墓石の転倒調査から推定した兵庫県南部地震の際の 神戸市およびその周辺での震度分布

ISOSEISMAL MAP OF THE HYOGO-KEN NANBU EARTHQUAKE IN AND AROUND KOBE CITY ESTIMATED FROM OVERTURNING OF TOMBSTONES

翠川 三郎*, 藤本 一雄**

Saburoh MIDORIKAWA and Kazuo FUJIMOTO

Field observations on overturning of tombstones during the Hyogo-ken Nanbu Earthquake was performed in and around Kobe City. The relation of geomorphological condition and geomorphometric measures (elevation and gradient) with the overturning rate of tombstones was examined quantitatively, and the empirical equations between the gradient and the overturning rate were proposed for each geomorphological condition. The distribution of the overturning rate in the disastrous area was estimated by the equations together with the geomorphological map. The distribution of the overturning rate was transformed into the distribution of peak ground velocity by using the relation derived from the observed peak ground velocity and the overturning rate of tombstones.

Keywords: *isoseismal map, the Hyogo-ken Nanbu Earthquake, overturning of tombstone, geomorphological condition, geomorphometry, peak ground velocity*

震度分布図, 兵庫県南部地震, 墓石の転倒, 地形条件, 地形計測, 最大地動速度

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震は阪神・淡路地域に大きな被害をもたらした。特に「震災の帯」と呼ばれる帯状の地域では甚大な被害が生じた。震災の帯を含む被災地域での地震動強さの分布を明らかにできれば、震源域およびその周辺での地震動強さについての知見を増やせるとともに、被災地域での構造物の被害を評価する上でも有用となる。

今回の地震では各機関により多数の強震記録が得られたが、被害の甚大な地域では強震記録はほとんど得られていない。したがって、計器観測の結果のみから被災地域での地震動強さの分布を知ることは非常に困難である。計器観測を補うものとして、以前より墓石の転倒調査が行われ、各地での地震動強さが推定されてきた¹⁾。しかし、神戸市のように都市化の進んだ地域では都市中心部に点在していた墓地は都市周辺部の大規模な共同墓地に集約されつつあり、都市中心部での調査地点の数

は限られることになる。このような限られた地点でのデータの空間的補間のみから震度分布のような面的な広がりを持ったデータに変換することには困難が伴う。

従来より地震動の特性は地盤の影響を大きく受けることが指摘され、これを評価する指標として地盤分類が用いられてきた²⁾。そこで、各地盤分類毎に墓石の転倒状況が整理できれば、各地盤分類での結果を同一の地盤分類を持つ地盤に適用して、墓石の転倒状況の面的分布を推定することができ、さらには震度分布を推定することが可能であろう。

本研究では、神戸市およびその周辺での地形分類データを作成し、地形条件と墓石の転倒率との関係を定量的に評価した。さらに、これらの関係にもとづいて、被災地域での墓石の転倒率の分布を求め、これを最大速度分布に変換して、神戸市での震度分布を推定することを試みた。

* 東京工業大学大学院総合理工学研究科
人間環境システム専攻 教授・工博

** 東京工業大学大学院総合理工学研究科
人間環境システム専攻 大学院生・修士
(工学)

Prof., Dept. of Built Environment, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng. Graduate Student, Dept. of Built Environment, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

図1 地形分類図

2. 地形データの作成

2.1 地盤特性と地形分類

地盤特性を評価するための地盤分類として、表層地質、地盤種別、地形分類などが用いられる場合が多い。これらのうちでは、地形分類がより有効であることが指摘されている³⁾。今回の地震でも特定の地形条件で被害が集中していることが指摘されている^{4)~6)}。

しかし、同じ地形条件であっても地盤構成に変化がみられ地盤特性にばらつきがみられる場合がある。例えば、同じ扇状地であっても、勾配が急で流速の大きい河川上流部では比較的粗粒の物質が堆積し、勾配が緩やかで流速の小さい下流部では細粒物質が堆積するため、勾配の大小によって地盤構成が変化していることが指摘されている⁷⁾。また、標高により河川の上流下流を表現することができると考えれば、標高が高いところには粒径の大きい物質が堆積し、標高が低いところには粒径の小さい物質が堆積するものと考えられる。

