盤性状

伊藤・他 (1985), 飯尾・佐伯 (1987) によれば, 1984 年長野県西部地震で顕著な石の跳躍現象がみられた地域は Fig. 1 の I, F, C および N 地点で、推定断層 [山科・多田 (1985)] から 500 m 程度離れたところに位置する. 地盤と石の動的相互作用の影響を確認するため、現地で石の振動性状および地盤の性状を調査した.

I, F および C 地点で、跳躍したことが確認できた計 7 ケの石の振動特性を常時微動を利用して測定した. これらの石は Table 1 に示すように外寸法で数十 cm ないし 1 m 程度の大きさを持つ、大きな移動が確認されている石はこの程度の大きさを持つものが多く [伊藤・他 (1985), 梅田 (1986)]. 測定した石が大きな移動を示した石を代表するものと考えても大きな誤りはないものと考えられる. これらの石の上および付近の地盤上の 2 点に地震計を設置し、常時微動を同時測定した. そのスペクトルの一例を Fig. 2 に示す. 石の上のスペクトルには、地盤上のそれにみられない大きなピークが、水平動成分では周期 0.1 秒付近に、上下動成分では周期 0.04 秒付近に、それぞれみられる. このようなピークは調査したすべての石に認められ、その周期は水平動成分で 0.1 秒前後、上下動成分で 0.03 秒程度である (Table 1 参照). これらの周期付近では、石の動きは地盤の動きに比べ大き

Table 1. List of boulders on which microtremors were measured. Location of sites C, F and I are shown in Fig. 1.

Site	Size of boulder (cm)	Horizontal displacement by jumping (m)	Predominant period of microtremors (s)	
			Horizontal	Vertical
C	70×70×35	1.8	0.08	—
	68×30×40	2.5	0.05	0.03
	72×64×93	3.0	0.11 0.06	—
	80×55×70	0.8	0.11 0.07	0.04
F	120×70×60	0.7	0.07 0.05	0.03
	100×90×45	0.4	0.04	0.02
I	80×50×40	0.9	0.06 0.04	0.03

Fig. 2. Fourier spectra of microtremors on boulder (a) and on ground (b).

く増幅され、地盤の動きとは異なるものと考えられる。

これらの地点での地盤性状を知るために、平坦な所が比較的広く確保できるC地点で板叩き法によりS波速度の測定を行った。測線長は10 mで、2 m 間隔に地震計を配置した。この地点では、薄い腐食土の下にローム層が存在し、地表から数十 cm 以深では礫まじりとなる。測定結果から推定されたS波速度構造を Fig. 3 に示す。ごく表層でのS波速度は50 m/s程度で、深くなるにつれて、100 m/s から160 m/s の値を示し、地表近くの地盤はかなり軟弱であることがわかる。このことは、前述の石の振動性状が石と軟弱な地盤の振動系の動的相互作用によることを支持している。

§ 3. 個別要素法による石と地盤のモデル化

個別要素法 [CUNDALL (1974)] は、有限要素法など他

Fig. 3. S-profile at site C shown in Fig. 1.

Fig. 4. Model used in simulation by Distinct Element Method. (a) Elements at contact point. (b) Model for boulder and ground.

の解析手法では表現が困難な不連続により生ずる大きな変位を表現することが可能であるため、この手法により石の跳躍のシミュレーションを行うこととした。まず、物体をそれぞれ剛な要素に置き換え、接触点においてのみ両者の力の伝達を考える。接触点での力の伝達は接触面に対して法線および接線の2方向に分解して考える。法線方向については弾性バネ、粘性ダッシュポットを、接線方向については弾性バネ、粘性ダッシュポットおよび摩擦によるスライダーを介して行われる (Fig. 4(a) 参

Fig. 5. Fourier spectra of impulse response of the model.

