

サイスミック・マイクロゾーニングにおける 震度分布の評価手法について

—その1. 墓石調査による震度と建物の被害の関係からのアプローチ—

望月 利男* 国井 隆弘*
松田 磐余* 宮野 道雄**

要 約

地震動の強さと、その地域分布を知る最も確かな方法は、いうまでもなく強震計による観測である。しかし、被害地震の歴史とその地域的広がりからみれば、観測資料はあまりにも少ない。特に大地震の激震地の記録が欠けている。一方、地震によって生じた現象や被害の記録は少なからず残されている。

また、我が国においては、1891年濃尾地震以来、墓石の転倒、木造建物の震害率分布などから震度分布を推定する試みが続けられてきた。また、これらの方法を適用し、より古い地震記録からその震度分布などが調べられている。すなわち、被害地震における地震動の強さの地域分布を推考する立場からみれば、我が国各地に普遍的に分布する木造建物群は、墓石とともに簡易地震計と考えることができる。しかし、このような手法（特に木造建物の震害率分布による場合）による震度は、多くの場合、いわゆる震度階に基づく地域区分にとどまり、地震工学の場においては活用しにくい。

この報告では、墓石など単体の移動・転倒に基づく震度推定の問題点・精度について理論解析結果などを加味して考察するとともに、主として木造建物の全壊率と震度（加速度）の関係についての既往の研究に再検討を加えている。すなわち、既往の震災体験から、サイスミック・マイクロゾーニングの基幹をなす地震動の強さの地域分布の推定手法の開発にアプローチしたものであるが、今後体系化するための基礎として、この第1報をまとめた。

1 はじめに

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：540 gal; 金井, 1969）、1966年Parkfield地震（ $M=5.6$, 490 gal; Cloud, W. R. & Trifunac, M. D., 1967）、1971年San Fernando地震（ $M=6.6$, Pacoima Dam Site：1150 gal; Hudson, D. E., 1971）など震央近傍の記録も得られつつある。しかし、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（1900）、物部（震災予防調査会, 1925C）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と墓石など単体（柱状物体）の転倒による推定加速度（震度）の間の関係を量的に示した。以来、1948年福井地震（北陸震災調査特別委員会, 1950）など幾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（例えば、佐山, 1973; 村松, 1963）。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。

これらの調査研究は、地震動の観点からみれば、主として最大加速度の地域分布の推測を目的としている。こ

* 東京都立大学都市研究センター研究員

** 東京都立大学大学院工学研究科博士課程

の報告では、単体の地震時運動理論(望月・小林, 1976)などを参照しながら、既往の幾つかの被害地震の調査記録を整理検討し、墓石などの運動から推測される地震動加速度並びにそれと木造建物の全壊率の関係における問題点、課題などについて考えてみる。

なお、本テーマは都市問題との関連性という観点からみれば、都市の被害予測などに際し、その基幹となる入力地震動の強さの地域分布を既往の地震における震害分布から明らかにしようとするものである。そのためには、地震規模、震源特性などをパラメータにした体系的な研究が必要であり、著者らはそのような観点からの研究を進めており、この報告でもそのような見方からの考察を行っている。

2 単体の転倒から推測される震度について

ここで考える問題は、墓石などの調査において確かに転倒したらしい墓石が選定できたとき、推定される震度を合震度とみなすか、あるいは近似的に水平震度と考えていかに関することである。

墓石など単体の転倒から地震動加速度(震度)を推定しようとする試みは、前記したようになかなか古くから行われているが、その際に用いられてきた推定式は

$$\bar{K} = \frac{K}{1 - Kv} = \frac{B}{H} \quad (1)$$

ここに、 K 、 Kv はそれぞれ水平動、上下動の震度、 \bar{K} は合震度である。また、 B 、 H はそれぞれ単体の幅(奥行)、高さ、 g は重力の加速度である。一方、 Kv を無視し、Westの公式と呼ばれている次式で K を表現することも少なくない。

$$K = \frac{\alpha}{g} = \frac{B}{H} \quad (2)$$

ここに、 α は水平動の加速度である。

以上は、震度推定の基本式であるが、時に、より詳細な考慮から、これを変形した型で用いられることもある。例えば、福富他(1954)は1952年十勝沖地震の調査において台の傾斜度 i なる単体に水平と θ なる角度で地震動が作用して加速度 $\bar{\alpha}$ をうける場合を考え、 $\bar{\alpha}$ と g との比が、それ以上大きくなれば転倒するという境界値($\bar{\alpha}/g$)を次式であらわしている。

$$\left(\frac{\bar{\alpha}}{g}\right) \frac{(B/H)\cos i - \sin i}{\cos(\theta+i) + (B/H)\sin(\theta+i)} \quad (3)$$

この式で地震動の働く方向が水平から、 $\tan(\theta+i) = B/H$ を満足するような傾き θ の場合に($\bar{\alpha}/g$)が極小値、($\bar{\alpha}/g$) m になる。すなわち福富他は墓石の転倒に最適な入力加速度の方向を仮定し、任意の H 、 B に対して最小の($\bar{\alpha}/g$) m を求めているが、これは合震度の考え

