

神戸市街地における構造物被害と地盤挙動

中央開発株式会社 石川浩次 *

同上 溝口昭二 **

同上 小野 諭 **

兵庫県南部地震発生後、神戸市須磨区から西宮市までの木造建物の被害調査を行った。それにより、神戸の平野部を東西方向に延びる「震災の帯」が分布すること、震度7(木造建物の倒壊率30%以上)の激震災害エリアが斑模様になん点々と分布していることが分かった。さらに、この中で木造建物の倒壊率が50%以上で、かつ5~10階建のRC建物の倒壊が多いエリアも見られた。震災の帯は六甲山系の活断層の動きによると考えられるが、激震災害の斑状分布は表層付近の地形、地質、地盤との関連が大きいものと考えられる。また、被害の特徴やその要因の分析に利用する目的で構築した地盤情報データベースシステムに関する展望や課題について記述した。本報告では、主として建物の被害調査結果に基づく震災の程度と地形、地質、地盤との関係について考察を行った。

1. まえがき

1995年兵庫県南部地震は、阪神地区の都市域を直撃し災害史上最悪の被害(死者5500人以上、全半壊家屋約20万棟)をもたらした。戦後50年目にして1946年南海道地震(1330人、約3.5万棟)、さらに1948年福井地震(3770人、約4.8万棟)を凌ぐ最大級の、1923年関東地震(14.2万人余、約25.4万棟)に匹敵するほどの「阪神大震災」となった。

この地震による土木・建築物被害は、これまでに類を見ない甚大なものであり、断層の動き、地震動、地形や地質構造を含めた地盤特性が複雑に絡み合っ「震災の帯」を形成したと考える。そこで、地震被害と地盤の関係を明らかにするために、地域のおよび築年的に、しかも地盤状態に依らずほぼ同じ構造で建てられている木造建物に着目し、その被害調査を行った¹⁾。その結果から割り出した建物倒壊率より

街区毎の震度を設定した。その際には鉄筋コンクリート建物(5~10階建)についても調査対象とした。建物倒壊率30%以上の震度7(一部倒壊率50%以上の震度超7を含む)の領域は神戸市須磨区から芦屋市にかけて、六甲山南麓斜面のJR神戸線から阪神高速道路間の東西に延びる幅約1.5~2.0kmの帯状分布となっている。

空から見れば「震災の帯」であっても、地上では「斑模様」となって、特に激しい被害区域(表-2の震度超7に相当)が散在している。「震災の帯」の形成には六甲山系の活断層や深部地質構造が深く関与したと考えられるが、その中の「斑模様」は表層付近の地形や地盤が影響したと考えられる。

本文は、神戸市街地における構造物被害と地形、地質、地盤の関係について考察したものである。

2. 被害調査

(1) 調査の方法

被害調査は神戸市須磨区から西宮市にかけての東西約28km間において、南北方向には海岸地域から六甲山麓までの2~7kmの範囲で行った。概査では、道路に囲まれた街区・町丁ブロック(50~150m区画の5,000~10,000m²)を単位とした。

キーワード：現地被害調査、震度階、データベース

* 中央開発(株) 技術本部 03-3208-5252

** 中央開発(株) 大阪事業部 06-386-3691

木造建物、鉄筋コンクリート建物を表-1に示す判定ランクで被害区分し、式(1)を用いて単位別に倒壊率(r)を算定し、表-2に示す気象庁震度階に準じた方法で街区毎の震度を表示した。ここで、特に被害の激しい木造建物の倒壊率が50%以上かつRC建物の倒壊の多い地域は、式(2)の河角の提案式(1949)を外挿して震度「超7」で表示した。これは、図-1に示すように加速度 $\alpha > 600\text{gal}$ に相当するものと考えられる。倒壊率算定の際にRC建物はその面積に応じて2~10倍の重みを剩じた。

