

# 跳躍現象から推定される断層近傍での強いゆれ

西澤 修<sup>1)</sup>・佐藤 隆司<sup>2)</sup>・杉原 光彦<sup>1)</sup>

## 1. 被害の原因は地震波である

震災の原因は、地震の「波」である。建築物の倒壊、地割れ、地盤の液状化、山崩れなどはすべて地震波が引き起こした結果である。津波を除けば、地震の防災対策や災害予測は地震時の強いゆれの評価から始めなければならない。地震に伴って地表に現れた変位や明瞭なずれが見られた場所と実際の被害分布との間に単純な対応関係があるわけではない。淡路島で見られた野島断層でも、断層のすぐそばにあった家が倒壊をまぬがれた例も多い。逆に地表では断層が確認できなくても、建物の倒壊のひどい地域もあり、地表のいわゆる「活断層」だけで地震災害を論じることはできない。重要なのは地下の断層からどのような波が出たのか、その波がどうして特定の地域に大きな被害をもたらしたかということである。

地表に見られる活断層からはその周辺で予想される直下型地震の大きさや頻度についての大まかな目安が得られるが、どの場所が著しい被害を受けるかといった防災上の細かい問題については答えることはできない。地震を引き起こす断層の位置と地盤や地形が地震波に与える影響を明らかにすること、強い地震波が発生するメカニズムを知ることがより重要である。

## 2. 断層周辺の強震動

直下型地震では地下の震源断層から強い震動が発生し、建物が瞬時に倒壊するような被害をもたらす。現在では世界中を覆う地震計のネットワークによって大地震の波をとらえることができ、震源断層で生じた破壊の様子を詳しく推定できるようになっ

ている(菊地, 1995)。ところが、震源断層近傍で発生する波は、断層で生ずる破壊の細かな形態に支配されているらしく、単純な断層モデルでは説明できない波も混じっている(入倉, 1994)。震源から遠く離れた観測点での地震波からは断層のこうした細かい挙動はわからない。断層近傍での波を見るためには、震源近傍での観測が必要である。強い地震動に対しても振り切れずに記録することのできる強震計は、近年かなりの密度で日本各地に配置されているがまだ十分ではない。大きな地震は稀であるから、もし大地震の際に震源近傍で強震記録が得られれば非常に貴重なデータとなる。今回の地震では神戸側のいくつかの地点で強震記録が得られている。

震源のごく近傍での強震波形観測は、このように偶然を期待するしかないのが実状である。したがって多くの場合、地震時に生じたさまざまな現象によって震動の強さを推定することになる。地震に伴う跳躍現象を調べるのは強震動を受けた範囲や大きさ、およびその特性についての手がかりを得るためである。

## 3. 地震時に見られる跳躍現象

地震時に見られる跳躍現象の例は翠川(1994)にまとめられている。跳躍現象が生じるのは鉛直方向の加速度が重力加速度(1 g=980 gal; galは加速度の単位 cm/s<sup>2</sup>)を越えた証拠であるという解釈もあるが、それほど大きな加速度は必要ないとか、水平方向の震動だけでも跳躍現象は起こりうるという説もある(Bolt and Hansen, 1977; Ohmachi and Midorikawa, 1992)。鉛直方向の最大加速度の記録が1 gを越えることは特別めずらしいことではない。1979年の北米インペリアルバレー地震(マグニチュー

1) 地質調査所 地殻熱部  
2) 地質調査所 環境地質部

キーワード: 1995年兵庫県南部地震, 跳躍現象, 強震動, 跳び石

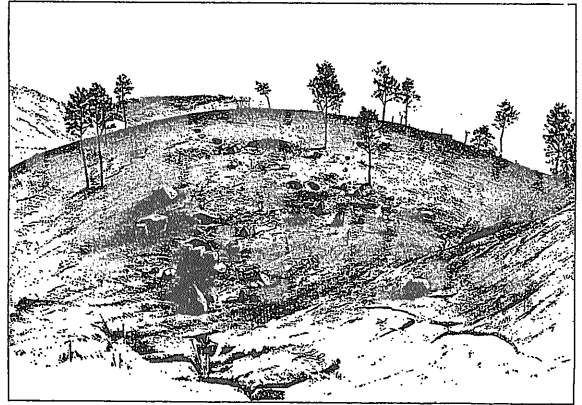
ード6.6)の際に、エルセントロでは1705 galが記録されている(Archuleta, 1982). 固い地盤で数百 gal程度のゆれが記録されれば表層地盤の増幅効果により、鉛直方向の加速度が1 gを越えることは十分に起こり得る. 今回の地震では神戸(神戸海洋気象台)での鉛直方向の最大加速度は300 galを越しているのので、鉛直方向の加速度が1 gを越える場所があってもおかしくはない.