照). 両者の間に引張力が生ずる場合には、換触点は離れ、両者の間で力の伝達が行われない。この振動モデルに対して、各時刻における運動方程式を逐次解くことにより、個々の物体の挙動の時刻歴が得られる。

石の跳躍のシミュレーションのために、Fig. 4(b)に示した石と地盤の単純な2次元モデルを用いた。大きな移動距離を示した石を代表するものとして、石は半径35 cmの円形要素とし、地盤は台形の穴を有する要素とし、石と地盤の接触状況を3点の接触点で代表させるモデルを考えた。3点の内、1点は台形の穴の最下部で、他の2点は穴の側方部で接触する。以下、穴の最下部から側方部の接触点までの高さを接触点高さと呼ぶ。このモデルにより、円形要素には水平および上下方向の並進運動と回転運動が生ずる。

要素間の接触点に導入したバネのバネ定数については、実測された石の固有周期を満足するように定めた。すなわち、地盤に微小な単位衝撃を与え、円形要素の上部の応答波形のスペクトルのピークの周期が常時微動により実測された値と一致するように、バネ定数を試行錯誤的に求めた。なお、跳躍後の石の状態は跳躍前と異なり、地盤の上に多少めり込んだ状態であったので、常時微動のシミュレーションではモデルの接触点高さを3 cmとし、後述する石の跳躍のシミュレーションの場合とは異なる接触点高さを用いた。

Fig. 5に、接触面に対して法線方向のバネ定数 K_n および接線方向のバネ定数 K_t をそれぞれ $8.7 \times 10^6 \text{ N/m}$

Table 2. List of parameters used for analysis.

Stiffness of spring (normal direction)	$8.7 \times 10^6 \text{ N/m}$
Stiffness of spring (transverse direction)	$1.0 \times 10^4 \text{ N/m}$
Damping ratio	5.0 %
Friction coefficient	0.8
Radius of circle element	35 cm
Density of circle element	2.45 t/m^3
Time step in calculation	$5.0 \times 10^{-5} \text{ s}$

および $1.0 \times 10^4 \text{ N/m}$ に、ダッシュポットの減衰定数を5%にしたときの微小な単位衝撃に対する応答波形のスペクトルを示す。Fig. 2に示した石の上部での常時微動のスペクトルと、ピークやその形状がよく一致している。これらのバネ定数の値は、地盤のS波速度を100 m/s、比重を1.6、ポアソン比を0.5として計算された地盤の静的な水平および鉛直バネ定数[田治見(1968)]の値とおおむねよく対応し、現場で得られた地盤の物理定数とも調和的である。摩擦係数については現場での値は推定が困難であるので、摩擦係数をいくつか変えてシミュレーションを行ったところ、摩擦係数の違いによって結果はほとんど変化しなかった。以後、摩擦係数として0.8の値を用いた。Table 2にシミュレーションの際に用いた各パラメータの値をまとめて示す。

§ 4. 個別要素法による石の跳躍現象の数値実験

前章で述べた石と地盤の2次元モデルを用いて、石の跳躍現象の数値実験を行った。この際、残された石の穴の形状を参考にして、接触点高さを10 cm、穴の深さを12 cmとした。このときの円形要素の微小振幅時の固有周期は水平0.07秒、上下0.05秒となる。まず、地盤入力として震源域で観測された既往の強震記録を用いた。用いた記録はTable 3に示したカリフォルニアで発生した3つの地震の4組11成分で、それぞれの主要動部分5~10秒間のデータを用いた。それぞれの強震記録をそのまま入力しても、円形要素が穴から跳び出すまでには至らなかった。簡単のため強震記録の振幅を水平・上下両成分とも同じ倍率をかけて拡大し、円形要素が穴から跳び出すまで、その倍率を徐々に大きくすることとした。なお、ここで用いたモデルは、実際に大きな移動を示した石を再現するように定められたものではあるが、実際の石および周辺地盤の3次元的に複雑な形状や大振幅時の地盤定数の非線形的性質を考えると、あくまでも第一近似的なものである。したがって、計算された石の移動距離が大きな意味を持つとは考え難いので、ここでは石が穴から完全に飛び出すために必要な数十cm

Table 3. List of strong-motion data used.

Earthquake	Station	Comp.	Original record		Amplified motion*	
			Peak acc. (g)	Amp.	Peak acc. (g)	Peak vel. (cm/s)
1971 San Fernand (M6.6, dip slip)	Pacoima Dam	N344°E up	1.17	2	2.3	130
			0.71		1.4	120
1979 Coyote Lake (M5.8, strike slip)	Gilroy array #6	N320°E up	0.32	6	1.9	170
			0.15		0.9	110
		N230°E up	0.42	5.5	2.3	250
			0.15		0.8	99
1984 Morgan Hill (M6.0, strike slip)	Coyote Lake Dam	N285°E up	1.30	2	2.6	150
			0.40		0.8	30
		N195°E up	0.71	3.5	2.5	200
			0.40		1.4	54
	Anderson Dam	N250°E up	0.42	5	2.1	130
			0.21		1.0	50
		N340°E up	0.29	5	1.4	140
			0.21		1.0	50

* Original record is amplified so that remarkable dislodgement of boulder occurs in simulation.