したがって、同一地形条件であっても、標高や勾配の大小により地盤構成が変化していることが考えられ、同一地形条件での地盤構成の相違を、標高あるいは勾配といった地形計測値を用いることによりある程度表現できるものと考えられる。そこで、本研究では、地盤分類として地形条件を用い、さらに標高や勾配の地形計測値も考慮することとした。

2.2 地形分類データの作成

地形分類データの作成には、土地条件図、明治時代の地形図、現行の地形図を使用した。土地条件図として国土地理院による縮尺2万5千分の1の地形分類図を用い、これに記載されている地形分類を数値化した後、斜面、台地・段丘、扇状地、緩扇状地、低地、自然堤防、天井

川沿いの微高地、砂州・砂堆、谷底平野・氾濫平野、後背低地の地形条件にまとめなおした。さらに、低地については、明治10年代の地形図⁸⁾に示されている海岸線よりも海側の地域を埋立地とし、最終的に11種類の地形条件に分類した。現在の海岸線については、地震後に国土地理院から刊行された縮尺2万5千分の1の地形図(緊急修正版)から読み取りを行った。

これら数値化された地形分類データはベクター(ポリゴン)データであるが、解析作業を容易にするために50mメッシュのラスターデータへと変換した。その際、1つのメッシュ内に複数の地形条件が存在する場合には、メッシュ内で占有面積が最も大きい地形条件がそのメッシュを代表するものとした。なお、本研究で対象とした地域は、経度方向で $135^{\circ}7.5' \sim 135^{\circ}22.5'$ 、緯度方向で $34^{\circ}35' \sim 34^{\circ}45'$ の範囲である。数値化された地形分類図を図1に示す。

2.3 数値標高モデルによる地形計測値

数値標高モデルは、等間隔の格子点での標高値を数値化したもので、本研究では国土地理院による「数値地図50mメッシュ(標高)」を用いた。これは、縮尺2万5千分の1地形図を経度方向および緯度方向に200等分して得られる各メッシュの中心点の標高値がファイル化されたものである。メッシュの大きさは約50mとなり、標高値は0.1m単位で表現されている。

この数値標高モデルを用いて、勾配を計算した⁹⁾。勾配の値(*grad*)は、緯度方向と経度方向の勾配を合成した(1)式により求めた。なお、(1)式において、 $u(m,n)$ は点 (m,n) の標高である。 Δx は格子間隔(50m)である。

$$grad = \sqrt{\{u(m+1, n) - u(m, n)\}^2 + \{u(m, n+1) - u(m, n)\}^2} / \Delta x$$

..... (1)