跳躍現象でよく話題にされるものに「跳び石」がある. これは地中に少し埋まっていた石が跳び出てくる現象で、数多くの報告例がある. 第1図は有名な跳び石の図で、1897年のインドのアッサム地震のものである(Oldham, 1899). このほか、家屋や石臼、自動車などの跳躍現象が報告されている(翠川, 1994).

Umeda (1992)は1984年の長野県西部地震やその後のいくつかの地震における跳び石調査(伊藤ほか, 1985; Umeda et al., 1987)から、震源近くの最初に破壊が生じた場所では周囲に多数の細かい割れ目が発生し、このとき高周波が発生するために跳び石が生ずると考えた. さらに彼は、跳び石が現れる震源近傍では周囲が完全に破壊されているため余震が発生しにくく、余震空白域が現れるとし、これを地震のブライトスポットと名付けた. いっぽう Iio and Yoshioka (1992)は長野県西部地震での跳び石の再調査の結果から、跳び石が現れる範囲は伊藤や梅田らが報告した領域よりも広いことを指摘している.

断層はせん断型クラックで近似されるが、このモデルでは破壊はある大きさになるまではゆっくりと進み、以後急速に割れ目が広がる. Kato et al. (1994)による岩石のすべり実験では、すべりの始まる部分で地震動は弱く、急速なすべりが通過する部分では地震動が大きくなる. この場合、強い地震動は断層で急激な破壊が発生する場所、つまり割れ目が高速で通過した場所の周囲で観測される. 割れ目の先端が高速で移動した部分については、遠方で観測された地震波を解析することにより、その場所や大きさを決めることができる(菊地, 1995).

このように、跳び石などの跳躍現象が現れた場所が地下の震源断層や地表の活断層、本震、余震分布とどのような位置関係にあるかを把握することは重要である. これはまた、地震における強震動発生のメカニズムを明らかにする手がかりともなる. 我々



第1図 インドアッサム地震で報告された跳び石の図. Oldham (1899)より.

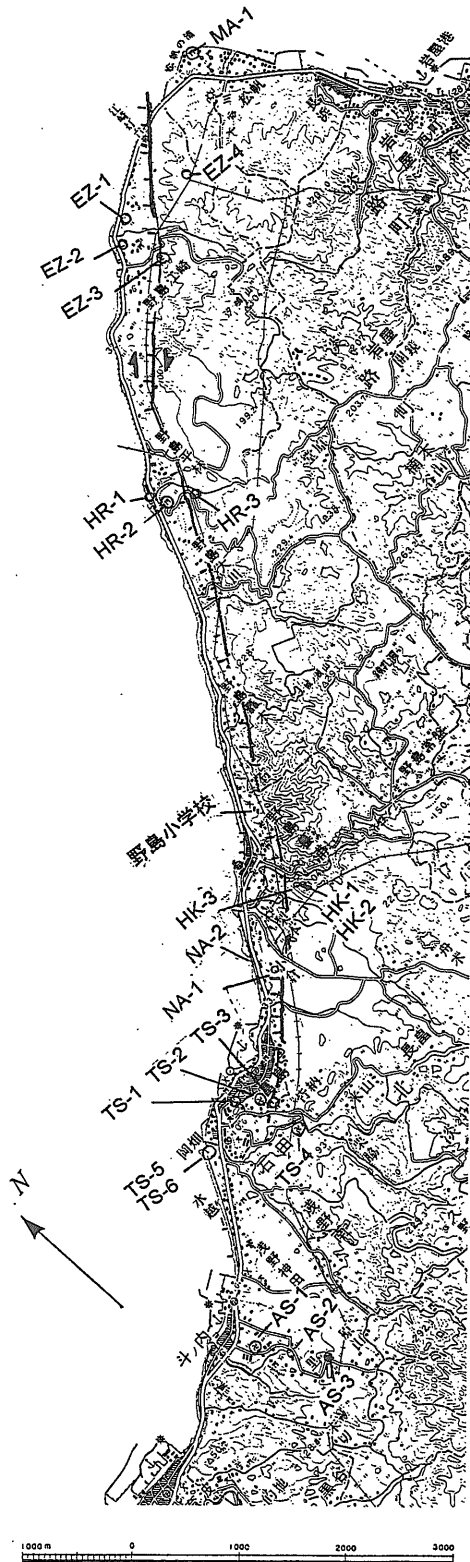
は地震発生後に淡路島北部で数回にわたって地震に伴う跳躍現象の調査を行った. 墓石など石造物の転倒についての調査は地震発生後10日目から4日間程度なので詳しい調査を行うことはできなかったが、墓石や神社の狛犬、石碑などの転倒状況と跳び石についてのいくつかの興味ある現象を見つけることができた.