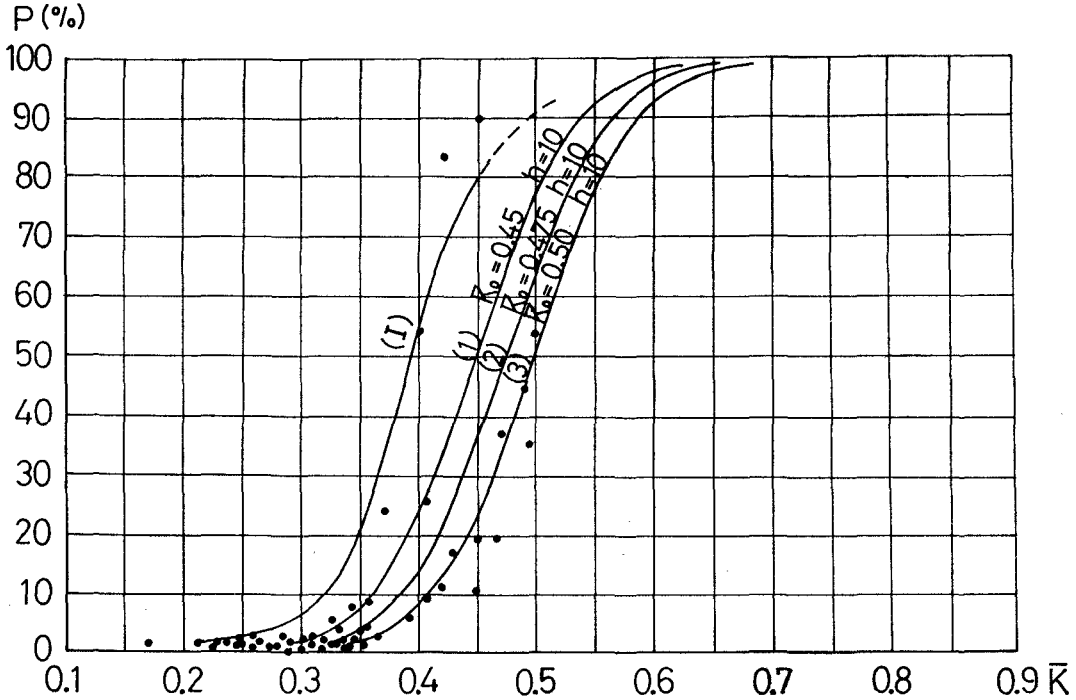
方の一種である。

前記、物部(震災予防調査会, 1925C)は、ある地方における木造建物の標準耐震力を \bar{K}_0 (合震度)で表わし全壊率 P (%)と \bar{K} (合震度)との関係を次の正規分布曲線で示した。

$$P = \frac{100}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{hy - h^2y^2} e^{-h^2y^2} d(hy) \quad (4)$$

こゝに、 $y = \bar{K} - \bar{K}_0$ であり、 h はその地方の建物の耐震力の一様さ(Uniformity)を示す指数と称している。物部は(4)式を用いて関東大地震における P と墓石など単体の転倒による \bar{K} を各地で対応させた結果、 \bar{K}_0 は、0.45~0.5、 h は7~10と推定している(図-1)。また、この地震においては、中村(震災予防調査会, 1925a)も震度推定を行っている。中村は東京本郷における地震動の最大加速度は156 gal(周期1.2秒)程度と推定している。しかし、他地域の加速度は地震計など推定すべき手段がなかったため、墓石・門柱などの転倒から推測している。ただ、その値が大き過ぎて信じる事ができなかったとの理由から、上下動と水平動の加速度が同程度に作用したと仮定している。そして、この両加速度の偶力の和が重力のおよぼす偶力より大きい時に転倒が生ずると仮定している。すなわち、 a_h, a_v を水平、上下動の最大加速度として、 $a_v H + a_h B = Bg$ 、ここで、 $a_h = a_v$ の仮定から、 $a = \{B/(H+B)\}g$ 、これより a を各地で求めている(表-1)。

以上、墓石など単体の転倒から推測される震度が合震度として扱われ、多くの場合、 $K < \bar{K}$ 考えられてきたように思われる。ところで望月・小林(1976)は単体の動的挙動を解析し、幾つかの場合に対する計算例を示しているが、図-2、図-3は単体の転倒におよぼす上下動の影響に関する計算例である。図-2は入力地震波として正弦波を用いた場合であり($B=20\text{cm}$, $H=60\text{cm}$, 一定)、図-3は(EI Centro)地震波(1940, NS)を用いた場合である($B/H=0.2$, 一定)。両図から上下動(\ddot{Y}_0)の存在が水平方向の転倒加速度を引き下げる効果が明らかに認められる。その程度は、図-3の場合はばらつきはあるが、比率としては静的に考えた場合の $B/H = \ddot{X}_0 / (g + \ddot{Y}_0)$ から得られる値に近い(\ddot{X}_0, \ddot{Y}_0 :それぞれ水平および上下動の加速度)。そして図-2によれば、上下動を水平動の0.6と仮定したとき、図-3では0.8と仮定したとき、転倒限界震度がほぼ(2)式の値に近いものになっている。ただ、地震波、正弦波入力のいずれの場合も、上下動は水平動の波に定数を乗じて小さくしただけで、周期、位相などは全く変えていない。したがって、実際の地震で上下動と水平動の最大時刻位置がずれた場合、また周期特性が異なるときこの効果は、かなり減ずるはずである。例えば、前記Parkfieldの地震記録をみれば、



図一 合震度 \bar{K} と木造住家全壊率 $P(\%)$ の関係、物部(震災予防調査会, 1925c)による。図中の(1)は1891年濃尾地震, (1)~(3)は1923年関東大地震

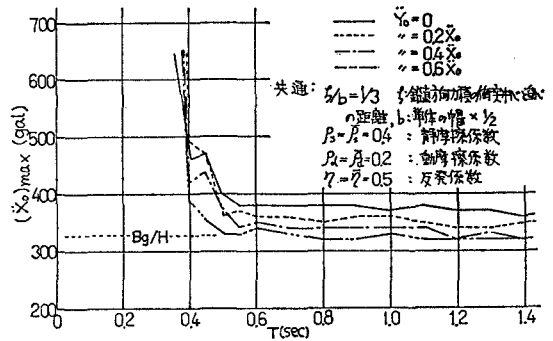
表一 物体の転倒による加速度と木造住家全壊率 (1923年関東大地震)

地名	a (gal)	α (gal)	全壊率 (%)	地名	a (gal)	α (gal)	全壊率 (%)
天津	250	330	0.07	東京深川	290	410	7.8
稲部	300	430	63.9	砂町	280	390	9.8
白浜	250	330	0.11	鎌倉	310	450	58.5
北條	290	410	96.7	大磯	300	430	1.5
佐貫	280	390	11.0	小田原	350	550	37.7
富津	280	390	18.4	沼津	160	190	0.01
東京浅草	270	370	7.4	三崎	280	390	11.9
東京本所	290	410	13.4				

α : Westの公式による換算値

a: 中村(震災予防調査会, 1925a)による

断層線から200mしか離れていないにもかかわらず、上下動の最大は地動の初期に表われており、その時刻の水平動はまだ小さい。さらに、周期特性も全く異質なものである。すなわち、これまでの幾つかの計算例では(図一2, 3; 望月・小林, 1976参照), いずれの場合も静的転



図二 角柱の転倒に及ぼす上下動の影響(上, 下水平とも正弦波入力, 幅×高さ=20×60cm, 図中の曲線は転倒限界加速度を結んだもの)

倒加速度に比べて、動的応答計算の方が数%から10数%高い値が得られること、並びに上記の理由から、次のように推論できよう。

確かに転倒したらしい墓石から(2)式を用いて水平震度を推定する場合は、得られる値は、一般に低い側であっても高い側にあることはない。いいかえれば、上下動の存在を考慮して水平震度(加速度)を引き上げる必要はないといえそうである。それ故、以下にいう震度は特に