以上より、本研究で使用する数値データの各メッシュには、地形条件、標高、勾配といった属性が与えられていることになる。

表1 墓石の転倒率

地点名(住所)	転倒率(%)	墓石数	データの信頼度
服部霊園(豊中市広田町)	20	10000以上	C
瑞輪寺(豊中市中樫塚)	10	30	B
浄行寺(豊中市走井)	5	133	B
本泉寺(伊丹市伊丹)	25	約250	B
本興寺(尼崎市寺町)	4	約240	B
全昌寺(尼崎市寺町)	3	324	B
尾陽寺(伊丹市寺本)	80	約300	B
上田墓地(西宮市上田東)	10	約300	B
今里町墓地(宝塚市今里)	97	274	B
極楽寺(西宮市瓦林町)	90	約50	B
鳴尾墓地(西宮市上鳴尾町)	40	約1000	B
中山寺(宝塚市中山町)	65	約1000	B
本妙寺(宝塚市小浜)	6	約100	B
貝之助墓地(西宮市段上町)	60	約600	B
法性寺(宝塚市伊子志)	0	約70	C
浄願寺(西宮市津門泉羽町)	85	約350	B
平林寺(宝塚市社町)	30	約400	B
豊泉寺(西宮市広田町)	90	約150	B
海清寺(西宮市六瀬寺町)	65	34	A
清池谷墓地(西宮市奥昌)	60	約10000	A
西安寺(西宮市産所町)	90	約400	C
森貝墓地(西宮市郷免町)	90	約500	A
甲山墓園(西宮市甲陽園目神山町)	30	約4000	B
親王寺(芦屋市打出町)	98	約40	B
芦屋市霊園(芦屋市剣谷)	80	7000前後	B
三栄墓地(芦屋市三栄町)	80	約150	C
本庄墓地(神戸市東灘区深江北町)	95	1500-2000	B
西青木墓地(神戸市東灘区本山南町)	99	約130	B
安念寺田中墓地(神戸市東灘区甲南町)	95	約250	A
魚崎墓園(神戸市東灘区魚崎北町)	90	約1200	A
鬼塚墓園(神戸市東灘区住吉東町)	98	約300	A
野奇墓地(神戸市東灘区西岡本)	70	約300	B
光明寺墓地(神戸市東灘区岡本)	40	約200	C
住吉霊園(神戸市東灘区住吉台)	30	約3000	C
中勝寺(神戸市東灘区御影群家)	90	約250	B
御影霊園(神戸市東灘区御影山手)	5	約1500	A
石屋墓園(神戸市東灘区御影西平野)	85	約1500	B
善光寺(神戸市灘区桜ヶ丘町)	50	36	B
高羽墓地(神戸市灘区桜ヶ丘町)	70	約200	A
十善寺(神戸市灘区一王山町)	80	約90	C
福正寺墓地(神戸市灘区篠原南町)	90	約250	C
慶光寺(神戸市灘区篠原中町)	85	約60	B
善立寺(神戸市灘区大石北町)	98	約300	B
祥龍寺(神戸市灘区篠原北町)	2	約100	B
長峰墓地(神戸市灘区大石)	5	数千	B
春日野墓地(神戸市中央区中島通)	2	3000前後	B
追谷墓園(神戸市中央区堂徳山)	2	約3500	A
福德寺(神戸市中央区花隈町)	80	約40	B
安養寺(神戸市中央区楠町)	60	約300	B
阿弥陀寺(神戸市兵庫区中之島)	55	740	B
藤之寺(神戸市兵庫区兵庫町)	90	約200	B
馬場墓地(神戸市兵庫区馬場町)	80	約400	A
金光寺(神戸市兵庫区西仲町)	75	約150	B
真光寺(神戸市兵庫区松原通)	75	700-800	B
福嚴禅寺(神戸市兵庫区門口町)	80	約150	B
宝地院(神戸市兵庫区荒田町)	50	約80	B
福昌寺(神戸市兵庫区羽坂通)	95	約350	A
願成寺(神戸市兵庫区松本通)	99	約350	B
高松墓地(神戸市兵庫区高松町)	30	約400	A
石井墓地(神戸市兵庫区天王町)	0	約500	B
長田墓地(神戸市長田区西山町)	70	400-500	B
明泉寺(神戸市長田区明泉寺町)	10	約110	C
宝満寺(神戸市長田区東尻池町)	98	約90	B
常福寺(神戸市長田区大谷町)	40	約300	C
鷹取墓地(神戸市須磨区行平町)	95	約400	A
鶴越墓園(神戸市北区山田町)	3	約47000	A
妙法寺(神戸市須磨区妙法寺)	20	約80	B
須磨寺(神戸市須磨区西須磨)	20	約120	B
安養寺(神戸市垂水区塩屋町)	30	約150	A
舞子墓園(神戸市垂水区舞子陵)	11	約6500	A
長寿院(明石市市丸町)	90-95	500前後	C
安養寺墓苑(明石市鳥羽)	15	300-350	A