### 3.1 墓石や狛犬の転倒

もっとも単純な墓石の転倒条件は、角柱に水平力が加わって傾き、重心の位置が角柱の底面からはずれたときである(工藤, 1987; 大崎, 1985). 転倒するときの力は墓石の幅と高さの比で決まるが、国内で用いられている標準的墓石について、単純な水平力で転倒する条件は水平加速度が450 galを越した場合である. 気象庁震度階では墓石の転倒が始まるのは震度5からとなっている. しかし、今回の調査結果によると墓石が単純な水平力だけで転倒したとは考えにくい.

墓石の転倒状況の調査は第2図に示した以下の地点で行った. 野島江崎3ヶ所(EZ-1, EZ-2, EZ-3), 野島平林1ヶ所(HR-2), 野島養浦(ひきのうら)梨本地区1ヶ所(NA-1), 富島(としま)5ヶ所(TS-1, TS-2, TS-4, TS-5, TS-6), 浅野3ヶ所(AS-1, AS-2, AS-3), このほか一宮町上条でも行った.

写真1は梨本の変電所近くNA-1で見られた七体地蔵の転倒状況である. 地蔵尊が据えつけられた台座の高さは約30 cmで、通常の横ゆれでは説明できないほど遠くに倒れており、地面を転がった痕跡が



第2図 調査地点

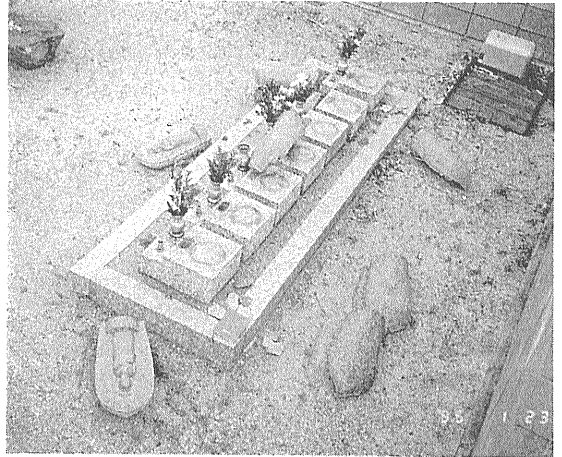


写真1 七体地藏の跳ぶように散らばった転倒(NA-1).



写真2 五輪塔の倒壊。高さ約90 cmの台座から水平距離170 cmの地点まで跳んでいる(EZ-1)。

見られない。このように、水平方向に相当離れた場所に倒れている墓石などの石造物は、野島江崎から浅野までの間の断層から500 m以内の場所でかなり多く見られる。中には、相当な飛距離を示しているものがある。写真2の五輪塔の場合、斜め45度方向に屋根の部分が放り上げられたとすれば、鉛直および水平方向におよそ3 m/s程度の初速度が必要となる。

富島地区の断層の直上の寺ではほとんどの墓石が倒れてしまっていた(写真3)。ここでは、四面を階段状にした場所に置かれた墓石のほとんどが落ちてしまっている。

地表の断層と墓石の転倒状況の関係を見るため、我々は墓誌の転倒の比率を調べた。墓誌は、横幅60 cm、高さ55 cm、厚さ10 cm程度の石のプレートを立てたもので、プレートは深さ2 cm程度の深さでふたつの台座に固定されている(写真4)。墓誌