Fig. 6. Input ground motion (upper part) and the response of boulder (lower part).

以上の移動距離が生ずれば、実際の現象を再現できたと考えた。

一例として、1984年モーガンヒル地震のアンダーソンダムで得られた強震記録の水平・上下成分の振幅をそれぞれ5倍して地盤要素に入力した場合の、地盤要素および円形要素中心点の加速度波形をFig. 6に、跳躍前後の円形要素の挙動をFig. 7に、それぞれ示す。円形要素中心点の上下動成分の加速度波形において $-1g$ でフラットになっている部分は、円形要素が地盤要素から離れて自由落下している状態を示している。円形要素は4秒付近の時刻から地盤要素と大きな衝突を起こし始め、地盤要素の水平成分の加速度が最大となる5秒付近で大きく跳躍し、約0.3秒後に穴の外に着地している。地盤の最大加速度が $1.5g$ 程度であるのに対して、跳躍時の円形要素の応答は水平および上下方向ともに $10g$ を越え、地盤の動きに比べて円形要素の応答は10倍程度にまで達している。円形要素が大きく跳躍するまでに、円形要素と地盤には小さな衝突が何度か生じているものの、大きな衝突は跳躍前の約1秒間に起きた数回に限られており、石は穴からすっぱり抜け出たという現場の状況からの推測〔黒磯・他(1985)〕とも矛盾はない。

他の記録を入力とした数値実験も行った結果、円形要素が数十cm以上の移動距離を示すために必要な地盤要素の最大加速度および速度としてTable 3の右の欄に示す値が得られた。これらの値は、水平成分で $1.4\sim 2.6g$,

Fig. 7. Behavior of boulder due to the input motion shown in Fig. 6.

Fig. 8. Fourier acceleration spectra of ground motions which cause remarkable dislodgement of boulder.

130~250 cm/s, 鉛直成分で 0.8~1.4 g, 30~120 cm/s である。これらの入力波形の水平成分のフーリエ加速度スペクトルを Fig. 8 に示す。最大振幅と同様、スペクトル振幅にも記録毎にばらつきがみられるが、周期 0.5 秒付近で各スペクトル振幅のばらつきが比較的小さく、フーリエ振幅で 300~500 cm/s の値を示している。これらは、このモデルの跳躍現象に周期依存性があることを示唆するものと考えられる。そこで、各々の周期を持

Fig. 9. Variation of horizontal displacement of boulder due to sinusoidal input motions with different period and amplitude in the horizontal component. The amplitude of the vertical is fixed at 1 g, and the period of the vertical is same as that of the horizontal.

つ正弦波を入力とした数値実験を行った。

正弦波を水平・上下両成分に同一周期・同位相で地盤要素に入力し、入力の振幅および周期による移動距離の変化を調べた。なお、計算は 2 秒間で打ち切った。一例として、Fig. 9 に、上下成分の加速度を 1 g とし、水平成分の加速度を 0.5 g から 2 g まで変えた場合の円形要素の水平移動距離を示す。水平成分の加速度が 0.5 g の場合には大きな移動を示さない。水平成分の加速度が 1 g を越えても、周期が 0.2 秒以下では移動しないが、周期が 0.3 秒以上になると大きな移動を示し始め、移動距離は 1 秒付近までは周期とともに増大する傾向を示す。他の場合の正弦波入力についても計算を行った結果、

- 1) 円形要素が大きな移動距離を示すためには、入力加速度は水平成分で 1 g 以上、上下成分で 1 g 程度が必要で、その周期は 0.3~1 秒程度であることが必要なこと、
- 2) 移動距離は、上下成分の加速度の大きさにはあまり影響されないが、水平成分の大きさには大きく影響されることが、わかった。

結局、実際の強震記録および正弦波を入力としたシミュレーション結果から、この石が穴から大きく飛び出

すためには、1) 上下成分については最大加速度で $1g$ 程度の強さが、2) 水平成分については、最大加速度で $2g$ 前後、最大速度で $150\sim 200\text{ cm/s}$ 程度の強さが、必要であると考えられる。