精査では、神戸市須磨区から芦屋市までの範囲で、南北13断面(南北方向の道路に沿った左右両街区の面積で2,000 m^2 を単位として倒壊率を算定)について建物全戸の被害調査を行った。ただし、建築基準法の1981年新耐震設計法施行後と思われる高層鉄骨構造の建物は対象外とした。

$$r = (\sum f(x) \cdot fc + \sum F(x) \cdot w \cdot fc) / \sum \text{戸数} \quad \dots\dots(1)$$

ただし、 $f(x)$:木造建物のランク毎の戸数

$F(x)$:RC建物のランク毎の戸数

w :重み(RC建物の面積に応じて2~10倍を設定)

fc :係数(表-1)

$$\alpha = 20 \times 10^{s/5} \quad \dots\dots(2)$$

ただし α :推定最大加速度

s :気象庁震度階

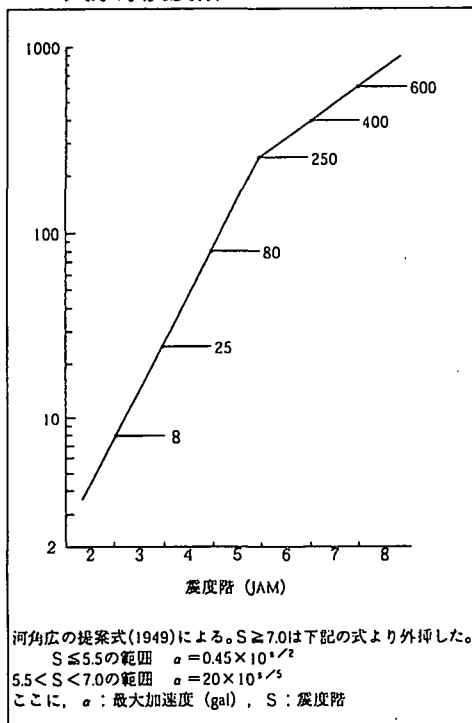


図-1 震度階と加速度の関係

災害調査の結果を震度階で評価したのは次の理由からである。

- ①震度階は、災害規模を表現するのに一般的で、被害イメージがわかりやすい。
- ②震度階は、耐震設計をしていない一般家屋を対象にしているため、どの地域でも同等に評価できる。

表-1 倒壊率の判定ランク

(1) 木造家屋 (モルタル含む)

ランク	分類	係数	損壊の程度
1	全壊	1.0	倒壊、30°以上の傾き、修復不能
2	半壊	0.5	5~30°の傾き、瓦はほとんど落失、修復不能or大々の修理必要
3	損傷	0.1	5°以内の傾き、壁のひび割れ大、瓦の落失見られる。復旧可
4	被害なし	0	少量の壁のひび割れ、瓦の少量の落失あり

(2) 鉄筋コンクリート建屋

ランク	分類	係数	損壊の程度
A	全壊	1.0	倒壊、傾斜あり、柱歪屈大、修復不能
B	半壊	0.5	柱、ハリ大幅損傷、壁大幅キレツ、修復不能or大々の修理必要
C	損傷	0.1	柱、ハリにキレツ多い、壁ひび割れ大
D	被害なし	0	柱、ハリにキレツ少ない

表-2 震度階区分

震度階 (JMA)	推定加速度 (gal)	説明
5	80 ~ 250	壁に割れ目、且つ礫石、石とうろうの崩壊あり 木造家屋倒壊 30%以下 木造家屋倒壊 30%以上 木造家屋倒壊 50%以上 鉄筋コンクリート建の損傷多い。
6	250 ~ 400	
7	400 ~ (600)	
(超7)	(600以上)	

(2) 被害の状況

a) 震災分布

図-2は街区毎の被害度を表現した震災分布図であり、表-2に示す震度階と加速度の関係から、地域毎の地盤推定加速度を読み取ることも可能である。以下、震災分布が語りかけてくる被害度について述べることとする²⁾。木造家屋の倒壊が始まる震度6以上の被害の概況は、西は震源地の明石海峡に近いJR須磨駅付近から始まり六甲山系南麓の神戸平野を南北に1.0~2.5kmの幅で東方向に進む。神戸市東部域から芦屋市と延々と帯状に延び、夙川以東で分岐し、西宮市に至るいわゆる震災の帯として延長約28kmの長さで武庫川まで至り、その左岸側で震度5となり消滅している。ただし、神戸~元町では、南北の幅は500m程度と非常に狭くなっており、一部は途切れている。また、震源域から40km以上離れた宝塚市の有馬-高槻構造線に沿った区域に点々と、また伊丹市の伊丹断層付近にもこの震度6以上の被害が局所的に起こっているのが見られた。