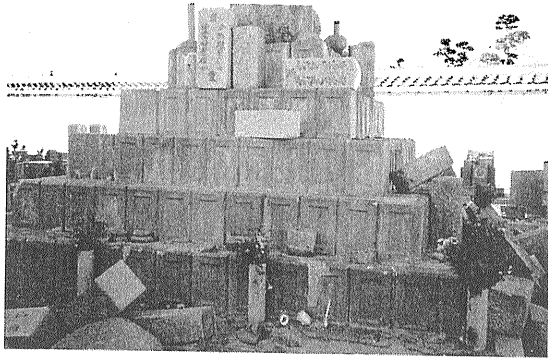


写真3 断層直上の寺での墓石の転倒(富島・生福寺 TS-2)。すべての墓石が完全に転倒している。



写真4 墓誌と墓石の転倒。墓石はかなり遠くに転倒しているが、墓石の右側の墓誌は倒れていない(EZ-2)。

第1表 墓誌の転倒状況

地点	記号	断層からの距離	A: 直立	B: 傾斜	C: 転倒	総数
野島江崎			%	%	%	
海岸	EZ-2	西へ約400 m	54	23	23	13
野島平林						
海岸	HR-2	西へ約300 m	50	0	50	10
富島						
海岸	TS-5,6	西へ約600 m	49	5	46	39
生福寺	TS-2	ほぼ直上	0	0	100	12
本円寺	TS-4	東へ約400 m	55	6	39	18
浅野						
斗ノ内大池	AS-3	地表断層なし	20	0	80	10

このことから、東側の浅野断層沿いの地下に本震に関連した断層があるのではないかと想像されるが、佐藤・杉原(1995)による地殻変動調査では、断層間のくいちがいは水越撓曲の側だけに観測されるため、地形あるいは地下構造の影響で地震波が強められたためであろう。

墓石の転倒には横ゆれだけでは説明できない部分があり、野島断層近傍で強いたゆれの生じていることが推測される。いっぽう、断層から離れた南側の一宮町上条では転倒した墓石はほとんど台座のそばに落下しており、単純な横揺れで説明できそうである。調査は地震後10日以上経って行ったため、被害の少ない地域では一部の墓石が位置を変えられており正確な調査ができなかった。墓石のような単純な構造物の転倒は、ゆれの強さを推定する上で建築物より解釈が容易であるので、地震後できるだけ早い機会に調査すれば貴重なデータとなる。なお、神戸側の墓石や石造物の転倒については野村・川崎(1995)による詳細な調査があり、被害分布図との一致が認められている。

野島平林の貴船神社(HR-2)では本殿前の左右に配置された狛犬がそれぞれ逆方向に跳んでいた。狛犬は台座を含めて同じ形状のものを左右に配置するので振動の様子は互いに大きく違わないはずである。したがって、それぞれが逆方向に跳んでいることは、台座からの落下が横ゆれだけで生じたものでないことを示している。

はほとんど同じ大きさや構造であるので、転倒の状況を比較するのに具合がよい。一見不安定に見えるが、墓石よりも安定な場合が多い。かなりの数の墓誌が、台座が動いた形跡のないまま倒れている。これは、倒れる際に台座にかかることなく墓誌が直上に跳び上がり、台座からはずれたと想像される。台座にしっかり固定された墓誌の多くは倒れていないので、墓誌が横ゆれだけで倒れたとは考えにくい。

いくつかの地点における墓誌の転倒率を第1表に示す。Aは倒れなかったもの、Bは倒れかかったもの、Cは完全に倒れたものである。

第1表によると野島断層に近いほど墓誌の転倒率が高く、断層沿いで地震波が強かったことを示している。富島より南の浅野地域では海岸から東に行くほど墓石全体の転倒率が高くなっている。斗ノ内大池付近(AS-3)では多くの墓石が転倒している。

