

墓石・木造建物被害等による震度に関する若干の検討

SOME INVESTIGATIONS ON THE SEISMIC INTENSITY SUPPOSED
FROM OVERTURNING OF GRAVESTONES, DAMAGES OF WOODEN
HOUSES AND OTHERS

宮 野 道 雄*

By Michio MIYANO

1. ま え が き

強震計による地震観測は、いうまでもなくその設置地点の地震動加速度を知る手段としては最も確かなものであり、地震工学上、貴重な記録が少なからず得られている。最近では、1966 年松代群発地震 (M 5.4, 保科観測点: 602 gal), 1966 年 Parkfield 地震 (M 5.6, 480 gal), 1971 年 San Fernando 地震 (M 6.6, Pacoima Dam Site: 1148 gal), 1979 年 Imperial Valley 地震 (M_L 6.4: 770 gal <上下: 1490 gal>) など¹⁾ 震央近傍の記録も得られつつある。しかしながら、被害地震の歴史およびその地域分布からみれば、これらの記録はごく限られたものであり、大地震における激震地の記録は特に少ない。

一方、既往の地震によって激震地に生じた現象に関する記録は、少なからず残されている。大森²⁾、物部³⁾ はそれぞれ 1891 年濃尾地震、1923 年関東大地震における木造建物の全壊率 P と墓石など単体 (柱状体) の転倒による推定加速度 (合震度 \bar{K}) の間の関係を量的に示した。以来、1948 年福井地震⁴⁾ などいくつかの地震において上記の関係が求められている。また、被災地における被害、地変その他の諸現象から総合的に震度分布を評価する研究も続けられている^{5)~7)} など。ただし、この場合の震度は、いわゆる気象庁その他の震度階であることが多い。

さらに、最近岩崎ほか^{8), 9)} は、墓石の転倒率 (その転倒プロセスは問わない) と震央距離の関係と、観測地震動の平均的な最大加速度と震央距離の関係 (総プロの耐震技術研究開発による下記式 (1)) の 2 つを結びつけ墓石転倒率から、その地点に作用したであろう加速度の推定を試みている。ただし、式 (1) によれば、たとえば $M=6$, $d=0$ で $A_{\max}=286$ gal にしかならず、上記観

測事例などに比べきわめて小さな値を与え、また $M=7$, $d=0$ では $A_{\max}=581$ gal で M による差異は過大と思われ、さらにいえば $M=7$ でさえ過小評価の側にあるといえそうである (上記観測事例ならびに文献 1), 10) などからみて)。

$$A_{\max}=34.1 \times 10^{0.308M} \times (d+10)^{-0.925} \dots (1)$$

ただし、

A_{\max} : 最大加速度

M : マグニチュード (=7.0)

d : 震央距離

ところで著者らはすでに、その基本においては大森、物部の考え方を関東大地震に適用し、より妥当な $P-K$ (水平震度) 関係の経験式を提案した^{11), 12)}。本論文の目的は、この手法を既往のいくつかの大地震ならびに中地震の資料に用い、最適な $P-K$ 関係を求めるとともに、得られた K が実際に作用したであろう地震動加速度といかなる量的関係をもつかを検討することにある。すなわち、わが国においては、被害地震の特に激震地における地震動の強さの分布をある程度量的に推測し得る資料としては、この P と K しか存在しないといっても過言ではない。ゆえに、地震の規模、型により、 $P-K$ 関係がどのような特性をもつかをまずとらえ、 K の推定論拠となっている墓石 (柱状体) の地震時挙動を解析することにより、 K をより工学的に評価することはきわめて重要な課題である。

そのためのプロセスとして、まず West の公式による震度と墓石転倒率の関係を求め、かつ上記岩崎ほかの手法による結果を検討している。また、いくつかの地震における墓石転倒による震度と木造建物全壊率の関係の再検討を行うこと、あるいは経験式を求め、地震規模と上記の関係についての考察を加えることを行っている。さらに、望月ほか¹³⁾の単体の地震時運動理論を参照し、強震記録波を入力したときの単体の動的臨界転倒加速度と実測最大加速度の対応性を検討している。表ほか¹⁴⁾は

* 正会員 工修 東京都立大学工学部研究生

震央近傍の墓石の転倒による推定加速度は、実際に作用した加速度の電気工学の分野でいうところの実効値程度に相当すると報告しているが、それは加速度が静力学的にみても転倒するはずの墓石の寸法比より大きくても短周期地動の場合には墓石は転倒しないからである。ゆえに、本論文では理論応答計算により、上記表ほかの結果を証明するとともに、より広い加速度範囲にわたり、両者の対応性を明らかにしようとする。したがって、地震波の周波数特性の上記の対応性に及ぼす効果についても検討を加えており、結論として、墓石による推定加速度を実地動の最大加速度に変換するための近似実験式を提案している。

2. 墓石転倒による震度と転倒率の関係

現在、墓石調査から震度 K (加速度) を推定する手法は、2つに大別されよう。その1つは、著者らも用いている古典的な West の公式を主としたものであり、もう1つは上記岩崎ほかの手法である。ここでは、1978年伊豆大島近海地震を主たる例として、West の公式による K と Q の関係を求め、その関係式の意義について考えるとともに、岩崎ほかの Q - A_{max} 関係について若干の見解を示す。

上記地震について著者らは、東伊豆町、河津町を中心に44地点で K (B/H , B : 墓石の奥行幅, H : 高さ, さらに加速度 \bar{A}_{max} はこの K に 980 gal を乗じた値) の推定と Q の実測を行った¹⁴⁾。ところで、この地震の断層については諸説があったが、長宗¹⁵⁾は稲取近傍(内陸部)に第2震源があり、そこから地震断層が北西部に延びていることを報告している。また、このことは地表でも少なからず確認されている^{14), 16)}。

図-1 は、著者らによる推定加速度 \bar{A}_{max} と、上記断層(内陸部)からの最短距離 X ・地形の関係である。相関係数 R は 0.56 と低いが、この距離範囲内でも若干の距離減衰は認められそうである。ただ、図上に記号で示してある地形と \bar{A}_{max} の相関性はあまり明確ではない。

図-2 は、著者らが調査した44地点の平均的な Q と K の関係であり(同程度の K を示す墓地の Q の平均値を求め、図上にプロットした)、次式で表わされる。

$$Q = \frac{100}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{hy} e^{-h^2 y^2} d(hy) \dots\dots\dots (2)$$