3. 墓石の転倒率と地形との関係

3.1 墓石の転倒調査

筆者らにより神戸市およびその周辺での墓石の転倒調査が95年1月19日から3月4日にかけて62地点の墓地に対して行われた¹⁰⁾。ほとんどの墓石の寸法は高さ75cm、幅・奥行き30cm程度でほぼ一定であることから、墓石の転倒率を調査した。調査の際には、平均的な大きさでない墓石は除外するよう心掛けた。その後も95年12月までに10地点の墓地に対して調査を追加した。

これら合計72地点での調査結果を表1に示す。調査範囲は神戸市を中心として東は大阪府豊中市から西は兵庫県明石市までの東西約50kmの範囲である。調査は地震直後に行われたものだけではないために、調査結果の信頼度は地点ごとに異なる。そこで、表には調査結果の信頼度を3ランクにわけて示してある。ランクAは著者らにより直接数えられた信頼度の高いもの、ランクBは墓石の傷跡や墓地の関係者の証言から推定されたものであるが信頼度の比較的高いもの、ランクCは信頼度のやや劣るものである。

神戸市およびその周辺における墓石の転倒率の分布を図2に示す。転倒率は半数以上の地点で50%以上の大きな値を示している。神戸市をはじめ、芦屋市、西宮市、などで、80%以上の転倒率を示す地点が存在する。これ

図2 神戸市およびその周辺における墓石の転倒率の分布

図3 地形条件と墓石の転倒率との関係

図4 各地形条件毎の地形計測値と墓石の転倒率との関係

らの高い転倒率を示す地点は、神戸市付近においては東北東－西南西方向に長い帯状に分布している。一方、山地部では転倒率は急激に減少し、数%以下の値を示している。

3.2 墓石の転倒率と地形分類の関係

転倒率が場所により大きく変化することから、地形条件と墓石の転倒率との関係について検討した。この地震の強震記録の解析¹¹⁾から、断層からの距離が5km程度以内では、地震動強さはほぼ飽和しており、距離減衰の影響はほぼ無視できるものと考えられる。そこで、震源断層¹²⁾から5km以内にある地点を対象とし、墓石の転倒調査全地点のうち49地点のデータを用いた。

図3は、地形条件と墓石の転倒率の関係を示したものである。各地形条件の並べ方は、左から右へと標高が高くなるように配置してある。標高が高い地形条件ほど転倒率が小さくなる傾向が認められ、斜面(山地に対応)では転倒率30%以下の低い値を示しており、転倒率0%の地点も存在する。一方、緩扇状地では転倒率95%以上の非常に高い値を示している。これは緩扇状地で被害が集中していること⁹⁾と調和的である。

低地において転倒率は10～98%とかなりばらついた値を示すが、これらのうち転倒率10%および30%の地点では液状化が発生しており、この2地点を除くと低地での転倒率は55～98%となる。以上より、地形条件毎に平均的な墓石の転倒率は異なることがわかる。ただし、同じ地形条件であっても、転倒率にはばらつきがみられることも読み取れる。

3.3 墓石の転倒率と地形計測値との関係

同一の地形条件でも転倒率にばらつきがみられることから、各地形条件毎に地形計測値と墓石の転倒率との

関係について検討をおこなった。図4は、地形条件毎の地形計測値と墓石の転倒率との関係を示したものであり、上段は標高と墓石の転倒率との関係、下段は勾配と墓石の転倒率との関係を表している。

斜面では、大規模な造成がなされた1地点(住吉霊園)を除くと、標高が高いほど、勾配が大きいほど転倒率が低くなる傾向がみられる。台地・段丘においても、芦屋市霊園、高羽墓地、三条墓地の3地点を除くと、地形計測値が大きくなるにつれて転倒率は減少している。なお、これら3地点は大規模な造成が行われたものだったり、崖地のの上縁部に位置していたりしている。

扇状地でも、1地点(十善寺)を除くと、地形計測値が大きくなるほど転倒率は減少する傾向がやや認められる。なお、十善寺は崖地斜面に位置している。

緩扇状地では、データが標高で0.1～9mおよび勾配で0.002～0.04の範囲に限定され、転倒率は全地点で95%以上の非常に高い値を示している。低地の場合、地形計測