断わらない限り、水平方向の震度とする。

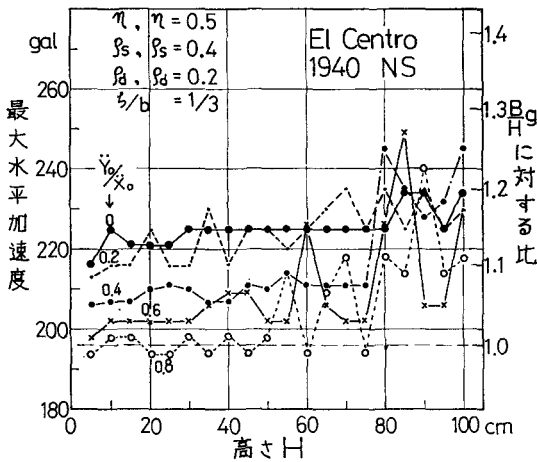


図-3 角柱の転倒におよぼす上下動の影響(上下, 水平とも実地震波入力, B/H=0.2)

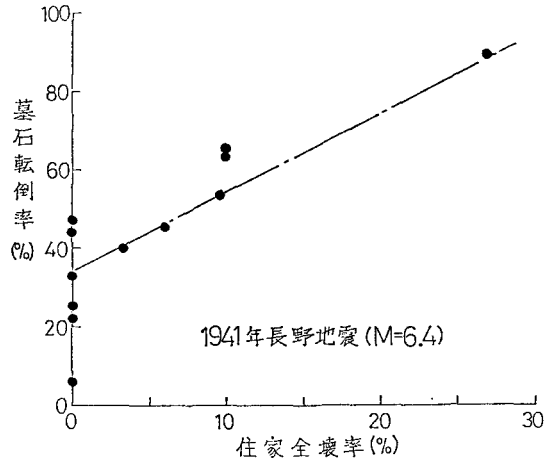


図-4 住家全壊率と墓石転倒率の関係(墓石転倒率は岸上他, 1941による, ただし墓石総数25未満の墓地は除く, また, 住家全壊率は, 金井, 1941から作図)

3 既往の幾つかの地震調査資料にみられる墓石の転倒と移動について

墓石がロッキングから, ロッキング・スリップから, あるいはジャンプから台石に衝突するときの挙動を詳細に考えれば, 衝突時の力積の大小, その他多くの諸条件が関与するため, 状況は極めて複雑になるが(望月・小林, 1976), 大森(1902)はすでにB/Hが μ_s (単体と床の面接触時の静摩擦係数)より大なるとき, 単体はスリップを生ずるとして, 濃尾地震における幾つかの事例について解説している。この μ_s の値についての今村(1933)は, 石と石の接触で, 0.7, また佐野・武藤(1935)は, 石と石で0.4~0.7, 土と石で0.3~0.7とその著に記している。このように地震時における物体の移動は, かなり古くから注目されてきたし, 墓石の転倒から震度を推定する際の大きな問題と考えられてきたことは容易に推察される。

それ故, 幾つかの地震において墓石の転倒率(スリップして落下しているものも含む)が調査され, 地震動の強さの分布を相対的に推定する尺度として用いられてきた。図-4は, 1941年長野地震(M=6.4)における上記, 墓石の転倒率と住家全壊率の関係であり, 岸上他(1941)および金井(1941)の調査資料を組み合わせて表わしたものである。全壊率ゼロのところでは点は大きくばらついてはいるが, 全体的にみて全壊率と墓石転倒率の関係は, おおよそ比例関係にある。また, 前記, 福富他による1952年十勝沖地震の調査は, 震央距離 $x=63\sim 225\text{km}$ のケ所で行われた。この地震動の周期特性に関する北海道各地の測候所の記録によれば1.0秒内外ないしそれ以上はかなり長周期の地震である。結果として, は

ば $\bar{\alpha}/g$ が確定された $\bar{\alpha}/g$ の最大値は, 0.39(K=0.42)で天津村($x=81\text{km}$, 全壊率25.7%)にて得られ, $\bar{\alpha}/g$ と全壊率の関係, 墓石の転倒率と震度, 全壊率の関係は, ばらつきはあるにしろよく対応している。そして, 大きな被害は泥炭地区で生じており, 襟裳, 広尾, 様似, 中札内等の堅硬な地盤のところ, 同じ震央距離の他地区に対し, かなり $\bar{\alpha}/g$ が小さく, 墓石転倒率も低いことが報告されている。

ところで, 1968十勝沖地震では, 松田(1968), 恒石(1968)により詳細に墓石調査が行われているが, 台石から転落している墓石のB/Hは非常に大きい場合も多く, 転倒, 不転倒はB/Hに無関係であったとしている。すなわち, 大部分の墓石は台石上で転倒したのではなくスリップにより転落したのであり, B/Hの測定による震度の推定はできないと報告している。そして松田(1968)には, 27所の墓地における転倒, 不転倒墓石のB/Hと転倒率が示されている。この資料から各墓地における転倒率と不転倒墓石の最小B/Hの関係をプロットしたものが図-5である。この表現は, 既往の大地震の幾つかにおいて示されてきた木造建物全壊率と震度の関係と同一のものであるが, マクロにみれば一定の傾向が明らかに認められる。ここでは不転倒墓石のB/Hを採用しているから, 図の直線はおおよそ震度の上限(Westの公式による)を推測させるものである。当時, 数は少なかったにしても, ロッキングを経て転倒した墓石はあったはずであり(例えば, 台石上に下端を残して倒れている墓石など), このような場合, 個々の墓地で震度を決定することはできないと思われるが, 例えば, 図-5に確かに転倒したらしい墓石のB/Hの最大値をプロットすること

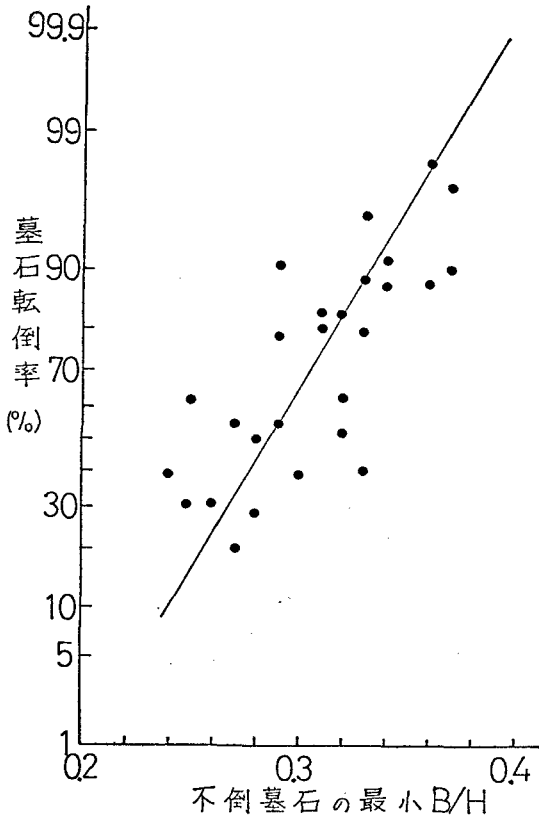


図-5 1968年十勝沖地震における青森県東南部の墓石の転倒率と推定最大震度の上限 (松田, 1968の調査資料から作図)