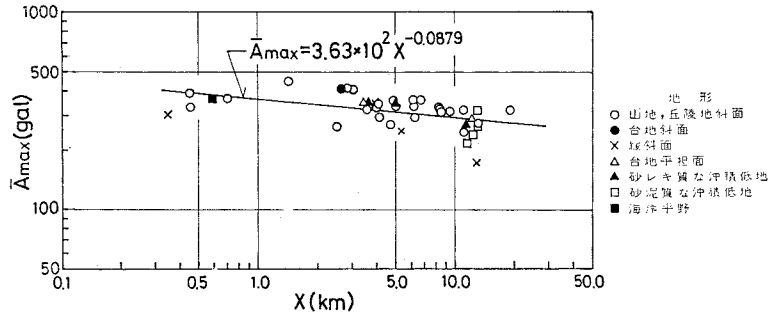


図-1 墓石調査 (West の公式) による推定加速度 \bar{A}_{max} と断層からの最短距離 X , 地形の関係 (1978年伊豆大島近海地震)

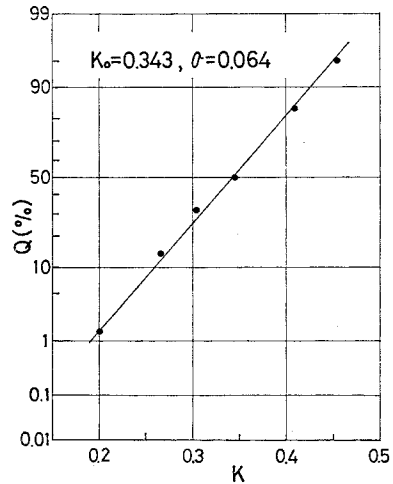


図-2 墓石転倒率 Q と震度 K の関係 (1978年伊豆大島近海地震)

ここに、 $y = K - K_0$ であり、 K_0 はいわば調査地域の墓石の平均的な転落、転倒に対する抵抗震度で、 $K_0 = 0.343$ と与えられる。ちなみに、この K_0 の値は、1962年宮城県北部地震では 0.303, 1975年大分県中部地震では 0.388, 1952年十勝沖地震では 0.355, 1978年宮城県沖地震(6月)では 0.320 と与えられる。なお、宮城県北部地震は佐藤ほかの資料¹⁷⁾を、十勝沖地震は福富ほかの資料¹⁸⁾を用いた。また、宮城県沖地震は国井ならびに著者らの資料¹⁹⁾による。 h は抵抗震度の一様さ(ばらつき)を示す係数で、標準偏差 σ との間に $\sigma = 1/(\sqrt{2}h)$ の関係がある。また、上記いずれの地震の場合とも式(2)で誤差の和 $\sum \epsilon$ を最小にするという条件で $K_0, h(\sigma)$ を決定した。ただし、本論文における K はいずれも West の公式による値である。

この関数表現は、物部が木造建物の全壊率 P と合震度の関係として提示しているが、著者がこの関係式をここで用いた理由は、墓石の落下に大きく寄与する摩擦係数などの分布も、墓石数が十分あり、かつそれらが種々の仕上げ、材質からなる場合、正規分布的な性質をもつ

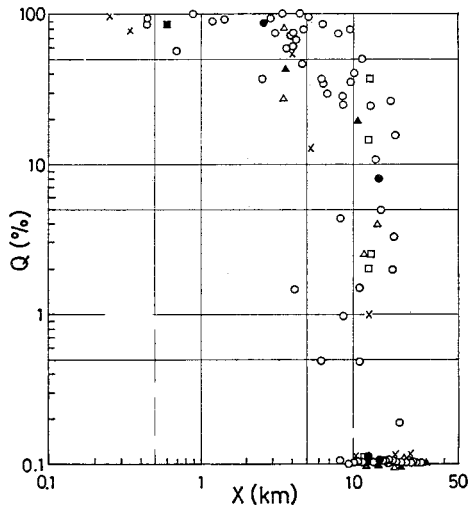


図-3 墓石転倒率 Q と断層からの最短距離 X の関係 (図中の記号は 図-1 に対応)

であろうと考えたからである (見掛け上転倒している墓石の多くは台石から落下したものと推測される)。そして、図-2 が示すように Q - K 関係は、正規確率紙上でほぼ直線により表わされる。このことは、前記の他の地震においてもほぼ同様であり、上記の仮定、すなわち式 (2) により Q - K 関係を表わすことの妥当性が裏づけられたと考えている。

図-3 は Q と X の関係であり、岩崎ほかの資料も用いている。ただし、余震により高い Q を示したと考えられる地点は除外してある。また、 $Q=0\%$ の資料は $Q=0.1\%$ の位置にプロットした。同図より、墓石転倒率 Q は、 X が 10 km あたりから急激に減ずることがわかる (図-1 でもその傾向はみられるが)。この 10 km 程度がいわば、corner distance といえそうであり、図-1 と各地の強震計による最大加速度 $\bar{A}_{max}^{(20)}$ を同一

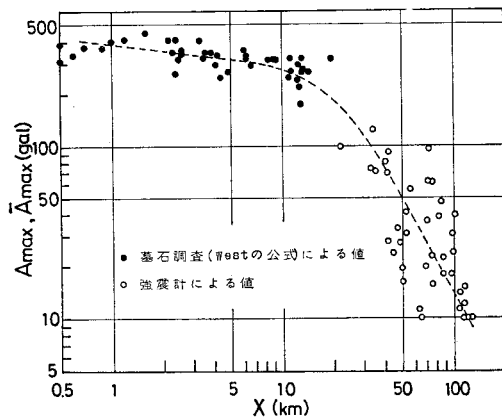


図-4 断層からの最短距離 X と墓石による最大加速度 \bar{A}_{max} 、強震計による最大加速度 \bar{A}_{max} の関係

紙上に示したものが 図-4 である。墓石の落下あるいは転倒は、ある加速度以下ではまったく生じなくなるから、図-3 は 図-4 に比べ勾配ははるかに急であるが、両図の傾向はよく似ており、最大加速度の距離減衰の特性 (corner distance の存在など) を推測させる。なお、図-4 のような最大加速度の距離減衰の特性は特異なものではなく、定性的には Blume²¹⁾ などの実験式、あるいは小林ほか²²⁾ の半実験式とよく似ており、むしろ一般に認められつつある傾向と思われる。ただし、墓石による \bar{A}_{max} は恐らく全体的に過小評価であろう。

ところで、岩崎ほかは前記した手法で、 Q と最大加速度の関係を式 (3) で表現している。

$$\bar{A}_{max} = 2.67 Q + 200 \dots\dots\dots (3)$$

式の型が式 (2) とは異なるため、全区間にわたりよく合うとはいえないが、たとえば $Q=1\% \sim 95\%$ といったおもな範囲内の式 (2), (3) の K または \bar{A}_{max} の差異はごくわずかである (式 (2) の内容については 図-2 参照)。