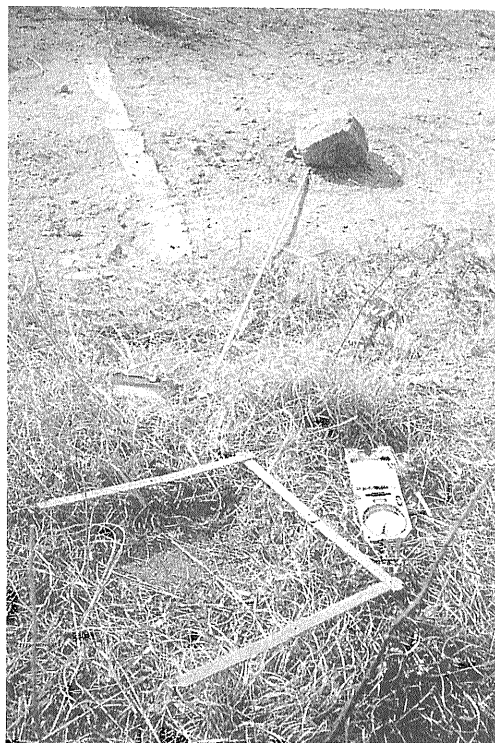


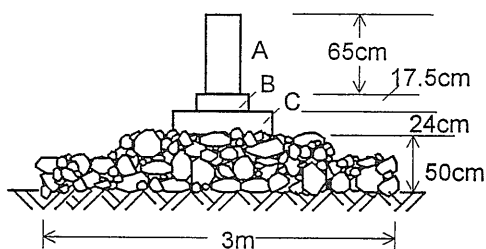
写真5 野島平林で見られた跳び石。手前のソケットからはずれてとび出し、土手の中腹でバウンドしたあと道路に転がったと思われる(HR-3)。

貴船神社から東に約200 m離れた位置では、断層の右横ずれと東側隆起がそれぞれ1.7 m, 1.3 m となっており(栗田ほか, 1995), 野島断層沿いではもっとも大きな変位が観測されている。左側の狛犬について飛距離を調べたところ、高さ約1 mの台座から80 cm 跳んでいた。また、二段めの台座は両方とも一段めの台座に対してN23°E方向に約10 cm 水平移動しているが、この方向はこの付近での野島断層の走行とほぼ一致する。ずれるときに下の台座を傷つけた痕跡が見あたらなかったことから、二段めの台座は鉛直方向に持ち上げられるように移動したのであろう。二段めの台座は一段めの台座に対し、相対的に断層による地面の変位と同一方向に移動している。断層の変位運動で二段めの台座が移動したとすると、二段めは断層近傍での地面の変位に追従して跳ね上げられるように移動したことになる。

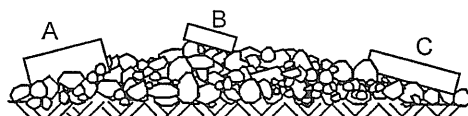
### 3.2 跳び石

野島断層沿いでは、野島平林の道路脇に跳び石が

倒壊前の石碑(想像図)



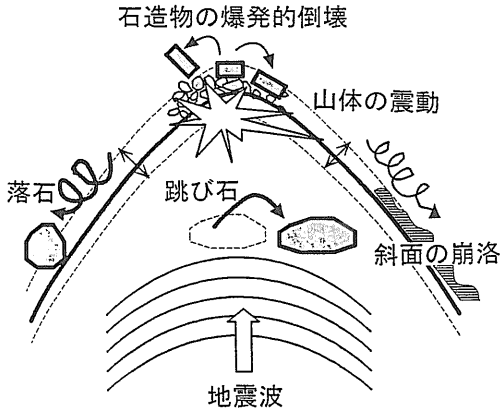
倒壊後 ←1.3m → ←1.8m →



第3図 倒壊前後の石組と石碑(HK-2)。

発見された(写真5)。この付近は野島断層の変位量が水平・鉛直とも最大の場所である。この石は大きさが30 cm×30 cm×25 cm程度で60 cmの落差の土手の中腹でいったんバウンドした形跡が残っている。石が埋まっていたソケットの深さは1~2 cmである。この付近では他の場所にも跳び石が見られるが、跳んだ方向に規則性はない。野島江崎の桃林寺付近では石がわずかに動いた痕跡が見られるが、跳び石といえるものではない。ここでは送電線の鉄塔の真下を野島断層が走ったため、鉄塔の一部が曲げられた。断層変位量は右横ずれ1.3 m, 東側隆起0.4 mで、鉛直変位量は野島平林ほど大きくない。