により、おおよその震度の幅は推定しうるのではなかろうかと考えている。

一方、恒石によるこの地震を対象とした μ_s に関する実験によれば、 μ_s の幅はかなり大きく、条件によっては0.23程度と小さい場合がある。ところで、この値は実測によれば、同一実験時(種々の直圧加力の場合)のばらつきは小さいようであるから、現地でテンションメータなどを用いて実測することにより、落下墓石の原因の判定、あるいはスリップに要した加速度を推定することも今後の調査では考えられる手法である。なお、表他(1976)はこのようなスリップの問題を考慮して、1975年大分県中部地震において、ほぞ付きの墓石の転倒寸法を基準値として、震央付近一帯の加速度を420 galと推定している。

ところで、上記の幾つかの地震では大体木造建物の被害の大きいところ、地盤の悪いところで墓石の転倒率が高くなっており、このようなケースがほぼ一般的かと思われるが、著者が調べた範囲ではただ一例、それらと全く傾向の異なる例がある。それは関東大地震における東京旧市内およびその郡部の墓石転倒率並びに移動に関

する調査結果であり、震災予防調査会(1925b)に示されている。調査墓石総数はぼう大であり、総数581,321個にのぼる。

図-6および図-7は旧区および各郡の木造建物全壊率、土蔵震害率(旧区内のみ)と墓石被害率の関係であ

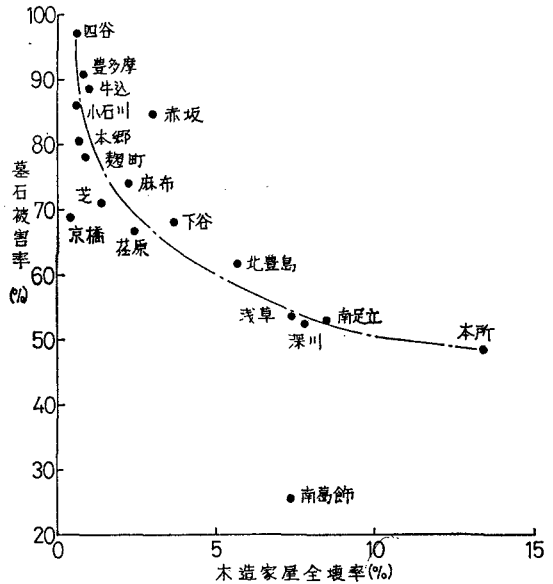


図-6 関東大地震における東京各地(13旧区, 5旧郡)の木造家屋全壊率と墓石被害率の関係
墓石被害率 = $\{(転倒 + 移動)墓石 / 墓石総数\} (\%)$
(震災予防調査会, 1925 a, b の資料から作図)

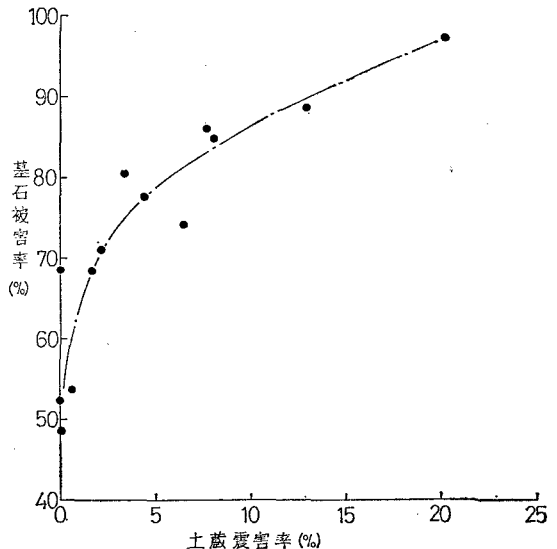


図-7 関東大地震における東京旧市内各地の土蔵震害率と墓石被害率の関係
土蔵震害率 = $\{(全壊 + 半壊 + 大破)土蔵 / 土蔵総数\} (\%)$ (震災予防調査会, 1925 a, b から作図)

る。図一6より墓石の転倒（スリップによる落下が少なからずあるものと思われる）、移動は明らかに四谷、豊多摩（淀橋、中野、渋谷など）、牛込、小石川など木造建物の全壊率が低い山の手台地で多く、南葛飾（大島町、砂町、亀戸など）、本所、深川など軟弱沖積層の厚い地盤上で少ない。したがって、よく知られているように関東大地震における東京の土蔵の被害と地盤の関係は木造建物のそれとは全く逆の関係にあるから、図一6と図一7の関係は全く逆転する。ただし、図一7の場合、郡部の土蔵の総数の資料は見出せなかったため、省いてある。

この地盤と2種の構造物の被害並びに墓石の転倒、移動の関係をいかに解釈すべきであろうか。墓石が古くから簡易地震計とみなされてきた大きな理由の一つとして、全国的にみてその群としての性質に大きな違いはないことがあげられる。したがって、調査された墓石総数のぼうりから考え、この結果は総計的な有意性を十分もつはずであり、地震動の特性と密接な関連をもつことが推測される。墓石が転倒するためには、その寸法によって定まる一定周期（望月・小林(1976)における臨界周期）以上の周期をもち、かつ少なくとも(2)式で近似される値以上の加速度の入力が必要である。さらに $\rho_s > B/H$ の条件が要求される。著者らの計算によれば、これらの条件が満たされた場合、ほぼ一波の加速度波入力で転倒する。また、 ρ_s 以上の震度が作用しなければ、墓石のスリップによる移動は生じないし、この運動によって転落することもない。したがって、各区、各群の墓地群における墓石の ρ_s 分布に大きな差がなく、例えば、正規分布などある値を中心とする分布を考えれば、転倒（真に転倒の場合は寸法分布も同様に考える）あるいは移動した墓石数の比率が、山の手台地で極めて多いという事実は、低地に比べて台地の地震動加速度が高かったことを推測させる。

最近、大田(1977)は幾つかの地震における東京およびその近辺での同時観測記録を整理し、発表しているが、東京礫層近くから地上までの増幅率は下町低地で約2.4、山の手台地で約2.9倍と、後者の方が大きいことを指摘している。これは中小地震に対する結果であるが、前記した墓石の転倒・移動に関する記録は、大地震である関東大地震の東京における加速度の地域分布を示唆しているものと推察する。