現地踏査による建物の被害度マップ

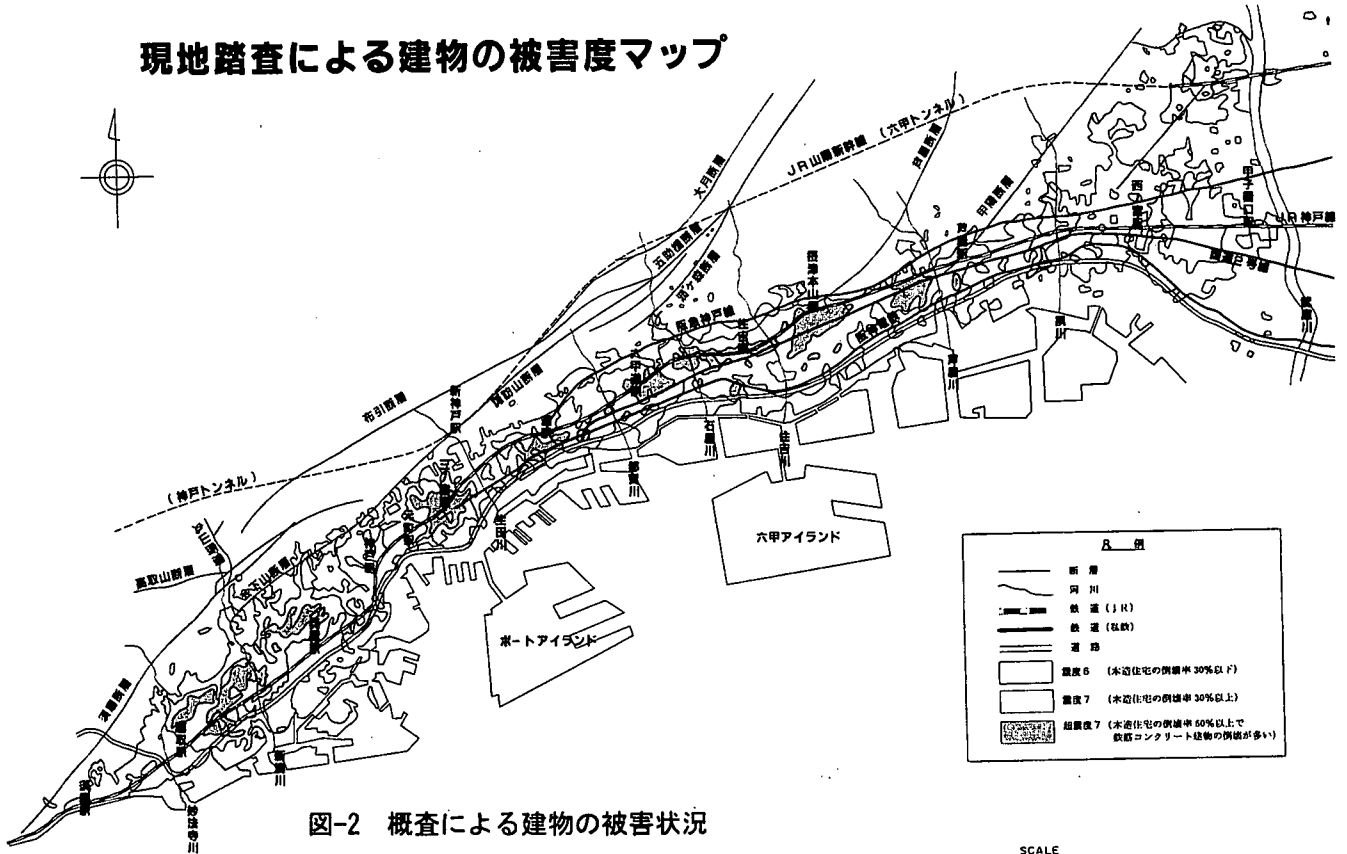


図-2 概査による建物の被害状況

震度7の被害は次の3地域で長径2~4kmの扁平な斑状に分布するのが見られた。またその被害の範囲は、低地から台地に及び、神戸市東地区では標高40m、西地区では約20mの比較的高地形の箇所まで及んでいる。