野島藁浦から野島常盤に至る道路の右側に三等三角点「野島」(104.1 m)があるが、三角点西側の尾根の先端に立っていた石碑が爆発的に崩壊した跡が見られた。ここにはもともと第3図のような二段の石組の上に三段に積まれた石碑が立っていたものと思われる。石碑は下の石組もろとも壊れ、約4 m四方に飛び散っている。石碑は稜線にそって跳び、最上段は北西、最下段は南西の方向に、それぞれ130 cm, 180 cmの間隔で散らばっている。倒壊した石組の両側にN20°W~N25°Wで稜線にほぼ平行な地割れが広がり、幅のもっとも広いところは10 cm以上で深さは50 cmである。ここでは第4図のように、地震波が山体によって増幅され、山頂で非常に大きな振幅となって、爆発的に石組を破壊したものである。このように地下からの地震波は



第4図 山体の影響によって地震波が増幅され石組と石碑が倒壊した。

山の頂上にエネルギーを集めるため、山頂では非常に大きな振幅のゆれとなる。

写真6は三角点「野島」の斜面で発見された跳び石である。石の大きさは35 cm×45 cm×75 cmで90度回転して、75 cm 移動していた。石の周囲には石がずれて移動した形跡がなく、これが跳びはねるように回転して移動したことを示している。すぐそばで落石があり、1 m 程度の扁平な石が8 m 程度斜面を転がっていた。この近くには他にも落石あとがあり、落石による衝突で樹皮がはがされているのが確認された。

このように跳び石の発生には山体による地震波の増幅作用が関係しており、山頂での地割れ、跳び石、落石は互いに関連した現象と考えられる。こうした強震動によって引き起こされた一連の現象は、大きな変位振幅によるものと思われる。大きな変位振幅が生じるためには加速度の大きさだけでなく周波数も関係するが、これについては次節で述べる。

跳び石が発見された三角点の北東の野島小学校東側の山では、斜面の崩落が見られる(写真7)。斜面崩落は、表土を掃くように生じている。これも山体による地震波の増幅作用による。

#### 4. 強振動と震源過程

第5図は神戸海洋気象台における加速度型強震計の波形である(綱纒, 1995a; 強震速報 No. 46)。加速度記録では周期1秒程度の大振幅の波が十数秒続く。速度記録ではこの波は最大80 cm/s 程度の



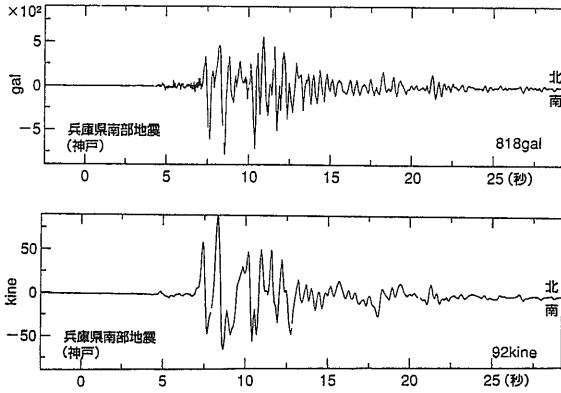
写真6 三角点「野島」にいたる山の斜面(HK-1)で見つかった跳び石。



写真7 北淡町野島小学校裏の山に見られる斜面崩落。

大きさである。震源のごく近傍ではこのような周期1秒程度のパルス状の波が観測されることが、1966年の米国パークフィールド(Parkfield)の地震で明らかにされている。Aki (1968)は地表に現れた断層から80 m の距離で観測された加速度波形(第6図の最上段)をもとに同図中、下段のような速度と変位の時間変化を求め、断層モデルから計算される変位との比較を試みている。神戸での波形はこの図にあるパルス状の波が数個重なったように見える。菊地(1995)による遠方の地震波の解析からは、兵庫県南部地震では大きな断層が三回形成されたことが明らかになっている。数個のパルスは三回の破壊に対応したものであろう。