そして、この地震における土蔵の被害が山の手台地で大きいこととよく調和する。著者らは、1855年安政江戸地震の東京での被害を考察しているが（望月・宮野、1977a）、この地震では土蔵も震源に近い下町低地で、はるかに大きな被害をうけており（表一2）、地盤振動との共振現象によると考えるよりも、加速度の地域差と解釈の方が妥当と思われる。

4 墓石の転倒による震度と木造建物の全壊率の関係について

大地震の最大加速度が、いわゆる地盤の良いところと軟弱地盤のいずれで大きいかは、充分わかっているとはいえない。3.で示した例では関東大地震の東京の場合を除けば、軟弱地盤の方が大きかったといえそうであり、1952年十勝沖地震では特にそれが顕著に認められている。これは、地震波のもつ周期特性に関係するように思われる。福富も指摘しているように、1952年の十勝沖地震では全域的に地震動は比較的長周期であった。ところで、震央付近の地震動の基幹的な周期については、大地震時には1~2秒といわれているが（例えば、河角、1973など）、地震計による十分な資料があるわけではない。

例えば、1948年福井地震では寺院の鐘がゆれて鐘楼の梁に衝突した傷跡などから1.2~1.8秒程度が推測されている（北陸震災調査特別委員会、1950）。中級の直下地震の場合には、幾つかの震央近傍の記録があり、Parkfieldの加速度記録からは、卓越周期0.7秒、1.4秒が読みとれるが（石田・大沢、1976）、断層からはなれるに従い、短周期化するとともに連続する波数も増加している（Cloude, W. R. 他、1967）。また、1934年南伊豆強震（ $M=5.5$ ）の須崎（ $x=21km$ ）の記録によれば（福富、1934）、水平加速度115gal、周期はおおよそ0.7秒である。距離はかなりはなれているが、大きな加速度は1~2波であり、震央付近の波形を比較的よく保っているように思われる。

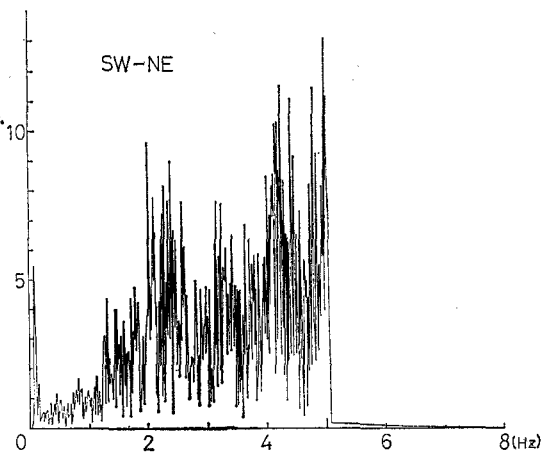
そして、ここに数値をあげた例のような地震の場合、あまり大きくない墓石で、 $(B/H)g$ がその最大加速度 α 以下、かつ ρ_s の条件が満たされるものは転倒するであろうし、(2)式でおおよそその震度（加速度）を推定することも可能である。例えば、 B/H （単位はcm） $=20/60=0.33$ の臨界周期（これ以下の短い周期では、単体は極めて大きな加速度を入力しないと転倒しない。その限界の周期である。望月他、1976）は約0.55秒、 $B/H=24/60=0.4$ では、約0.62秒、 $B/H=30/60=0.5$ では、約0.75秒程度になる。

関東大地震の東京の地動として、山原(1976)、森岡(1976)は本郷での地震動の再現を行っているが、それによれば、それぞれ380gal、392gal（ $K=0.4$ ）が得られている。図一8は森岡による加速度波のフーリエ・スペクトルである。地震波のデジタル量は那須、森岡両先生の御好意により、こゝに使用させていただいた。図によれば、変位記録からの変換による読み取り精度限界のため、5Hz以上の短周期成分はカットされているが、最大ピークはそこに生じており、より短周期側に最大加速度が表われる可能性も全くないとはいえないようにみえる。そして、このスペクトルと前記の臨界周期一単体

表一 2 1855年安政江戸地震 (M=6.9) による東京 (江戸) 各地の被害

地名 (町名)	死者(人)	潰家 (軒or棟)	土蔵全壊 (所)	戸数 (戸)	全壊率 (%)	死者/潰家 (人/軒 or 棟)
1. 芝金杉他橋 (金杉南方麻布一円)	18	115	10	10,047	1.1	0.16
2. 麻布谷町 (麻布全福寺門前町)	10	34	0	5,445	0.6	0.29
3. 麴町, 牛込, 四谷一円	63	337	39	13,322	2.5	0.19
4. 駒込, 小石川, 小日向辺一円	30	743	19	11,571	6.4	0.04
5. 外神田 (佐久間町), 湯島本郷辺	24	66	6	3,236	2.0	0.36
6. 今川橋より北方内神田一円	75	154	32	7,168	2.1	0.49
7. 京橋より南方新橋まで左右御堀端限り	5	(6)	5	5,537	(0.2)	
9. 中橋より南方左右御堀端まで京橋限り	29	66	18	3,225	2.0	0.44
9. 日本橋南方より左右御堀端まで通り4丁目限り	17	42	7	4,168	1.0	0.40
10. 日本橋より今川橋まで	96	133	23	3,808	3.5	0.72
11. 本八丁堀町	69	156	26	7,925	2.1	0.44
12. 葺屋町より両国, 横山町, お玉ヶ池辺	86	185	57	10,537	1.8	0.46
13. 上野辺, 山下, 下谷, 谷中	366	1,525	138	5,826	26.2	0.24
14. 浅草阿倍川町, 浅草御門外から花川戸辺	643	1,301	42	10,109	12.9	0.49
15. 浅草兼房町	81	494	63	4,198	11.8	0.16
16. 本所	384	2,307	116	9,699	23.8	0.17
17. 南本所元町他, 深川熊井町他	1,660	8,318	807	16,875	49.3	0.20

(墓石) 寸法の関係からみる限り、 $B/H=0.4$ の通常の大サイズの墓石は転倒しそうにない。したがって、東京山の手台地の多くの地域における関東大地震の地動の特性が、図一8の特性と著しく異なることはないと思えば、



図一 8 関東大地震の本郷における加速度波 (森岡, 1976) のフーリエスペクトル

そこでの転倒墓石の大部分はスリップにより落下したことになる、個々の墓地でその地点の震度を決定することはかなりむずかしい。

以上から、主として墓石などの転倒から推定される震度のうち、ある値より大きな震度 (例えば、0.3以上といった) は、比較的長周期の地動加速度に対応するものであり、地震動特性あるいは地域によっては、必ずしも最大加速度を示すものではないと推論する。しかし、我が国各地に普遍的に存在する墓石などの単体から震度を推定する手法は、いささかもその意義を減ずるものではない。何故なら、既往の大地震並びに今後発生するであろうところの地震時の調査において、比較的長周期の加速度波に弱い木造建物をはじめとする各種構造物に対する地動の強さ (単なる最大加速度を意味しない) の地域分布を推測させる貴重な手がかりとなるからである。ただし、墓石などの転倒から震度 (加速度) を推定する場合、転倒率 (スリップによる落下を含む)、移動率、震央距離、被害並びに地盤特性との対応性など総合的な検討を加え、評価する必要がある。