- ① JR 鷹取~新長田~兵庫における、幅1~1.5km、長さ4.5kmの範囲
- ② JR 三宮駅を跨いだ南北の地域、南は市役所付近まで
- ③ 灘区から芦屋市のJRと阪神高速間の幅1~1.5kmの範囲

さらに、震度超7が標高5~20mの扇状地や沖積低地に点々と散在し、三宮駅、新長田駅付近の段丘層、後背湿地性堆積物や沖積層の厚い部分に見られる。東側へは、灘と六甲道~住吉や摂津本山、芦屋川駅の南側にかけて国道2号線沿いに分布している。図-3に、三宮付近の南北断面の地層断面図と震度区分を示す。

b)被害の特徴

断層に沿った地域で相対的に被害が目だっているが、道路・鉄道の土木構造物の被害は、震度6以上の分布域に集中しているようである。地震被害は、断層の動きや伝播する地震動、地形をも含めた地盤状況、建物や土木構造物の力学的構造などが相互に複

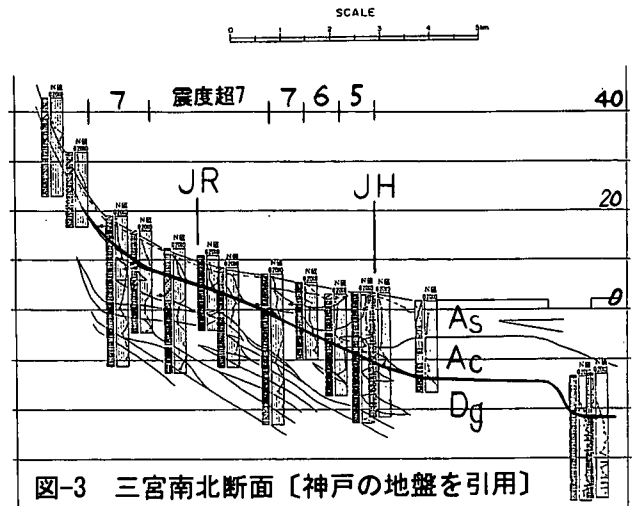


図-3 三宮南北断面【神戸の地盤を引用】

雑に絡み合い、震災分布の複雑な形状はそれらの反映と考えられる。また、被害の特徴の一つとして神戸市東部域のJR神戸線を挟んだ山側(北)と海側(南)での被害状況の違いが挙げられる。この神戸線は、明治初期に建設され、標高20m付近を扇状地形線に沿ってゆるやかにカーブしながら走っており、北と南では扇状地(傾斜2~3°以上)と緩扇状地(2°以下)の地形変換線にあっている。また、海側凸部の箇所は扇状部にあたり、玉石混り砂礫を主としており、凹部の箇所は側扇部にあたり、後背湿地の細粒土から成っており、これらの違いによって震度が6~超7と変化し、地形・地盤と被害との間に密接な関係がある事を示唆するものである。

なお、木造建物の被害率を地盤の動的性状と関係させる場合には、木造耐力の一樣性が前提になるが、耐力の劣化、設計の自由度、工法の発展などにより建物の耐震性は一樣ではない。建物の建設年代と被害レベルとの関係を調査した結果によると、建設年代によって被害レベルが大きく異なることを示している。明らかに被害は建設年の古い建物に多い。さらに、古い建物が特定の地域に集中している可能性もある。神戸市における各区毎の建設年代別の建物の比率と全壊率の間に相関性が見られる。長田区では戦前の建物が20%近くあり、ついで兵庫、灘区に多い傾向を示しており、建物の全壊率は地盤震動の影響を強く受けるのは当然であるが、全壊率と住宅の建設年代とは無縁ではないことが指摘されている³⁾。