図5 地形条件と建築物被害との関係

図6 各地形条件毎の地形計測値と建築物被害との関係

値が大きくなるほど転倒率は大きくなるようにもみえる。しかし、データが標高で0.8～4mおよび勾配で0.002～0.01の範囲に限られており、この範囲外での傾向を知ることはできない。なお、低地の液状化地点でのデータは除いてある。

以上から、各地形条件毎に地形計測値と墓石の転倒率の間にある程度の相関がみられることがわかる。しかし、墓石の転倒調査地点での地形計測値の分布が限られている場合があり、図4の関係を定量化することには困難が伴う。そこで、これを補うために、より広い地形計測値の範囲でデータが分布する建築物被害と地形条件との関係について検討することとした。

3.4 建築物被害と地形の関係

建築物被害分布として、中央開発による建築物被害マップ¹³⁾を使用した。この被害調査は、木造家屋および鉄筋コンクリート建屋(5～10階建RC造)を対象として、街区・町丁ブロック当たりの倒壊率の概数を算出して、被害のランク分けを行ったものである。本研究では、壁に割れ目が入る、木造住宅の倒壊率30%以下、木造住宅の倒壊率30%以上、木造住宅の倒壊率50%以上ないし鉄筋コンクリート造建物の被害多数の各被害ランクを、それぞれ、被害ランクA,B,C,Dと呼ぶことにする。

図5に、各地形条件における被害ランクの分布割合を示す。なお、検討には、墓石のデータの場合と同様に、震源断層から5km以内の被害データのみを用いた。図中の()内の数字は、各地形条件の被災メッシュ数(被害ランクA,B,C,Dのいずれかに該当したメッシュ数の総数)を示している。墓石の転倒率と同様に、被害は、斜面で小さく、緩扇状地で最大となっている。

同様に、地形計測値と建築物被害との関係について、図6に示す。上段は標高と建築物被害との関係を、下段は勾配と建築物被害との関係を各地形条件毎に示している。図の縦軸は、被害ランクの分布割合を示したものである。斜面では、勾配との相関はあまり明確ではないものの、標高が高くなるにつれて被害が小さくなる傾向が認められる。台地・段丘および扇状地では、標高が高いほど、勾配が大きいほど被害は減少している。緩扇状地では、標高および勾配の全範囲にわたって被害が大きい。低地では、標高が低くなるほど、勾配が小さくなるほど、被害がやや減少する傾向がみられる。

以上のように、建物の被害状況については、地形条件毎に地形計測値との関係がより広い地形計測値の範囲で比較的明瞭に認められる。そこで、この傾向を利用すれば、地形計測値が分布していない範囲における地形計測値と墓石の転倒率との関係を外挿できるものと考えられる。

3.5 地形条件毎の墓石の転倒率と地形計測値との関係式

前述の地形計測値と墓石の転倒率との関係を基本とし、地形計測値が分布していない範囲については、地形計測値と建築物被害との関係から類推して、地形計測値と墓石の転倒率との関係式を設定することとした。その際に用いる地形計測値については、勾配の方が墓石の被害との相関がやや高いようにみえるので、勾配を使用することにした。勾配の対数と墓石の転倒率の関係を線形的に表現できると考え、図7に示す関係を、斜面、台地・段丘、扇状地、緩扇状地、低地に対して設定した。

斜面については、勾配と墓石の転倒率との関係において、勾配が0.15程度以上で勾配が大きくなるほど転倒率

は小さくなっており、建築物被害では、小さな勾配では被害状況がほぼ同程度である。そこで、勾配0.15以下では転倒率は25%で一定とし、それ以上の勾配では、勾配0.7で転倒率が0%となる一次式を設定した。

台地・段丘の場合も、墓石の転倒率は勾配が大きくなるほど減少する傾向が認められ、建築物被害をみると、勾配0.04以下では、被害状況がほぼ同程度である。そこで、勾配0.04以下では転倒率80%として、それ以上の勾配では、勾配0.6で転倒率0%となる一次式を設定した。