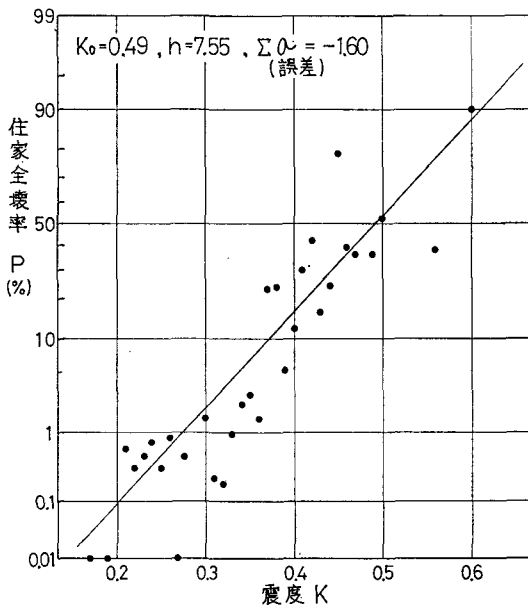
ところで、墓石などの転倒による震度と木造建物の全

壊率がある程度一般性をもって関係付けられれば、豊富な資料の残されている木造建物の全壊率分布から地震動の強さの地域分布をかなり工学的な活用性をもたせて推測することが可能になる。前述したように物部は、この関係を(4)式で表わした。ここでは、前記、物部の資料に中村(表一1)の資料を加え、(4)式のhとK₀の最適値を関東大地震に対して決定する。すなわち、物部は、h = 7~10, K₀ = 0.45~0.5として、幅をもたせてK̄(合震度) - P(全壊率)関係を提案しているが、誤差率を最小にするという条件で、K(水平震度) - P関係を一義的に決定し、これを(4)式で表わす。すなわち、下式による誤差の和を最小になるように(4)式のh, K₀を決定する。

$$\text{誤差の和} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{ti} - P_{oi}}{P_{ti}} \quad (5)$$

ここに、P_{ti}, P_{oi}はそれぞれ各地の推定震度K_i(データ：前出の物部および中村、表一1による)に対応する実験式並びに実際の木造建物全壊率である。nはデータ個数であり、上記文献では総数77件与えられているが、同一震度推定値に対するP_{oi}は、これを平均全壊率で表わし、ここではn = 32を用いている。データの幅は、K = 0.17~0.6, P_{oi} = 0~90.0%であり、前述の理由によりK, K₀はいずれも水平震度とする。

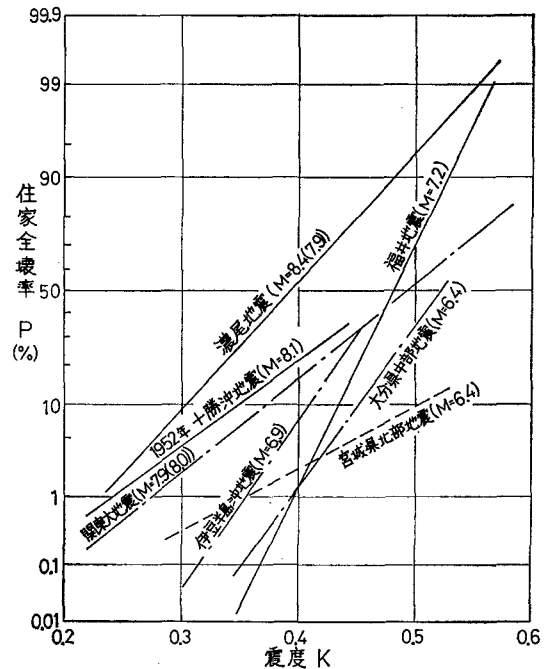
図一9は得られた実験式とそれに対する実際のK_i - P_{oi}のばらつきを程度を示したものである。ここに、hは7.55, K₀は0.49, そのときの誤差の和は-1.6である。なお、標準偏差σで表わせばσ = 1/(√2h)より、σ = 0.093



図一9 関東大地震時のP-K関係(中村、物部の資料、震災予防調査会報告、1925 a, c から算定)

となる。

図一10は、以上のようなK-Pの関係を既往の幾つかの地震について示したものである。ただし、図中の福井地震については、高橋(北陸震災調査特別委員会、1950)がまとめた関係であり、1962年宮城県北部地震(M=6.4)については、佐藤他(1962)の調査資料を、1952年十勝沖地震については、福富他(1954)の資料をそれぞれ上記のように著者らがまとめて示したものである。また、濃尾地震は大森が調査したものであるが、前記、物部(震災予防調査会、1925c)に示されている。さらに、1974年伊豆半島沖地震(M=6.9)、1975年大分県中部地震(M=6.4)は、望月、国井、松田、田村(1974, 1976)を上記と同様にして著者らが求めたものである。いずれも原資料における震度と全壊率の関係は大きくばらついているが、平均化してマクロにとらえれば、ほぼ図一10のように表わせる。



図一10 震度と木造住家全壊率の関係

図一10の震度と全壊率の関係は、地震によってかなり差異があり、この違いを物部はK₀とhで表わそうとした。いいかえれば、それぞれの地域での建物群の構造特性で説明しようと考えたわけであるが、著者らは、地震動の特性の違いをより強く感ずる。すなわち、図一10によれば、マグニチュードMが大きい地震ほど、低い震度(加速度)で高い全壊率の生ずる傾向が明らかに認められる。木造建物の全壊率が、主に地震動加速度の大小のみで定まるなら、このような傾向は表われず、時代とか

地域特性に関する傾向が、より強く反映されるはずである。特に建物構造の時代による変遷の影響が図上に表われるものと思われる。

Mの大きい地震における方が、小さい地震の場合と比較して、同一加速度時の全壊率が高いのは、主要動の継続時間が長いこと、および木造建物にとって不利な長周期成分が一般により多く含まれていることによると推察される。また、宮城県北部沖地震を除き、Kが0.5~0.6で全壊率が90~100%に達する傾向が図-10から認められる。