3. 地形・地質構造と被害度の関係

(1) 神戸の地形

六甲山南麓には、山麓に接して僅かに丘陵が顔をだしているだけで、大部分は段差の多い古い山麓扇状地の複合したもので、海岸付近に幅狭く海岸平野が分布している。この様に神戸の地形は、六甲山麓の直線的な断層崖地形前面の扇状地、海岸三角州・砂堆分布域、河道沿いの自然堤防、西部のみに見ら

れる後背湿地で構成されるが、全体的には扇状地の連続地形と見なされる。扇状地の形成は断層運動と密接な関係にある。六甲山は第四紀地殻変動によって約100万年前の中期更新統から現在まで続いた隆起準平原であり⁴⁾、南麓とは断層で分断されている。また、六甲山は花崗岩主体で、無数の発達した断層が隆起に伴って侵食され、それが堆積して扇状地となっている。六甲山麓を南下する河川の中で、その発達に著しい扇状地は、芦屋川、住吉川、都賀川、旧生田川、旧湊川系などであり、その扇状地付近は、自然堤防、砂堆や天井川沿いの微高地が形成されている。

六甲山の上昇運動は、東西2つのブロックに分けられ、東六甲では最高標高931m、西六甲では400mに達しており、そのことが扇状地の発達を複雑にしている。図-4に接峰面図⁵⁾に基づく六甲山の隆起と扇状地の発達の関係を示す。その発達はA、B、Cパターンに区分され、A領域が六甲山の隆起、扇状地の発達が最大となり、B、Cの順に小さくなる。

図-5に示すように、C領域での震度7エリアと表層5mまでに堆積する粘性土の範囲とがほぼ一致している。また、図-6には沖積粘性土層の層厚と震度7エリアを比較しており、A、B領域でも表層粘性土の分布域は被害が大きくなっていると判断される。

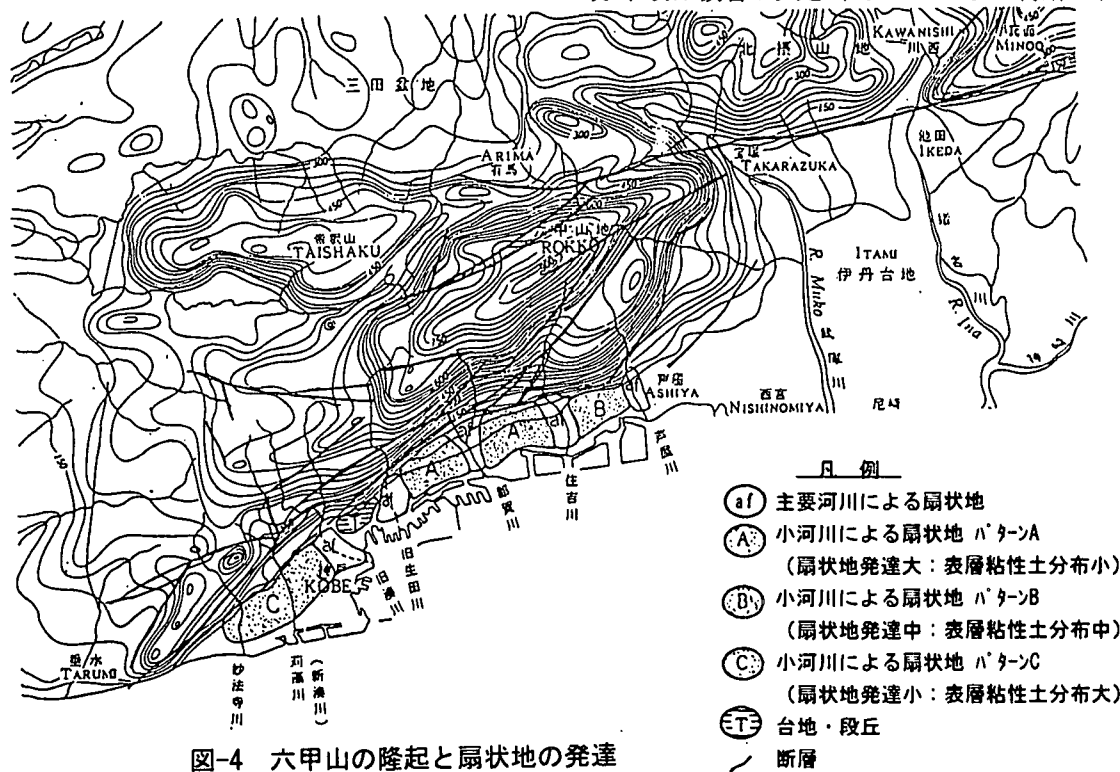
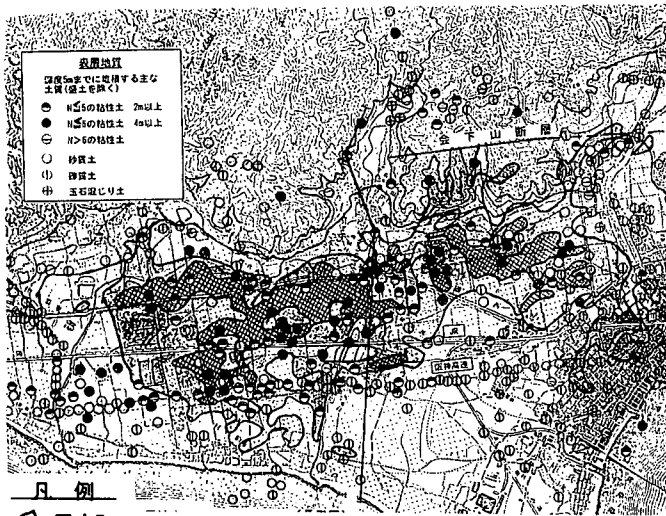