§ 5. 震源域の地震動強さ

現在までに震源域での地動の観測例は数多いわけではないが、1971年サンフェルナンド地震 ($M_s=6.6$) のパコイマダムの例 [TRIFUNAC and HUDSON (1971)] をはじめいくつかの場合 [BRADY and SHAKAL (1985), HARTZELL (1980), PORCELLA *et al.* (1982), SIMONS (1980)] で $1g$ を越える地動の加速度が観測されている。地動速度については、 100 cm/s を越える値が震源域で観測されている [翠川 (1987)]。長野県西部地震の震源域での観測記録は得られていないが、震源域においてすべりとんだ墓石から最大加速度で $1g$ 、最大速度で 200 cm/s の地動強さが、余震記録の合成から断層から 2 km 程度離れた岩盤上で最大加速度で $2g$ 、最大速度で 80 cm/s 程度の地動強さが、それぞれ推定されている [村松 (1986), 村松・他 (1985)]。また、既往の強震記録の統計解析から得られた JOYNER and BOORE (1981) による距離減衰式を用いて、 $M 6.8$ で距離が 0.5 km の場合の最大加速度および最大速度を求めてみると、それぞれ $0.62g$ および 110 cm/s (硬質地盤の場合) ないし 160 cm/s (軟弱地盤の場合) の値が得られる。さらに、統計解析から得られた経験式に震源の大きさと破壊の伝搬の効果を考慮した計算を行うと、 150 cm/s 程度の値が得られる [翠川 (1987)]。

これらの観測値や推定値に比べると、前述の石が穴から大きく飛び出すために必要な地震動の強さはやや大きい。しかし、石の跳躍現象がみられた地点は、地形による地震動の増幅が期待される尾根上にあること [梅田・他 (1986)] を考慮すると、既往の結果に比べてやや大きな値が得られても説明は可能である。これらのことから、前述の最大加速度で $2g$ 前後、最大速度で $150\sim 200\text{ cm/s}$ 程度という値は既往の観測例とも調和的な値と考えられる。前述のように、梅田・他 (1986) は地震動の周期によっては非常に大きな加速度を想定しているが、結局、長野県西部地震の震源域での地震動の強さが他の地震と比べて格段に大きかったとは考えなくてよいことになる。

§ 6. 結 論

長野県西部地震の際に土中に半ば埋もれていた石や倒木が跳躍した現象について、石と地盤の動的な相互作用を考慮した数値実験を行い、以下の結論を得た。

1) 現場での常時微動の測定から、石と地盤の動的相互作用により、地震時の地盤の動きと石の動きは異なりうることを確認した。

2) 石の跳躍現象をシミュレーションするため、個別要素法により石と地盤のモデル化を行い、現地での石の常時微動や地盤の S 波速度の測定結果を満足するモデルを得ることができた。

3) このモデルに対して、実地震動および正弦波を入力して、石の跳躍現象の数値実験を行い、地盤の動きに比べ石の応答は 10 倍程度増幅される場合があることを示した。

4) この数値計算より、石が穴から大きく飛び出すためには、水平成分については、最大加速度で $2g$ 前後、最大速度で $150\sim 200\text{ cm/s}$ 程度、上下成分については最大加速度で $1g$ 程度の強さの地震動が必要であることがわかった。