ところで、濃尾地震のMは図上に併記したように、8.4とも7.9ともいわれているが、他の内陸あるいはそれに近い大型地震に比べ、低い震度(加速度)で高い全壊率を示す度合が著しい。もし、Mが7.9ないしそれに近いとすれば、図-10の全体的傾向からみて、よりそのことを強く感ずる。関東大地震時の東京の震度が下町低地で0.2、山の手台地で0.1と、当時推測され、中村(震災予防調査会, 1925a)が意識的に加速度を引き下げて考えたこと、並びに物部(震災予防調査会, 1925c)が、震度を合震度と解釈したことなどが図-10の濃尾地震のK-P関係に由来するようと思われる。すなわち、濃尾地震のこの関係が、後の関東大地震の震度を低めに評価させる背景になったと解釈する。

なお、この点については、木造建物(住家)の全壊率(率)と主としてはそれに伴う圧死者の関係が地震動特性と密接に関係することから、濃尾地震と他の大地震の場合を比較することにより検討を加えている(望月、宮野, 1977b)。

ところで、前述したようにこの研究の大きな目的の一つは、比較的資料が豊富に残されている木造建物の被害(全壊)率分布から、その地震における地震動の強さを工学的に評価することであり、これが地震規模などをパラメータにして一般化しえれば、今後生ずるであろうところの地震に対し、極めて有力な資料となる。この木造建物の全壊率と地動の強さの関係を結びつけるものが図-10などに示した墓石などの転倒による震度調査資料である。

それ故、例えば、地震規模をパラメータにして、木造建物の全壊率と震央距離・地盤の関係が実験式などの型で得られれば、それぞれのタイプの想定地震に対する震央距離・地盤と震度の関係が、図-10など介して推測することがある程度可能となる。

著者らは、その第一歩として、1923年関東大地震における木造建物(住家)全壊率と震央距離・地形(地盤)の関係を求めた(松田、望月、宮野, 1977)。図-11a, b, はその例であり、それぞれ、a. 沖積平野(自然堤防、三角州)、b. 谷底低地と各種斜面と低地とを境する微高地におけるx(震央距離)-P(全壊率)の関係である。

また、7種の地形(地盤)に対するx-Pの関係(6)式における2つのパラメータA, Bを、表-3に示す。

$$P = A x^B \quad (6)$$

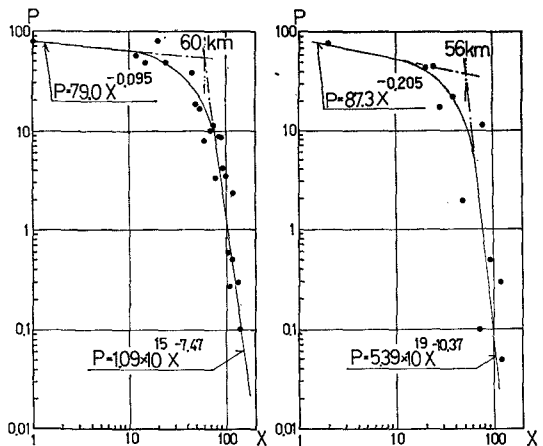
いずれの地形に対しても、原資料(震災予防調査会, 1925a)のPとxの間には、ばらつきはあるが、平均的にみれば、図-11a, b, 表-5のように表わせる。図および表から、震央に近い範囲(著者らは被害からみた

表-3 関東大地震の各種地形におけるx-P関係(6)式のパラメータA, Bの値

地 形	0 < x ≤ x _B		x _B (境界震央距離 (km))	x _B < x < 120 km *	
	A	B		A	B
沖積平野 (自然堤防, 三角州)	79.0	-0.095	60	1.09 × 10 ¹⁵	-7.47
谷底低地, 微高地	87.3	-0.132	56	5.39 × 10 ¹⁹	-10.37
海岸平野 (砂州, 浜堤)	54.0	-0.132	45	6.36 × 10 ¹⁴	-8.10
丘陵地, 台地, 斜面	87.8	-0.342	45	4.79 × 10 ¹³	-7.49
海成台地, 河成台地	66.0	-0.260	40	1.19 × 10 ¹¹	-6.06
沖積平野 (扇状地, 沖積錐)	34.4	-0.327	35	7.86 × 10 ⁷	-4.47
山地斜面			(10内 外)	6.54 × 10 ⁴	-3.26

注) x_B: 被害からみた震央圏の境界震央距離, x_Bを境界としてA, Bが変化する。

*: xが100~120km以遠では、全壊率は極めて少となるため、精度は低下すると思われる。



(a) 沖積平野(自然堤防, 三角州)と干拓地, (b) 谷底低地と各種斜面と低地とを境する微高地
図-11 各種の地形に対する震央距離x(km)と木造住家全壊率P(%)の平均的な関係の例(関東大地震)

震央圏と仮称する)とより遠方では、A、Bの値すなわち、図-11a、bの勾配が異なり、単一の指数関係では表現できない。なお、こういう震央は、金森他(1973)における測地学的断層モデルの相模トラフ沿いの長さ85kmの断層(線)を考えている。

これより、(6)式と表-3のパラメータを用い、各地形に対応するP-X関係を求め、図-9に示した関係、(4)式($h=7.55, K_0=0.49$)を用いれば、関東大地震級の想定地震に対する各地、各地形(地盤)上のおおよそその地震動の強さを推定することができる。

著者らは、このような手法を既往の他の幾つかの地震に用い、より一般化された地震動の強さを推定するための研究を現在、進めており、サイスミック・マイクロブローニング手法を確立するための基礎にしようと考えている。

5 まとめ

以上、この報告では、合震度、墓石の転倒と移動、墓石の転倒による推定震度とその解釈およびそれと木造建物の全壊率の関係について、幾つかの資料を示し、若干の考察を加えてきたが、ここに報告の結論的な内容を要約する。

(1) Westの公式による墓石の転倒からの推定震度を合震度と考えることは、震度を過小評価することになると推測される。

(2) 墓石の転倒率(スリップによる転落を含む)、移動率の大小は、その地点の加速度の大小と密接に関連すると思われ、一般に墓石による推定震度、被害の大きいところで、墓石の転倒率も高い。

(3) 関東大地震時の東京における墓石の転倒・移動率は山の手台地で高く、下町低地で小さい。すなわち、木造建物被害率とは逆の相関性をもっている。このことから、少なくともこの地震に関する限り、東京山の手台地の地震動加速度は、より軟弱な地盤より成る下町低地におけるよりも大きかったと推測される。

(4) (3)のように考えると、1855年安政江戸地震で震源に近い下町で土蔵の被害が多く、山の手で小さかったことが、そして、関東大地震では、それが逆になっている現象が説明付けられる。すなわち、土蔵のように極めて剛な構造物の被害は、共振というよりも、地震動加速度のより大きい地域で生じたと解釈される。

(5) 比較的古い地震における墓石などの調査においては、転倒加速度におよぼす法効果などが十分考慮され

ていたとは考えにくいから、ある値より大きい震度(例えば、0.3以上といった)は、比較的長周期の地震動加速度に対応するものと思われる。したがって、地震動特性あるいは地域によっては(特に硬質地盤において)、必ずしも最大加速度を示すものではないと推論する。