阪神高速道路の倒壊に象徴される建造物の大きな被害は、建築学者の間でさまざまに議論されている(長, 1995)。これまで震度の定量的表現として加

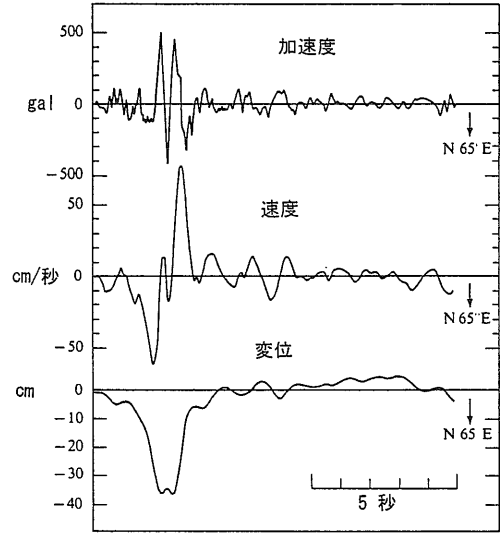


第5図 神戸における加速度記録と速度記録.

速度振幅の最大値が用いられることが多かったが、加速度振幅の最大値が同程度の地震でも被害の大きさは極端に異なる(額額, 1995a, b). 神戸の加速度記録に見られる周期1秒の波は加速度記録としては異常な低周波である. 額額(1995a, b)は低周波の強い振幅の波が被害に関係した可能性を指摘している.

震源近傍の強震動の波形からは断層の細かな形状と断層が形成される時間的過程が明らかになる. 逆にいえば、断層形状と形成過程を与えれば強震動の予測ができる. しかし、震源断層から離れるにしたがい地震波が通過した経路の影響や、観測地点での地質構造や地盤の細かい変動の影響を受け、震源から少し離れた地点での強震動波形は震源近傍とはかなり異なった波形となってしまう. このように、強震動は1.震源断層からの距離、2.波の経路と観測地点の地質条件、のふたつで決まる. 強震を受ける地点での地質構造が原因で大きな災害が発生した有名な例に、1985年のメキシコ地震(マグニチュード8.1)の際のメキシコ市での高層ビルの倒壊など大規模な被害がある. このとき震源から400 km 離れたメキシコ市は湖成粘土層の上にあったので、軟弱地盤による増幅によって地震波は周期の長い大きな振幅の波となり、さらに地質構造の影響で継続時間も長くなったため被害を大きくしたといわれている(川瀬, 1994). 今回の地震における阪神地区での狭い被害ゾーンの原因については現在まだ究明されていないが、震源からの波形の影響とともに地下での構造的要因が作用した可能性もある.

陸上での地震災害軽減の鍵は強震対策であり、直



第6図 1966年パークフィールド地震における加速度型強震計の波形とそれから計算された速度波形と変位の時間変化(Aki, 1968).

小型地震の場合は震源近傍での強震波形の観測が重要であるが、これが非常に困難であることはすでに述べた. 地震はいつどこで発生するか予測がつかないうえ、震源から数 km 以上離れると波形の変化が著しく、断層から少し離れた地点の地震波は直下型地震の強震予測には使えない. 今回神戸などで得られた強震記録は非常に貴重なデータであり、今後の解析結果が待たれる. 地震災害軽減のためには、強震計の密な観測網をしくとも計器観測以外の方法からも強震動の様子を推定する必要がある. なぜなら、山間部や人口の少ない場所では計器観測のデータは期待しにくいし、海外での被害地震の場合も一般に計器観測データを期待することはできない. 跳び石や単純な構造の石造物による強震動の推定は、こうした計器観測にかわって利用できる. 地震後の詳しい調査が不可欠であることは言うまでもないが、できれば振動台を用いた実験なども必要であろう.

## 5. おわりに

以上のように、計器観測のできない場合でも、地震に伴うさまざまな現象を注意深く調査して被害の原因である強震動の性質を調べることは重要である. 最初にも述べたが、直下型地震での災害の原因

は強震動であり、これに如何に対処するかが防災対策の鍵となる。強震動の研究は、その中でももっとも対策が急がれるものである。建造物の倒壊だけでなく、斜面の崩壊などの地質災害と強震動との関係もさらに研究されなければならない。