図-4 六甲山の隆起と扇状地の発達



○ 震度7
● 震度超7
図-5 地震被害と表層土質の関係(長田区)
(明治前期古地図を利用)

(2) 地質構造

六甲山南麓には、南西から北東方向にかけて、一連の断層が雁行状に分布している。がこの地震で発生した斜面崩壊は東六甲山系に偏っており、全体として2本の帯状に分布している⁶⁾。崩壊ヶ所は五助橋、芦屋断層に平行な分布状態であり、しかも断層の両端部分の市街地で建物の被害率も高くなる傾向を示している。

震度7の分布域の上限標高は、地形が扇状地から丘陵地あるいは山地への遷急線付近であり、東灘区の東六甲では標高40mに対し、長田区の西六甲では山地、

丘陵に近い標高20mに位置しており、山頂標高の丁度1/20の高さに相当する。このことは、被害の程度が、連続的な上昇運動の差、すなわち六甲山の東西方向の傾動地形と密接な関係にあることを伺わせる。

(3) 地盤特性

神戸の地盤は大阪層群が山麓丘陵地に分布し、高位から低位段丘堆積層と沖積層が表層部を構成している。河成層である中・低位段丘堆積層、沖積層は、扇状地性の粗粒堆積物で構成されており、また、流心の河川沿いには玉石混じり礫質層が分布し、河川間(扇状地間)と海岸線沿いには砂質層が分布する⁷⁾。

地盤種別と震度の関係については次のような報告がある⁸⁾。これによると粘性土および粘土混じり土地盤では震度6以上であるのに対し、砂礫地盤、段丘層等は震度6以下である。軟弱地盤において $N \leq 5$ の粘性土では、層厚2m程度で震度6以上、4m以上で震度7~超7となっている。

図-7は、液状化範囲と震度7エリア、それに $N \leq 15$ の砂と埋立層の地下水位下の層厚を示したものである。液状化範囲には殆どの地点で $N \leq 15$ の砂が5m以上分布し、震度は5~6となっている。さらに、 $N \leq 15$ の1~5mの層厚の地点は液状化範囲から外れているものの震度7の分布域には少ない。