5) 上述の地震動の強さは既往の震源域での観測例と調和的で、長野県西部地震の震源域での地震動の強さが他の地震と比べて格段に大きかったと考える必要はない。

謝 辞

現地調査に際し、京都大学飯尾能久氏のご協力を頂いた。また、同黒磯章夫氏、梅田康弘氏、伊藤潔氏からは貴重なご意見を頂いた。記して謝意を表する次第である。

文 献

- BOLT, B. A. and R. A. HANSEN, 1977, The upthrow of objects in earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **67**, 1415-1427.
- BRADY, A. G. and A. F. SHAKAL, 1985, The Morgan Hill earthquake of April 24, 1984-strong-motion records, *Earthquake Spectra*, **1**, 419-443.
- CUNDALL, P. A., 1974, Rational design of tunnel supports: A computer model for rock mass behavior using interactive graphics for the input and output of geometrical data, Technical Report, Department of the Army Contract No. DACW 45-74-C-0066, Missouri River Division, U.S. Army Corps of Engineers, 192.
- HARTZELL, S., 1980, Faulting process of the May 17, 1976 Gazli, USSR, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **70**, 1715-1736.
- 飯尾能久・佐伯龍男, 1987, 長野県西部地震により石が動いた領域, 地震学会講演予稿集, No. 2, 65.
- 伊藤 潔・飯尾能久・黒磯章夫・梅田康弘・村松郁米, 1985, 1984年長野県西部地震で加速度が $1g$ を越えた領域の調査, 1984年長野県西部地震の地震および災害の総合的調査 (研究代表者: 飯田波事), 89-96.

- JOYNER, W. B. and D. M. BOORE, 1981, Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **71**, 2011-2038.
- KAWASUMI, H., 1950, The Imaichi earthquake of December 26 th, 1949, general description, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **28**, 355-367.
- 黒磯章夫・伊藤 潔・飯尾能久・梅田康弘・村松郁栄, 1985, 1984 年長野県西部地震の地変および大加速度域の調査, 京都大学防災研究所年報, **28 B-1**, 1-14.
- LAWSON, A. C. (editor), 1908, *Isoseismals: Distribution of apparent intensity*, The California Earthquake of April 18, 1906: Report of the State Earthquake Investigation Commission, 160-350.
- 松沢武雄, 1944, 鳥取大地震の時の狛犬の運動, 東京帝国大学地震研究所彙報, **22**, 60-65.
- 翠川三郎, 1987, 関東平野での地盤の増幅度と震度分布予測, 関東平野直下の地震活動及び地震動予測についての基礎的研究 (研究代表者: 宇佐美龍夫), 187-196.
- MORRILL, B. J., 1971, Evidence of recorded vertical accelerations at Kagel Cayon during the earthquake, U.S. Geological Survey Professional Paper 733, 177-181.
- 村松郁栄, 1986, 地震動と被害, まさか王滝に!—長野県西部地震の記録—, 長野県木曽郡王滝村, 167-191.
- 村松郁栄・大沼啓人・北村定治, 1985, 震源域付近の岩盤上における本震地震動の推定—1984 年長野県西部地震について—, 1984 年長野県西部地震の地震および災害の総合的調査 (研究代表者: 飯田汲事), 97-100.
- NEWMARK, N. W., 1973, Interpretation of apparent upthrow of objects in earthquakes, *Proc. of the Fifth World Conf. on Earthq. Eng.*, Paper No. 294.
- 大町達夫・荒井靖博・竹田尚史, 1987, 地震による半埋没物体の跳躍について, 構造工学論文集, **33A**, 595-606.
- PORCELLA, R. L., R. B. Matthiesen and R. P. Maley, 1982, Strong-motion data in the United States, U.S. Geological Survey Professional Paper 1254, 289-318.
- PSYCHARIS, I. N. and P. C. JENNINGS, 1985, Upthrow of objects due to horizontal impulse excitation, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **75**, 543-561.
- RICHTER, C. F., 1958, Oldham and the 1897 Earthquake, *Elementary Seismology*, W. H. Freeman and Company, Inc., 49-56.
- SIMONS, R. S., 1980, The strong motion record from station Victoria, Report on the Mexicali Valley earthquake of 9 June 1980, Univ. of Calif., San Diego, 5-7.
- 末広重二・久本壮一・田中康裕, 1948, 福井地震踏査報告 (1), 昭和 23 年 6 月 28 日福井地震調査概報, 中央气象台, 22-37.
- 田治見宏, 1968, 地盤のばね定数, 建築構造学大系「地震工学」, 彰国社, 66-79.
- TRIFUNAC, M. D. and D. E. HUDSON, 1971, Analysis of the Pacoima Dam accelerogram—San Fernando, California, earthquake of 1971, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **61**, 1393-1411.
- 梅田康弘・黒磯章夫・伊藤 潔・飯尾能久・佐伯龍男, 1986, 1984 年長野県西部地震による震央付近の大加速度, 地震 2, **39**, 217-228.
- 山科健一郎・多田 堯, 1985, 1984 年長野県西部地震の断層モデル——三角点測量データの解析, 東京大学地震研究所彙報, **60**, 221-230.