このことは、岩崎ほか、 Q と著者がその問題点を指摘したところの式 (1) とを結合しているとはいえ、その論拠に福富ほかの 1952 年十勝沖地震の Q - K 関係 (K の求め方は基本的には著者らと同じ) を用いている以上、ある程度当然といえるかもしれない。ただし、上述したように岩崎ほかの手法は、この地震のみにしていえば、著者の K - Q 関係とよく合っているが、より一般性をもって考えた場合、式 (1) を媒介としているために、少なくとも震央近傍における \bar{A}_{max} の評価 (この値を地震動最大加速度というなら) という点については、基本的な問題点を残しているといわざるを得ない。

一方、著者が上記に示したように、 K と Q の関係がかなりの近似度で関数化できれば、適切な転倒、不転倒墓石が選択できず、 Q のみしか実測し得ない場合 (上述のように地震時において、見掛け上転倒している墓石の多くは落下したものである) でもその地点におけるおおよその K は推定できるであろう。したがって、墓石調査においては B/H と Q の両方を調べるかまたは、少なくとも Q は必ず調べておく必要がある。さらに著者の手法によれば、1941 年長野地震、1968 年十勝沖地震など Q のみしか調査されていない地震の K も、比較的よく似た地震あるいは地域の Q - K 関係を用いれば、おおよその値とその分布は推定できるように思われる。

3. 墓石転倒による震度と木造建物全壊率の関係

墓石転倒調査によって推定される震度 K と木造建物の全壊率 P との関係を関数化すれば、墓石調査が行わ

れていなくとも P の資料が与えられている地区の大体の震度は推定できる。これを最初に実施したのは、前記したように物部である。墓石調査は、既往の被害地震で少なからず行われているが、個々の地震における調査地点数は一般に多くはない。

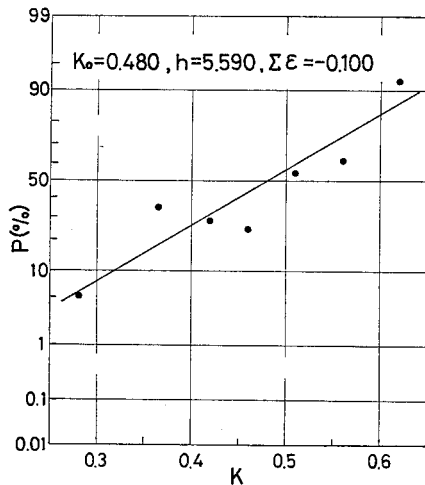
ここでは、1891年濃尾地震 ($M7.9$)、1923年関東大地震 ($M7.9$)、1948年福井地震 ($M7.3$)、1952年十勝沖地震 ($M8.1$)、1974年伊豆半島沖地震 ($M6.9$)、1975年大分県中部地震 ($M6.4$) の P - K 関係を示し、地震規模、型等の観点から P - K 関係の特性を考察する。

図-5(a)~(d)は、著者らが求めた4つの地震の P - K 関係である。関東大地震についてはすでに報告している¹¹⁾。また、濃尾地震については大森が調査し、物部の著書²³⁾にその関係が示されているが、墓石の詳細な資料は見出せなかった。なお、図の P - K 関係は関東大地震の場合と同様に同程度の K を示す地区の P を平均化

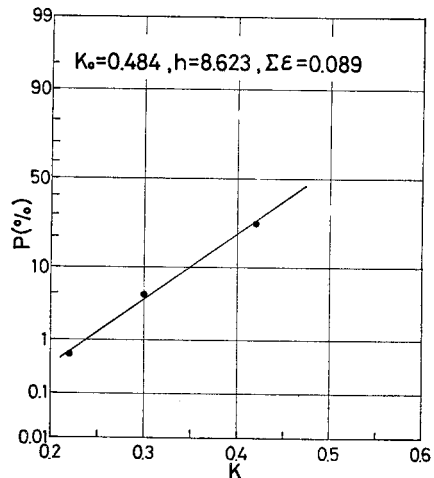
し、物部の関係式を用いて誤差の和 $\sum \epsilon$ を最小にする条件で K_0 と h を決定した。使用した資料は、福井地震の K については文献4)、Kawasumi²⁴⁾、Kishinouye-Ikegami²⁵⁾ ならびに末広ほか²⁶⁾によるものであり、 P は同じく文献4) によっている。また、十勝沖地震の K は前記福富ほかの資料、および P は北海道庁の資料²⁷⁾ に基づいている。伊豆半島沖地震の K は国井ほかの資料、大分県中部地震は著者らの調査資料によるが、 P も含め文献28) にその詳細は示されている。

以上の合計6個の地震の平均的な P - K 関係を同一紙上に示したものが図-6である。同図より、福井地震、十勝沖地震、関東大地震の P - K 関係はかなりよく似た傾向を示している。このことは、これら3つの地震の場合、平均的にみれば、同一震度(加速度)で木造建物はかなり近い全壊率を生じたことを意味する。