(6) 今後の墓石調査では、転倒・不転倒による推定震度の他に、墓石の落下・転倒率、摩擦係数なども調べ、総合的な検討から震度を推定する必要がある。

(7) 既往の幾つかの地震における震度と木造建物の全壊率の比較の関係によれば、同一震度(加速度)に対する全壊率は、地震規模(M)が大きいほど近く、Mが小さいほど高くなる傾向が認められる。

(8) (7)の比較および木造建物の全壊率と圧死者の発生率などの関係からみて、濃尾地震、関東大地震に対していわれてきた震度は、過小評価であると推測される。

(9) (7)から、地震の規模などによる震度と木造建物全壊率の関係の差異は、それぞれの地域での木造建物の構造特性の違いというよりも、地震動の特性(周期、主要物の継続時間など)により強く支配されていると考えられる。

(10) 地震規模などをパラメータにして、木造建物の全壊率と震央距離・地形(地盤)の関係が実験式などの型で得られれば、それぞれのタイプの想定地震に対する震央距離・地形(地盤)と震度との関係が、図-10などを介してある程度推定することができる。

(11) (10)の1ステップとして、1923年関東大地震における木造住家全壊率と震央距離・地形(7種)の関係の実験式を求めた。

(12) 上記、7種の地形における震災距離と全壊率の関係で、ほぼ共通的にみられる特徴は、震災距離がある範囲より小さい間は、距離による全壊率の低下が緩慢であるのに対し、それ以遠では全壊率が急速に低下することである。そして、上記の震災距離の境界付近を除けば、距離と全壊率の関係は、2つの指数関数でおおよそ近似できる。

(13) (11)、(12)より、(6)式と表-3のパラメータを用い、各地形に対応する関係を求め、(4)式に $h=7.55, K_0=0.49$ を代入すれば、関東大地震級の想定地震に対する各地・各地形上のおおよそその地震動の強さを推定することができる。

未尾ながら、関東大地震波の貴重な資料を使わせていただいた早稲田大学の那須・森岡両先生並びに地震調査記録の収集でお世話になった宇佐美籠夫東大教授に心からの謝意を表わします。

引用文献

- 石田勝彦・大沢胖
 1976 「震源特性を考慮した強震地動に関する研究 (その1・断層モデルの仮定と1966年Park-field地震の解析について)」『日本建築学会論文報告集』247号。
- 今村明恒
 1933 『地震学振動論・高等建築学第6巻』常盤書房。
- 大田外気晴・安藤治彦
 1977 「地盤種別と地震動の平均的特性」『第5回地盤震動シンポジウム資料集』日本建築学会。
- 表 俊一郎他
 1976 『1975年大分県中部地震の活動と被害に関する調査研究報告』。
- 大森房吉
 1900 『震災予防調査会報告』33号。
 1902 「On the Overturning and Sliding of Columns」『PUBLICATIONS of the Earthquake Investigation Committee in FOREIGN LANGUAGES』No. 12。
- 金井 清
 1941 「昭和16年7月15日長野地震の家屋被害について」『震災彙報』第19号, 第4冊。
 1969 『地震工学・大学講座土木工学18』共立出版株式会社。
- 金森博雄・安藤雅孝
 1973 「関東大地震の断層モデル」『関東大地震50周年論文集』東京大学地震研究所。
- 河角 広
 1973 『地震災害』共立出版
- 岸上冬彦・永田 武・宮村撰三
 1941 「昭和16年7月15日長野地震の統計的調査」『震災彙報』第19号, 第4冊。
- 佐藤泰夫・松田時彦・柴野陸郎
 1962 「昭和37年4月30日宮城県北部地震調査報告」『震災彙報』No. 29。
- 佐山 守
 1973 『安政江戸地震災害誌』東京都, 上巻, 下巻。
- 佐野利器・武藤 清
 1935 『家屋耐震並耐風構造・高等建築学第26巻』常盤書房。
- 震災予防調査会
 1925 a 『震災予防調査会報告』第100号, 甲。
 1925 b 『震災予防調査会報告』第100号, 丙の上。
 1925 c 『震災予防調査会報告』第100号, 丁。
- 恒石幸正
 1968 「1968年十勝沖地震による東北, 北海道地方の墓石の移動」『震災彙報』No. 46。
- 福富孝治
 1934 「昭和9年3月21日南伊豆強震調査報告」『震災彙報』第3冊, 6月。
- 福富孝治・田畑忠司・藤木忠美・金安公造
 1954 「墓石転倒, 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』。
- 北陸震災調査特別委員会
 1950 『昭和23年福井地震震害調査報告』。
- 松沢武雄
 1976 『地震の理論とその応用』東京大学出版会。
- 松田磐余・望月利男・宮野道雄
 1977 「関東大地震における木造家屋全壊率と震央距離・地形(地盤)の関係について」『第14回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集』。
- 松田時彦
 1968 「1968年十勝沖地震による青森県南部での墓石の被害」『震災彙報』No. 46。
- 村松郁栄
 1963 「震害分布と地盤の性質との関係について特に濃尾地方について, 濃尾地震激震地域の震度分布および地殻変動」『岐阜大学学芸学部研究報告・自然科学』。
- 望月利男・国井隆弘・松田磐余・田村俊和
 1974 「1974年伊豆半島沖地震調査報告」『土と基礎』Vol. 22, No. 202。
- 望月利男・国井隆弘・松田磐余・田村俊和
 1976 「大分県中部の地震調査報告」『土と基礎』Vol. 22, No. 218。
- 望月利男・小林計代
 1976 「単体の運動から地震加速度を推定するための研究—単体の動的挙動の解析」『日本建築学会論文報告集』第248号。
- 望月利男・宮野道雄
 1977 a 「東京における安政地震と関東大地震の被害についての一考察」『日本建築学会論文報告集』第256号。
- 望月利男・宮野道雄
 1977 b 「震度に関する若干の検討」『日本建築学会関東支部研究報告集』。
- 森岡敬樹

- 1976 「1923年関東大地震の地動」『第4回地盤震動シンポジウム資料集』日本建築学会。 Bull. Seis. Soc. Amer. 57
- 山原 浩 Hudson D. E.
1971 “Strong-Motion Instrumental Data on the San Fernando Earthquake of Feb. 9, 1971. Earthq. Eng. Res. Lab. Cal. Inst. Tech.
- 1976 「関東地震の記録」『第4回地盤震動シンポジウム資料集』日本建築学会。
- Cloud, W. R. & Trifunac, M. D.
1967 “Accelerograms-Parkfield Earthquake”.