最後に、今回の震災で亡くなられた方々のご冥福を祈るとともに、われわれも震災軽減をめざす研究への決意を新たにしたい。

本稿を作成するにあたっては、地殻物理部桑原保人氏、岡山大学理学部鈴木 功教授には調査時の協力を、北淡町立北淡東中学校教諭坂本晃章氏には現地情報の提供を、科学技術庁防災科学技術研究所木下繁夫・飯尾能久・福山英一・藤原広行の各氏からは強震動について教わるとともに未発表の強震波形を見せていただいた。また、京都大学防災研究所の伊藤 潔氏、梅田康弘氏には跳び石についてご教示いただいた。筑波大学小林洋二氏、日本大学柳谷俊氏には有益な議論をいただいた。ここに記して謝意を表したい。

#### 文 献

- Aki, K. (1968): Seismic displacement near a fault. *J. Geophys. Res.*, **73**, 5359-5376.
- Archuleta, R. (1982): Analysis of near-source static and dynamic measurements from the 1979 imperial valley earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **72**, 1927-1956.
- 栗田泰夫・水野清秀・杉山雄一・下川浩一・井村隆介・木村克己 (1995): 1995年兵庫県南部地震に伴って出現した地震断層. *地質ニュース*, no. 486, 16-20.
- Bolt, B. A. and Hansen, R. A. (1977): The upthow of objects in earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **67**, 1415-1427.
- 長 尚 (1995): 構造設計学と神戸の地震. *地質ニュース*, 本号, 33-38.
- Iio, Y. and Yoshioka, K. (1992): Strong ground motion in the source region of the 1984 Western Nagano Prefecture earthquake —inferred from displaced boulders—. *J. Phys. Earth*, **40**, 407-419.
- 伊藤 潔・飯尾能久・黒磯章夫・梅田康弘・村松郁栄 (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. 自然災害特別研究突発災害研究成果, 1984年長野県西部地震の地震および災害の総合調査, 85-96.
- 入倉孝次郎 (1994): 震源のモデル化と強振動予測. *地震*, **46**, 495-512.
- Kato, N., Yamamoto, K., and Hirasawa, T. (1994): Microfracture processes in the breakdown zone during dynamic shear rupture inferred from laboratory observation of near-fault high-frequency strong motion. *PAGEOPH*, **142**, 713-734.
- 川瀬 博 (1994): 表層地質による地震波の増幅とそのシミュレーション. *地震*, **46**, 171-190.
- 菊地正幸 (1995): 兵庫県南部地震の震源過程モデル—遠地の地震波解析速報—. *地質ニュース*, no. 486, 12-15.
- 額額一起 (1995a): 大規模被害の元凶は主要動の周期?. *科学朝日緊急増刊*, 1995年3月.
- 額額一起 (1995b): 兵庫県南部地震による地震動の特徴. *地質ニュース*, 本号, 2-8.
- 工藤一喜 (1987): 地震の事典. 朝倉書店.
- 強震観測推進事業連絡会議 (1995): 強震速報 No. 46, 1995年1月17日平成7年兵庫県南部地震. 科学技術庁防災科学技術研究所, 1995年2月.
- 翠川三郎 (1994): 地震時に物体の跳躍現象が生じた事例の調査. *地震* **47**, 333-340.
- 野村亮太郎・川崎輝夫 (1995): 墓石・石造物の転倒などからみた地震被害分布と地形特性. 1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会記録, 49-50.
- Ohmachi, T. and Midorikawa, S. (1992): Ground-motion intensity inferred from upthrow of boulders during the 1984 western Nagano prefecture, Japan, earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 44-60.
- Oldham, R. D. (1899): Report on the great earthquake of 12 June 1897. *Mem. Geol. Surv. India*, **29**, 1-379.
- 大崎順彦 (1983): 地震と建築. 岩波新書.
- 佐藤隆司・杉原光彦 (1995): 三角点のGPS測量による1995年兵庫県南部地震にともなう地殻変動の推定. *地質ニュース*, no. 490, 41-43.
- Umeda, Y. (1992): The bright spot of an earthquake. *Tectonophysics*, **211**, 13-12.
- Umeda, Y., Kuroiso, A., Ito, K. and Muramatsu, I. (1987): High accelerations produced by the Western Nagano Prefecture, Japan, earthquake of 1984. *Tectonophysics*, **141**, 335-343.

NISHIZAWA Osamu, SATOH Takashi, SUGIHARA Mitsuhiko (1995): Strong ground motion near an earthquake fault inferred from upthrow of objects.

〈受付/受理: 1995年4月26日/6月20日〉