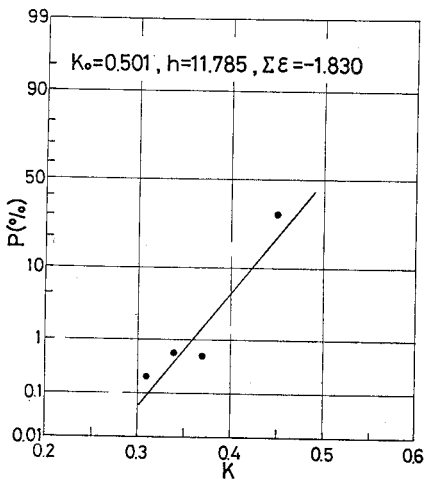
一方、中級の地震では上記大地震に比べ、同一震度で



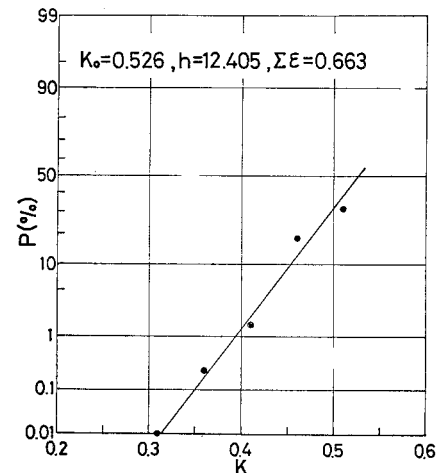
(a) 1948年 福井地震



(b) 1952年 十勝沖地震



(c) 1974年 伊豆半島沖地震



(d) 1975年 大分県中部地震

図-5 木造建物全壊率 P と震度 K の関係

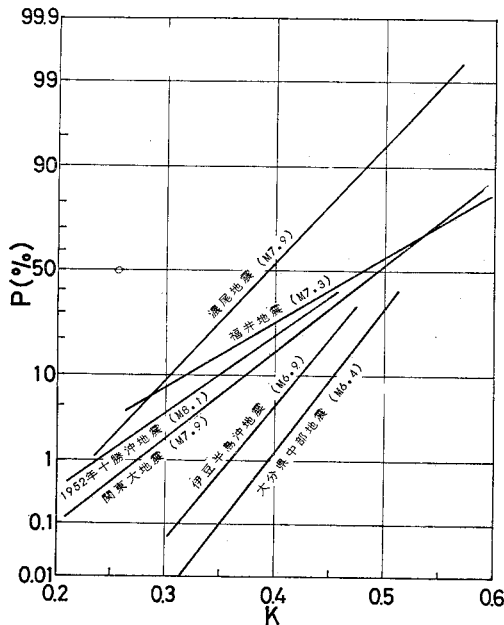


図-6 いくつかの地震における木造建物全壊率 P と震度 K の関係

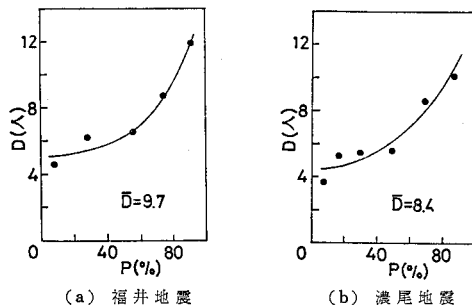


図-7 住家全壊率 P と住家全壊数 100 棟当たりの死者数 D の関係

は低い P の値しか示さない。そして、伊豆半島沖地震 $M6.9$ と大分県中部地震 $M6.4$ の差異は M の効果と考えられる。ところで、図-6 の全体的な傾向からみて、大森による濃尾地震の $P-K$ 関係はかなり特異であり、 K を相当に過小評価しているとの疑いを著者はもっている。

その傍証として十分とはいえないかもしれないが、次に示す被害事実は重要な参考資料にはなり得るであろう。ここに、図-7 (a)、図-7 (b) はそれぞれ、福井地震と濃尾地震の住家全壊率と震死者の関係を示したものである。

両図の死者数 D は住家全壊数 100 棟に対する平均的な値であり、算出に際しては延焼火災発生地区は除いてある。したがって、ここにいう死者の多くは圧死者と推定される。圧死者の発生は地震動の強さ等の特性と密接

に関係するはずである。すなわち、加速度が著しく大きく、住家等が一瞬にして倒壊すれば、圧死者は多発するであろう。そして、加速度が小さくなるに従い、建物の倒壊もより時間（地震波の繰返し波数）がかかるようになることは容易に推測される。したがって、倒壊住家 100 棟当たりといった、いわば normalize された死者数 D (人) も P が小さくなるほど減ずるはずである。その傾向は、両図に明瞭に現われており、しかも両地震の $D-P$ 関係は傾向のみならず、数値的にもきわめて近い。たとえば、 D の平均値 \bar{D} は濃尾地震の場合 8.4 人、福井地震では 9.7 人、また全壊率 80~90% 程度以上では、両者とも D は 12 人内外となっている (P が数% では 4 人強)。なお、地震の発生季節および時刻も D の値に大きく影響すると思われるが、濃尾地震は午前 6 時 38 分 (10 月 28 日)、また福井地震は午後 5 時 14 分 (夏時間、6 月 28 日) であり、発震時刻でいえば、むしろ前者の方が震死者の生じやすい条件下にあったともいえる。

このような震死者の発生率ならびに図-6 の福井地震を含む 3 つの大地震の $P-K$ 関係からみて、濃尾地震の K は過小評価であるように思われ、このことが、その後の関東大地震時の東京における水平震度が下町低地で 0.2、山手台地で 0.1 と当時推定され、中村²⁹⁾が墓石などの転倒から推測される震度が大き過ぎて信用できないとして、上下動と水平動が同程度作用したと仮定し、水平震度を大きく引き下げて考えたことの影響になったのではなかろうか。また、物部は $P-K$ 関係式を関東大地震に対し、ある幅をもたせて作成しているが、合震度と考え、水平、上下の区分を行っていない (合震度の $K_0 = 0.45 \sim 0.50$, $h = 7 \sim 10$)。これに対し、著者は本論文のすべての部分にわたり合震度は考えず、水平震度として扱っている。

上述のような推論が正しいとすれば、あるいは少なくとも濃尾地震を除く限り、図-6 により、福井地震 $M7.3$ 程度以上の規模の地震における墓石転倒による推定震度は、ほぼ同一の有効地震動の強さを与えるとみなせよう。さらに物部以来、合震度と木造建物全壊率の関係の地震による差異は、それぞれの地域における建物群の耐震性 (構造・工法の地域特性) によると解釈されてきたように思われる。しかしながら著者は地震動の差異、すなわち地震の規模等の効果、たとえば激震の継続時間、主要動の周期特性等によりそれを解釈する方が無理がないと考えている。すなわち図-6 によれば、あるマグニチュード以上での $P-K$ 関係は、若干の幅をもってみれば一定のように推測され (地域差はほとんど現われていないようにも思われるからである)、より小さい地震規模ではたとえその加速度 (震度) がかなり高くとも

P はさほど大きくなってはいない (P は地震動加速度のみでは定まらない, このことは他の構造物の場合でも同様であろう)。

そして, このような観点から P - K 関係の特性 (関係) を用いれば, 木造建物全壊率の資料 (これは比較的多くの地震についての記録がある) から, たとえば 1943 年鳥取地震 $M7.4$, 1944 年東南海地震 $M8.0$, 1946 年南海地震 $M8.1$ 等の震度 (加速度) を量的に推定することは, ある程度可能と考えられる (これらの地震の墓石調査資料はないか, あってもわずかである)。

4. 墓石転倒による推定加速度と強震計による最大加速度の比較

前記したように, 墓石調査による推定加速度と強震計による最大加速度を比較したものとしては表ほかの報告があり, そこでは震央近傍の大加速度値のみに着目している。

一方, ここでは, より広い加速度範囲にわたるいくつかの強震計の加速度記録波を入力したときの単体 (柱状体) の挙動 (転倒) を主として理論応答計算より調べ, 墓石転倒から推定される加速度が真に作用したであろう地震動加速度 (ここでは各地の強震計によって観測された最大加速度をいう) A_{\max} と, おおよそ, いかなる対応関係にあるかを検討する。