扇状地でも、ばらつきはあるが、勾配が大きくなるにつれて墓石の転倒率が小さくなる傾向がやや認められ、建築物被害では、勾配0.04以下ではほぼ同程度の被害状況である。そこで、勾配0.04以下では転倒率85%で一定とし、それ以上の勾配では、勾配0.6で転倒率0%となる一次式を設定した。

緩扇状地では、墓石の転倒率および建築物被害状況がほぼ一定であることから、転倒率は95%で勾配によらず一定とした。低地の場合、勾配が大きくなるにつれて転倒率は大きくなるが、勾配0.01以上では、建築物の被害状況がほぼ同程度である。そこで、勾配0.01以上では勾配によらず転倒率は90%で一定とし、それ以下の勾配では、勾配0.001で転倒率75%となる一次式を設定した。なお、天井川沿いの微高地には3地点しか該当しなかったが、転倒率は85～90%といずれも高い値を示しているため、転倒率は一律90%とした。

図7に示した関係を見ると、斜面、台地・段丘、扇状地、緩扇状地の順に転倒率は大きくなっており、この順で地盤が揺れやすくなることを示唆している。このことは既往の地形と地盤の増幅率の関係と調和的であり¹⁴⁾、比較的浅い地盤構造の影響が反映されているものと考えられる。また、勾配が大きくなると転倒率が小さくなることも、勾配が大きくなるほど堆積層が薄くなると考えれば説明できる。しかし、低地に比べ緩扇状地で転倒

率が大きいことや低地では勾配が非常に小さくなると転倒率が減少する傾向がみられることは、既往の地形と地盤の増幅率の関係と調和的ではない¹⁴⁾。

緩扇状地は海岸線から低地をはさんである程度離れた場所に位置している。また、一般に海岸線に近づくにつれて勾配は小さくなる。したがって、低地に比べ緩扇状地で転倒率が大きいことや、低地では勾配が非常に小さくなると転倒率が減少する傾向にあることは、海岸線からある程度離れた地域で転倒率が大きいことを示しているものである。

震度Ⅶの帯が発生した原因として、深い地盤の不整形性の影響であることが指摘されている。例えば、三宮を南北に横切る地盤断面での地震動シミュレーション結果¹⁵⁾によると、地盤が急激に浅くなる山側端部から水平に伝播する回折波と堆積層を鉛直に上昇してくる実体波が重なり合うために、旧海岸線から1～2km内陸で地震動の振幅が増大する。

このことは、海岸線からある程度離れた地域で転倒率が大きいことに対応し、低地に比べ緩扇状地で転倒率が大きいことや、低地では勾配が非常に小さくなると転倒率が減少する傾向にあることを説明するものである。したがって、図7に示した関係は、浅い地盤構造および深い地盤構造の影響によって定性的には説明できるものであり、対象地域では妥当な結果を与えるものと判断できる。

4. 神戸市域での最大速度分布の推定

各地形条件に対して設定した地形計測値と墓石の転倒率の関係式により、震源付近での墓石の転倒率の分布を得ることができる。こうして得られた各地での墓石の転倒率を地震動強さに換算するために、岡田・鏡味(1991)によるパルナラビリティ関数¹⁶⁾を参考として、換算式を

図7 各地形条件の勾配と墓石の転倒率との関係式

図8 最大地動速度と墓石の転倒率との関係

表2 強震観測点と付近の墓地

強震観測点	地形条件	最大速度	付近の墓地	地形条件	転倒率
鷹取駅	緩扇状地	138cm/s	鷹取墓地	緩扇状地	95%
神戸海洋気象台	台地・段丘	90cm/s	馬場墓地	台地・段丘	80%
			安養寺	台地・段丘	60%
西明石	台地・段丘	39cm/s	安養寺墓園	台地・段丘	15%
本山第一小学校	台地・段丘	77cm/s	野崎墓地	扇状地	70%
福池小学校	緩扇状地	134cm/s	西青木墓地	緩扇状地	99%