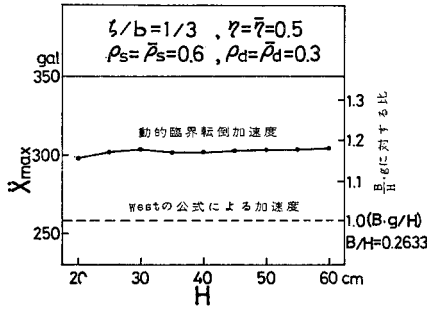
ところで, ある地点で実際に得られた最大加速度観測

値には, 地震の規模, 震源および path, site などの各特性も含まれているため, その値を変動させることは好ましくない。したがって, 原則的に B/H はその各地震波の最大加速度 (震度) に対応するように定めて計算している。入力に用いた強震計の記録の地震名, 発生日月, 規模 (マグニチュード), 最大加速度などをまとめて表-1 に示す。また, 表には上下動の最大加速度も示してあるが, 計算ではこれらの記録波もそのまま, 水平動のそれと同時に入力している。計算に用いた単体の高さは 20~60 cm と仮定したが, 一般に転倒墓石の調査の対象となるのは, その高さが 40~60 cm 程度のもが多い。このことは, 過去の地震における調査事例のうち, 寸法の記載されている資料からもそのようにみさせる。ちなみに, 大きな墓石は一般に多段の台石の上であり, その地動に対する挙動の複雑さから, たとえば文献 26) などのように過去においても対象から外されてきたようである。なお, 著者らは最近の地震において, 墓石に付属する花立てなど小さな寸法のもの (高さ 25~30 cm 程度のもが多い) を調査対象にすることも少なからず行っている。それは, 単体の動的挙動における scale effect, すなわち, より小さい単体ほど, その転倒に及ぼす入力の周期の効果が少ないと期待できるからである。このことは, 加速度が大きい場合, 後述する例でもみられるように, 特に大きな意味をもつ。なお, 応答計算においては, 入力の水平動最大加速度 \ddot{X}_{\max} を単体が転倒するいわゆる臨界転倒加速度になるよう調整してい

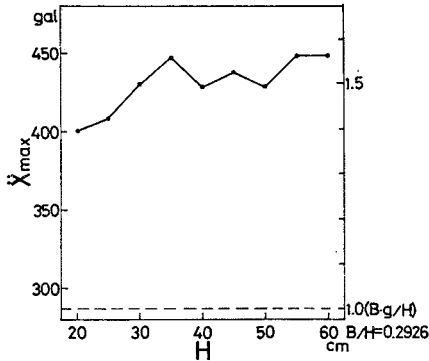
表-1 入力に用いた強震記録

地震名	発生日月	規模	地震波記録地点	成分および最大加速度 (gal)
1962 年 広尾沖	1962. 4.23	7.0	釧路港, 釧路市	1. N.S. 243.93 2. E.W. 372.75 UD. 220.75
1968 年 十勝沖	1968. 5.16	8.0	八戸港, 八戸市	3. N.S. 225.00 4. E.W. 182.90 UD. 119.20
1978 年 宮城県沖	1978. 6.12	7.4	東北大学建設系建物 1F, 仙台市	5. N.S. 258.02 6. E.W. 202.66 UD. 152.99
1978 年 宮城県沖	1978. 6.12	7.4	開北橋付近, 石巻市	7. L.G. 192.551 8. T.R. 286.787 UD. 116.176
1978 年 宮城県沖	1978. 6.12	7.4	塩釜工場, 塩釜市	9. N.S. 264.80 10. E.W. 272.80 UD. 166.10
1980 年 伊豆半島東方沖	1980. 6.29	6.7	修善寺, 静岡県	11. N.S. 79.248 12. E.W. 78.455 UD. 49.329
Imperial Valley	1940. 5.19	7.1	El Centro, Calif., U.S.A.	13. N.S. 341.70 14. E.W. 210.10 UD. 206.30
Kern County	1952. 7.21	7.7	Taft, Calif., U.S.A.	15. E.W. 154.715 UD. 102.90
Parkfield	1966. 6.28	6.4	Cholame, Station No. 2, Calif., U.S.A.	16. N65E 498.30 UD. 301.32
Koyna	1967.12.11	7.0	Koyna Dam, India	17. T.R. 463.283 UD. 307.436
Nicaragua	1972.12.23	6.2	Refineria ESSO, Managua, Nicaragua	18. N.S. 333.401 19. E.W. 375.194 UD. 319.519
Romania	1977. 3. 4	7.2	Building Research Institute, Bucuresti, Romania	20. N.S. 194.927 21. E.W. 163.087 UD. 105.763

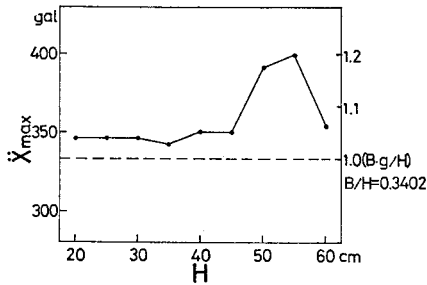
注) 上表中, 最右欄 No. 1~21 は 図-9 中の No. に対応する。



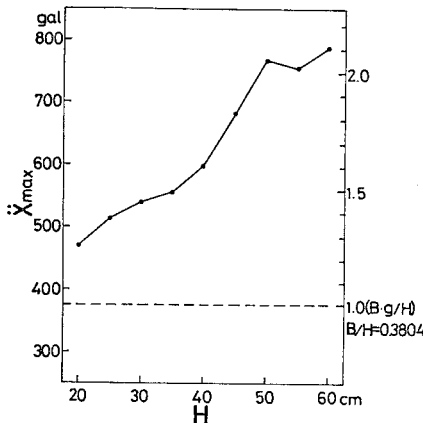
(a) 1978年宮城県沖地震, 東北大学 NS



(b) 1978年宮城県沖地震, 開北橋付近 TR



(c) 1972年 Nicaragua 地震, Managua



(d) 1962年広島湾沖地震, 釧路 EW

図-8 加速度記録波入力による単体の理論応答計算結果(動的臨界転倒加速度, 記号は文献9)参照)

る。すなわち, 表-1の加速度レベルを初期値とし, 10 gal 刻みで \ddot{X}_{max} を増加させ, 臨界転倒加速度を見出した。このとき, 上下動最大加速度 \ddot{Y}_{max} は表-1における $\ddot{Y}_{max}/\ddot{X}_{max}$ が変化しないように入力している。

単体の地震動に対する非線形動的挙動は複雑で, その挙動の類形化は大変困難であるが, それをあえて行えば図-8(a)~(d)に示すような事例によって代表される。(a)は1978年宮城県沖地震における東北大学の記録波(NS)に, (b)は同地震の開北橋付近(TR)の記録に, (c)は1972年Nicaragua地震におけるManagua(NS)の記録に, また(d)は1962年広島湾沖の地震の釧路港(EW)の記録にそれぞれ対する結果である。なお, いずれも上下動は記録波のそれを用いている。各図において, 実線がそれぞれの高さの単体の(応答)転倒加速度であり, 破線が静的手法, すなわちWestの公式による推定加速度である。そして, 各図とも実線が破線の上位にきており, その差異の程度が各図の右側の尺度により表わされている。また, 図-8(a)に計算に使用した単体の諸定数を示す。ここに, z は鉛直方向力積の衝突中心と重心の間の水平距離, b は単体の幅 B の $1/2$, $\rho_s, \bar{\rho}_s$ はそれぞれ単体と床の面接触および線接触時の静摩擦係数, また $\rho_d, \bar{\rho}_d$ は同じく動摩擦係数, $\eta, \bar{\eta}$ はそれぞれ単体と床の面衝突および線衝突時の反発係数を表わす。

これら4つの図の計算事例から, 地震により上記の差異がかなり異なること, また, scale effect が顕著な場合とそうでない場合が明瞭に読みとれる。すなわち, この寸法範囲の場合, (a)における動的臨界転倒加速度はほぼフラットで, scale effect はほとんどみられない。また(b)は, 全体的にかなりフラットな動的臨界転倒加速度を示すが, Westの公式による静的な推定加速度とのレベル差は大きい。さらに, (c), (d)にはかなり著しいscale effect がみられるが, その様相は両者で相当に異なる。すなわち, (c)は動的臨界転倒加速度が特定の単体の寸法で顕著な大きさを示すのに対し, (d)は寸法が大きくなるに従い, 動的臨界転倒加速度が増加する。このように, scale effect の現われ方に程度の差はあるが計算結果を大まかに分類すれば, だいたいこの4つに大別される。

たとえば, 表-1のうちKoyna Dam (TR)のそれは(b)に近く, Parkfield-Cholame (N 65 E)のそれは(d)によく似ている。さらに, (c)のタイプに近いものは, 釧路港(NS)などである。ただ, (a)のタイプが計算結果では最も多かった。それは, 地震波の最大加速度があまり大きくない場合, ならびに比較的優勢な長周期成分もまたある程度含まれているタイプであり, 後に示すレスポンス・スペクトルなどからみれば, このタイプがむしろより通常的な地震波といえそうである。

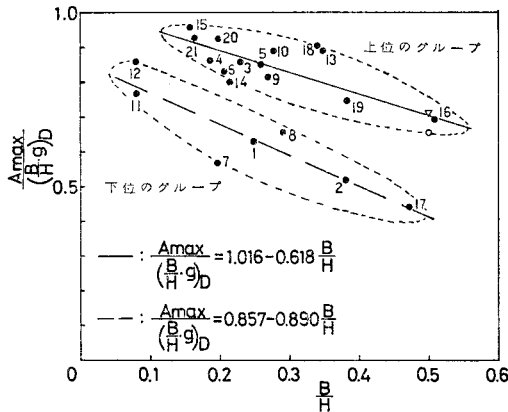


図-9 $\frac{A_{max}}{\left(\frac{B}{H} \cdot g\right)_D}$ と $\frac{B}{H}$ の関係

A_{max} は強震計の水平最大加速度 (表-1 の値).
 $\left(\frac{B}{H} \cdot g\right)_D$ は動的臨界転倒加速度で $H=40\sim 60$ cm の平均的な値.
 ▽, ○印は $B \times H = 24 \times 48$ cm (入力 $\ddot{Y}/\ddot{X}=0$) に対する八戸港 EW (表-1, No. 4), El Centro NS (No. 13) の実験結果, いずれも $A_{max}/g=0.5$ として入力 (鹿島技研).
 図中の No. は表-1 の最右欄の No. に対応する.

図-9 は、本論文で検討を行った全地震波について、強震計の示す最大加速度とそれに対する動的臨界転倒加速度の比と B/H の関係をプロットしたものである。なお、図では前記の理由から単体の高さは $40\sim 60$ cm とし動的臨界転倒加速度はそれらに対して得られた値の平均値を採用している。また、図中の No. は表-1 の最右欄の No. に対応している。同図の横軸を West の公式による震度 (B/H) とみなせば、最大加速度が大きくなるほど、この静的手法による値は過小評価となる傾向が顕著に認められる。さらに、計算結果は2つのグループに大別されよう。その1つは、ある程度長周期の成分もまた少なからず含まれている地震動の場合であり、図-

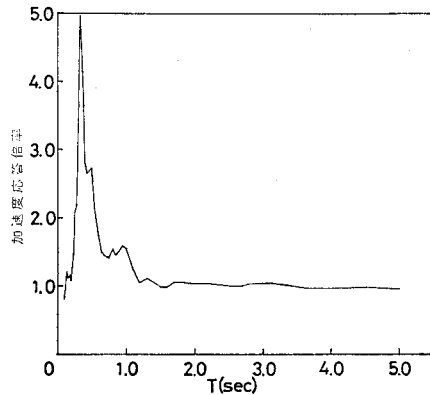
9 で上位の直線でだいたい近似できるタイプである。もう1つのタイプは、主としてごく短周期の成分のみが卓越するケースであり、図-9 では下位に属する1つのグループで、特異な地震あるいは、ある種の地盤条件 (たとえば開北橋付近の記録 (表-1 の No. 7, No. 8) は、薄い軟弱なシルト層の下位に硬質な地層が現われ、それぞれのインピーダンスの顕著な対照性から地震波に表層の影響が少なからず現われていると推察される) での記録波に対応するものである。

したがって、これらの結果から A_{max} (強震計が示す最大加速度) / $(B \cdot g / H)_D$ (動的臨界転倒加速度) と B/H の関係を求めれば、2つの関係式が得られ、それぞれは図-9 に示す2本の直線で表わされる (式 (4), (5)).