図9 神戸市およびその周辺での最大速度分布

設定することとした。彼らは、震度Ⅰと墓石の転倒率 V_r の関係を(2)式の正規分布関数で示している。

$$V_r = 1/(\sqrt{2\pi} \cdot 0.47) \cdot \int_0^I \exp\left[-(I' - 5.63)^2 / (2 \cdot (0.47)^2)\right] \cdot dI' \quad \dots\dots (2)$$

この式によれば、震度5.5(震度ⅤとⅥの境界)で転倒率は50%弱となる。

墓石のような単体が単純な回転運動で転倒すると考えると、最大速度振幅が転倒の条件を与えることが指摘されている¹⁷⁾。また、震度は、比較的高い震度のレベルでは最大地動速度と相関が高いことも指摘されている¹⁸⁾。そこで、震度と最大地動速度との関係式¹⁸⁾を用いて、(2)式から最大地動速度と転倒率の関係を求めてみると、図8の点線の関係が得られる。線が2本あるのは、震度と最大地動速度の関係にある幅があるためである。

今回の地震で得られた強震記録¹⁹⁾、²⁰⁾および余震観測記録から推定された本震地動²¹⁾の最大速度値と墓石の転倒率との関係を図8にプロットすると、白丸のようになる。これらは2本の破線の間に分布している。表2に用いた地震観測点とその付近の墓地でのデータの一覧を

示す。

最小2乗法により、これらのデータから、墓石の転倒率を最大速度の対数の正規分布関数にフィッティングさせた。得られた結果は(3)式であり、図に実線で示す。最大地動速度34cm/s、63cm/s、118cm/sがそれぞれ転倒率10%、50%、90%に対応している。

$$V_r = 1/(\sqrt{2\pi} \cdot 0.21) \cdot \int_0^{\log V} \exp\left[-(\log V' - \log(63))^2 / (2 \cdot (0.21)^2)\right] \cdot d(\log V') \quad \dots\dots (3)$$

以上より、地形条件毎の地形計測値と墓石の転倒率との関係式から墓石の転倒率の分布を求め、これに上述の墓石の転倒率と最大地動速度の関係をを用いて最大地動速度分布を推定した。なお、墓石の転倒調査データがない埋立地については、ポートアイランドや東神戸大橋での観測値¹⁹⁾を参考にして、一律90cm/sとした。自然堤防や砂州・砂堆では、地盤の増幅度が三角州性低地と扇状地の中間の値をとること¹⁴⁾から、低地と扇状地で推定される最大地動速度の中間をとって、100cm/sとした。

推定された神戸市域での最大速度分布を図9に示す。

山地部では最大速度50cm/s以下の値を示し、海側に向かうほど最大速度は大きくなり、被害の甚大だった震災の帯では最大速度140cm/s程度と推定される。さらに海側へ向かうと、最大速度は次第に小さくなり、埋立地あるいは低地の海岸付近では100cm/s以下となる。

気象庁発表による震度7の地域と推定された最大速度分布とを比較すると、神戸市長田区から芦屋市西部にかけての地域では、最大速度値100cm/s強以上の地域と震度7の地域が概ね対応している。しかし、芦屋市東部から西宮市西部の震度7の地域では、最大速度値は80-100cm/s程度とやや小さい。ただし、前述の建築物被害マップ¹³⁾をみると、芦屋市東部から西宮市西部の震度7の地域での被害は、他の震度7の地域に比べて小さく、推定された最大速度分布と調和的である。これらのことから、本手法により推定された最大速度分布は、震度7の分布や建築物被害分布を大局的には説明しているものと考えられる。