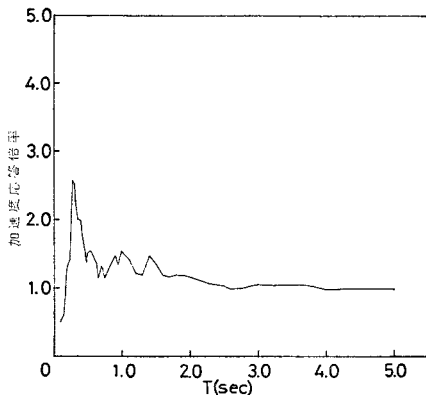
$$\frac{A_{max}}{\left(\frac{B}{H} \cdot g\right)_D} = 1.016 - 0.618 \frac{B}{H} \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{A_{max}}{\left(\frac{B}{H} \cdot g\right)_D} = 0.857 - 0.890 \frac{B}{H} \dots\dots\dots (5)$$

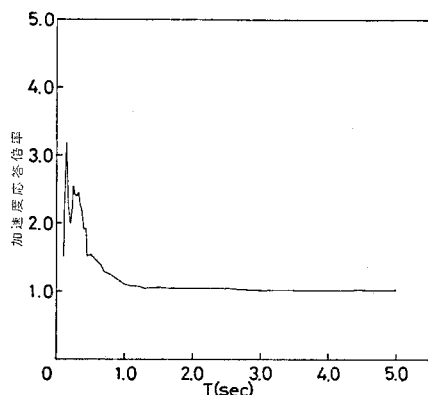
なお、それぞれの相関係数は前者が 0.84、後者が 0.91 となる。ところで、後者のグループは特異な地震動であると述べたが、それらの加速度レスポンス・スペクトル



(b) 1962年広尾沖地震, 釧路港 EW



(a) 1962年広尾沖地震, 釧路港 NS



(c) 1978年宮城県沖地震, 開北橋付近 LG

(減衰定数 $h=0.05$) を 図-10(a)~(g) に示す。これらの図が示すように、墓石による値がきわめて過小評価となる地震波のグループのほとんどのレスポンス・スペクトルは、ごく短周期の領域にシャープなほぼ単一のピークをもつといった特徴を有しており、上位のグループの地震波とはかなり性質が異なることを推測させる。それはたとえば、1962年広尾沖の地震で前記のように大きな加速度が記録されたにもかかわらず被害が軽微であったこと、ならびに1980年伊豆半島東方沖地震でも最大363gal(川奈)³⁰⁾といった加速度が記録されたが、これといった被害のないことと関係づけられるであろう。

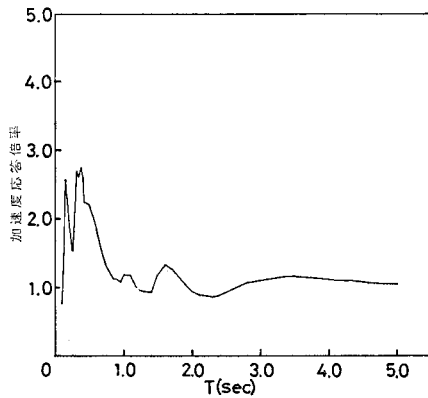
ところで表ほか¹⁰⁾は、震央近傍の墓石転倒による推定加速度は電気工学の分野でいう実効値的なもので、これを $\sqrt{2}$ 倍すれば、強震観測結果によく対応するようになると報告しているが、それは本計算結果で説明づけられる。すなわち震央近傍の墓石による推定加速度は一般に450~500gal内外であるが、これを大体 $\sqrt{2}$ 倍すれば 図-9 において、通常の地震波の $A_{max}/(B \cdot g/H)D$ の値はほぼ1.0に近接する。すなわち、本計算結果は量的に、あるいは地震波のタイプ分類の面からみて十分とはいえないかもしれないが、理論的に表ほかの結論を

立証したものであり、かつ強震記録との対応性をより大きな加速度範囲にわたりほぼ連続的に表現しているといえよう。なお、図中には理論計算結果を補充する意味で、鹿島建設(株)技術研究所が行った実験結果も一部示してあり、それも経験式作成における資料として使用しているが、前記上位の直線近傍に位置していることがわかる。

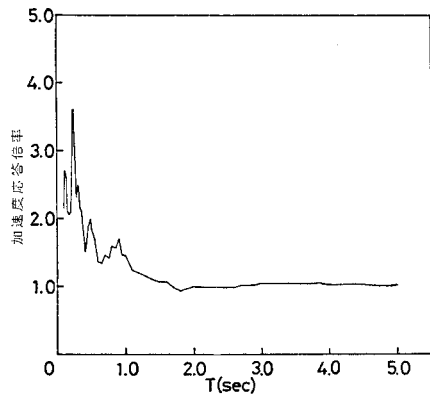
図-9の結果より、Westの公式により推定される加速度を実際に作用したであろう地動の最大加速度に変換するには、式(4)、(5)によって得られる値でその推定値を除する必要がある。このとき両式の右辺の B/H は Westの公式で用いた値を適用することになる。しかしながら、結論的にいえば、式(5)に該当する地震は繰り返し述べてきたように特殊なタイプに属する。したがって、本研究結果を実際の被害地震に使用するに際しては、式(4)のみ採用しても一般性を失うおそれは少ないと考えられる。

5. 結 論

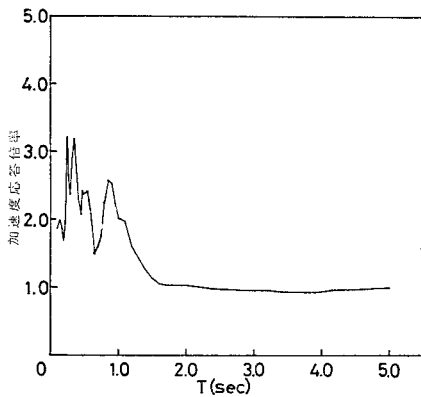
以上、本論文は墓石による震度推定手法に関する検討



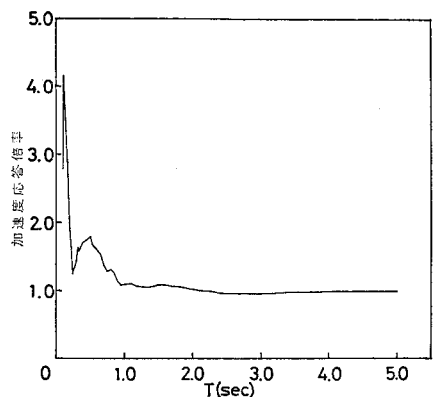
(d) 1978年宮城県沖地震、開北橋付近 TR



(f) 1980年伊豆半島東方沖地震、修善寺 EW



(e) 1980年伊豆半島東方沖地震、修善寺 NS



(g) 1967年Koyuna地震、Koyuna Dam TR

図-10 加速度レスポンス・スペクトル、減衰定数 $h=0.05$ (図-9 において下位のグループに属する地震波)

ならびに木造建物全壊率 P -震度 K (上記手法による) の関係を、わが国における代表的地震のいくつかについて求めたものであり、かつ、このようにして推定された震度が実際に作用したであろう地震動加速度といかなる対応関係にあるかを量的に調べたものである。その結論の内容を要約すれば以下ようになる。

(1) West の公式による震度 K と墓石転倒率 Q の関係は正規確率紙上で直線近似し得る (図-2, 式 (2))。したがって、この関係を用いれば、 Q のみしか得られない墓地 (たとえば適切な墓石転倒資料が得られない墓地など) における震度推定も近似的に可能になる。

(2) 岩崎ほかの Q - A_{max} 関係を求める手法は式 (1) を用いているが、式 (1) は少なくとも震央近傍においては妥当な A_{max} を与えないように思われるため、その適用性に問題があると考えられる。

(3) 木造建物全壊率 P と K の関係は、大地震に比べ中級の地震では同一震度でも低い P を示す。この P - K 関係の差異は M (マグニチュード) の違いによるが、福井地震 $M7.3$ 程度以上の大地震の P - K 関係は若干の幅をもってみれば一定である。ただし、濃尾地震の P - K 関係 (大森による) の K はかなり過小評価しているように思われる。

(4) 以上に示した震度 K は特に K が高い場合、実際に作用したであろう最大加速度 A_{max} に比べ、かなり過小評価している。このことを、21 個の強震記録波に対する単体の理論応答計算および 2 つの振動実験により明らかにし、補正のための経験式を導いた。

末尾ながら、本論文作成にあたり格別のご指導、ご鞭撻を賜った東京都立大学工学部 望月利男博士、国井隆弘博士、ならびに単体の転倒実験結果の一部を使用させていただいた鹿島建設 (株) 技術研究所 太田外気晴氏、遠藤 彰氏ほかの方々へ深甚なる謝意を表す。なお、単体の理論応答計算に用いた強震記録のうち、1980 年伊豆半島東方沖地震に関するものは「地震動特性に関する研究」委員会 (会長 表 俊一郎九州産業大学学長) から提供していただいた、記して深謝するものである。

参 考 文 献

- 1) 田中貞二：強震記録からみた地震動の強さの評価，第 9 回地盤震動シンポジウム，日本建築学会，pp. 39~42, 1981.
- 2) 大森房吉：明治 24 年 10 月 28 日濃尾大地震調査第 2 回報告，震災予防調査会報告，第 32 号，pp. 67~88, 1900.
- 3) 物部長穂：土木工事震害調査報告，震災予防調査会報告，第 100 号，J, pp. 7~17, 1926.
- 4) 北陸震災調査特別委員会：昭和 23 年福井地震震害調査報告，II, pp. 27~28, 1950.
- 5) 佐山 守：安政江戸地震災害誌，上巻，下巻，東京都，1973.
- 6) 村松郁栄：震害分布と地盤の性質との関係について 一特

に濃尾地方について一，濃尾地震激震地域の震度分布および地殻変動，岐阜大学工学部研究報告，自然科学，1963.

- 7) 宇佐美龍夫：静岡県を中心とした宝永・安政両地震，地震予知連絡会会報，第 17 巻，pp. 84~89, 1977.
- 8) 岩崎敏男・川島一彦：墓石の転倒状況からみた 1978 年 1 月伊豆大島近海地震による地震動強度の推定，土研資料第 1399 号，建設省土木研究所，1978.
- 9) 岩崎敏男・三島一彦・高木義和：1978 年宮城県沖地震による地域別地震動強度の分布に関する調査報告，土研資料第 1512 号，建設省土木研究所，1979.
- 10) 表 俊一郎・三宅昭春・横橋秀衛：大地震時の震央域に於ける地動最大加速度 (転倒墓石による最大加速度と強震記録との対比)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 463~464, 1979.
- 11) 宮野道雄：1923 年関東大地震における震度と地形・震源距離の関係について，土木学会第 35 回年次学術講演会講演概要集第 1 部，pp. 446~447, 1980.
- 12) 望月利男・宮野道雄・松田啓余：1923 年関東大地震における震度と震源距離・方向性・地形の関係，地震学会春季大会講演予稿集，pp. 233~234, 1981.
- 13) 望月利男・小林計代：単体の運動から地震動加速度を推定するための研究 一単体の動的挙動の解析一，日本建築学会論文報告集，第 248 号，pp. 63~70, 1976.
- 14) 望月利男・松田啓余・田村俊和・宮野道雄：1978 年伊豆大島近海地震に伴う地震断層，加速度分布と被害，総合都市研究，第 5 号，東京都立大学都市研究センター，pp. 9~37, 1978.
- 15) 長宗留男：1978 年伊豆大島近海地震の震源について，地震学会秋季大会講演予稿集，pp. 64, 1979.
- 16) 村井 勇・松田時彦・中村一明：1978 年伊豆大島近海地震に伴う稲取付近の地震断層，1978 年伊豆大島近海地震による災害の総合的調査研究報告，pp. 53~54, 1978.
- 17) 佐藤泰夫・松田時彦・柴野睦郎：昭和 37 年 4 月 30 日宮城県北部地震調査報告，地震研究所彙報，第 40 号，pp. 591~612, 1962.
- 18) 福富孝治・田畑忠司・藤木忠美・金安公造：墓石の転倒，移動等による十勝沖大地震の最大加速度と，特異な地割れの観察，1952 年 3 月 4 日十勝沖大地震調査報告，pp. 221~242, 1954.
- 19) 国井隆弘・荻本孝久：1978 年 6 月宮城県沖地震における墓石調査による最大加速度の推定，総合都市研究，第 5 号，東京都立大学都市研究センター，pp. 103~114, 1978.
- 20) 国立防災科学技術センター：1978 年 1 月 14 日伊豆大島近海地震，強震速報，No. 13, 1978.
- 21) Blume, J.A.: The sam procedure for site-acceleration-magnitude relationships, Proc. of 6 W.C.E.E., pp. 416~422, 1977.
- 22) 小林啓美・翠川三郎・田鎮 隆：震源域周辺での地震基盤からの入射波の強さについて，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 553~554, 1978.
- 23) 物部長穂：土木耐震学，常磐書房，pp. 48~50, 1933.
- 24) Kawasumi, H.: The Fukui earthquake of June 28, 1948, Report of the special committee for the study of the Fukui earthquake, pp. 140~148, 1950.
- 25) Kishinouye, F. and R. Ikegami: 同上，pp. 149~153, 1950.
- 26) 末広重二・久本壮一・田中康裕：昭和 23 年 6 月 28 日福井地震調査概報，強震時報，第 14 巻別冊，pp. 22~37, 1948.
- 27) 北海道庁：十勝沖地震委員会報告，1953.
- 28) 望月利男・国井隆弘・松田啓余・田村俊和：最近の内陸直下型地震の調査報告，東京都立大学地震研究グループ，1976.
- 29) 中村左衛門太郎：関東大震災調査報告，震災予防調査会報告，第 100 号，甲，pp. 67~140, 1925.
- 30) 田中貞二・坂上 実・大沢 胖・吉沢静代：1980 年伊豆半島東方沖地震および同群発地震の加速度強震記録と最大加速度データ，地震研究所彙報，Vol. 55, pp. 1043~1064, 1980.

(1981.1.14・受付)