5. 結論

神戸市およびその周辺での墓石の転倒調査結果に基づいて、兵庫県南部地震での墓石の転倒率と地形条件および地形計測値の関係を定量的に評価し、地形条件および地形計測値と墓石の転倒率との関係を定めた。さらに、墓石の転倒率と最大地動速度の関係式を設定して、最大速度分布を推定した。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 地形条件と墓石の転倒率との関係を検討した結果、緩扇状地において最も被害が大きく、標高が高い地形条件ほど被害は減少する傾向があることがわかった。
- 2) 地形計測値と墓石の転倒率との関係を検討した結果、斜面、台地・段丘、扇状地では標高および勾配が大きくなるほど被害は小さくなり、緩扇状地では地形計測値の全範囲にわたって被害が大きく、低地では標高および勾配が大きくなるにつれて被害が大きくなる傾向が認められた。
- 3) 推定された最大速度値は、緩扇状地およびその周辺において100cm/sを越え、それよりも山側では急激に、海側ではゆるやかに減少し、震度7の分布や建築物の被害分布と調和的な分布が得られた。

参考文献

- 1) 大森房吉：明治24年10月28日濃尾地震に関する調査，震災予防調査会報告，第28号，pp.79-95，1899.
- 2) 土田肇・他3名：各種地盤における平均応答スペクトル，港湾技研報告，Vol.12，No.4，pp.171-199，1973.
- 3) 翠川三郎・松岡昌志・作川孝一：1987年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価，日本建築学会構造系論文報告集，第442号，pp.71-78，1992.
- 4) 石川浩次・溝口昭二・小野諭：神戸市街地の帯状被害と地盤，土と基礎，Vol.44，No.2，pp.38-41，1996.
- 5) 糠塚昌文・大和田清隆：阪神・淡路大震災における家屋被害と原地形，シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集，pp.173-179，1995.
- 6) 関口辰夫・他4名：兵庫県南部地震の災害現況図と地形特性について，「1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会」記録，pp.53-54，1995.
- 7) 島博保・奥園誠之・今村遼平：土木技術者のための現地踏査，鹿島出版会，pp.45-50，1982.
- 8) 清水靖夫：明治前期・昭和前期 神戸都市地図，柏書房，1995.
- 9) 野上道男：細密DEMの紹介と流域地形計測，地理学評論，Vol.68 (Ser.A)，No.7，pp.467，1995.
- 10) 藤本一雄・他3名：1995年兵庫県南部地震の際の墓石の転倒調査 その1 墓石の転倒率の分布および地形条件との関係，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.101-102，1995.
- 11) Midorikawa, S. et al. : Attenuation of Peak Horizontal Acceleration and Velocity Observed during Recent Large Earthquakes in Japan, Proceedings of the International Workshop on Site Response, Vol.2, pp.201-210, 1996.
- 12) Sekiguchi, H. et al. : Minute Locationing of Fault Planes and Source Process of the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe), Japan, Earthquake from the Waveform Inversion of Strong Ground Motion, Submitted to J. Phys. Earth., 1995.
- 13) 中央開発株式会社：1995年兵庫県南部地震阪神大震災災害調査報告書，1995.
- 14) 松岡昌志・翠川三郎：国土数値情報を利用した地盤の平均S波速度の推定，日本建築学会構造系論文集，No.443，pp.65-71，1993.
- 15) 林康祐・川瀬博：1995年兵庫県南部地震における神戸市中央区の地震動評価，日本建築学会構造系論文集，No.481，pp.37-46，1996.
- 16) 岡田成幸・鏡味洋史：震度による地震被害系統評価のためのバルナラビリティ関数群の構成，地震2，Vol.44，pp.93-108，1991.
- 17) 石山祐二・山口修由：地震動による物体の転倒に関する研究（転倒条件の検討と提案），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.825-826，1981.
- 18) 翠川三郎・福岡知久：気象庁震度階と地震動強さの物理量との関係，地震2，Vol.41，pp.223-233，1988.
- 19) 日本建築学会：1995年兵庫県南部地震強震記録資料集，1996.
- 20) 香川敬生：平成7年兵庫県南部地震における関西地震観測研究協議会の観測記録についての考察，第14回若手地震工学研究者の会セミナー 講演梗概集，pp.111-121，1995.
- 21) 川瀬博・他3名：余震観測記録に基づく兵庫県南部地震時の神戸市東灘区における本震地動の推定，日本建築学会構造系論文集，No.476，pp.103-112，1995.

(1996年5月8日原稿受理，1996年7月25日採用決定)