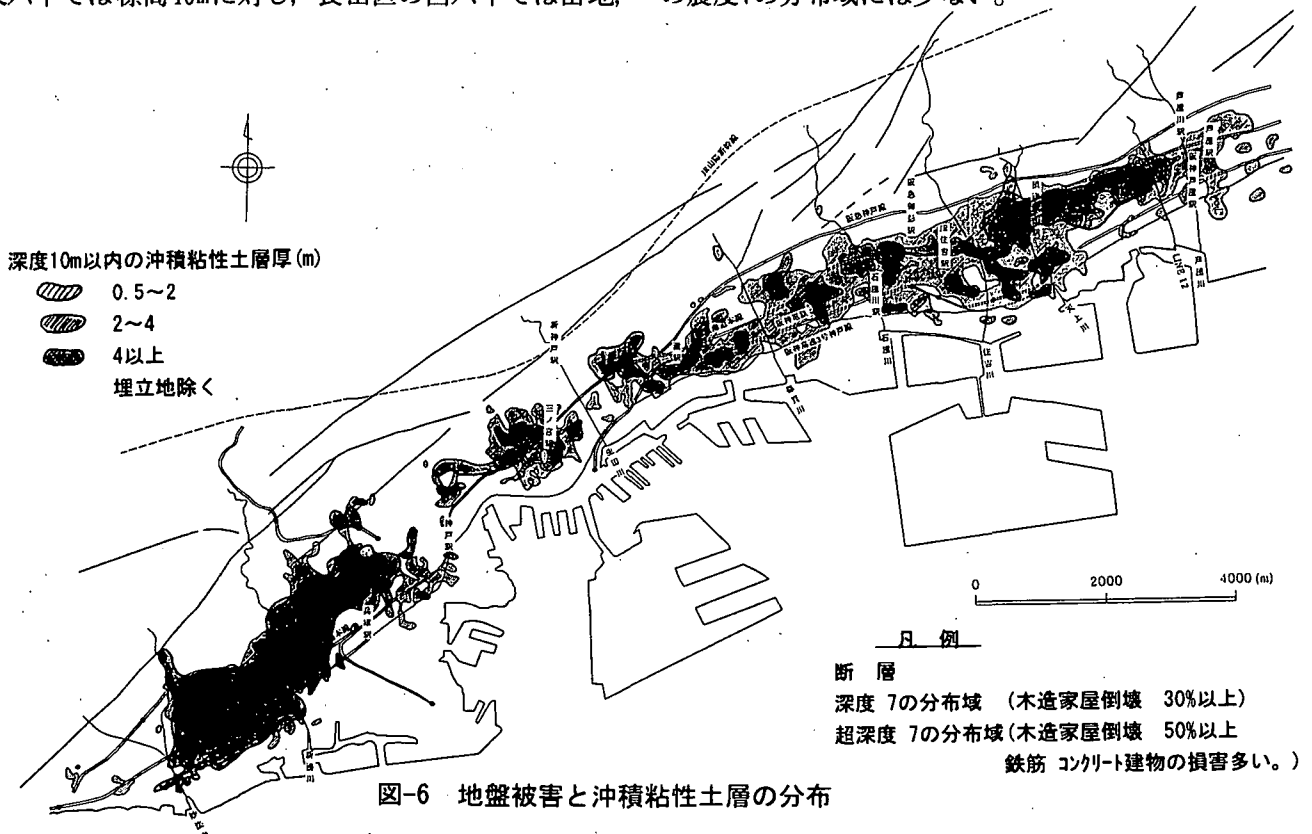


図-6 地盤被害と沖積粘性土層の分布

- 震度7 (木造住宅倒壊率30%以上の範囲)
- 〰 液状化範囲(国土地理院および建設工学研究所調べ)⁹⁾¹⁰⁾

N値15以下のAs2層(沖積砂および礫混じり砂)
および埋立層の地下水位下から深度 20mに堆積する層厚

- 0~1m
- ① 1~5m
- 5~10m
- 10m以上

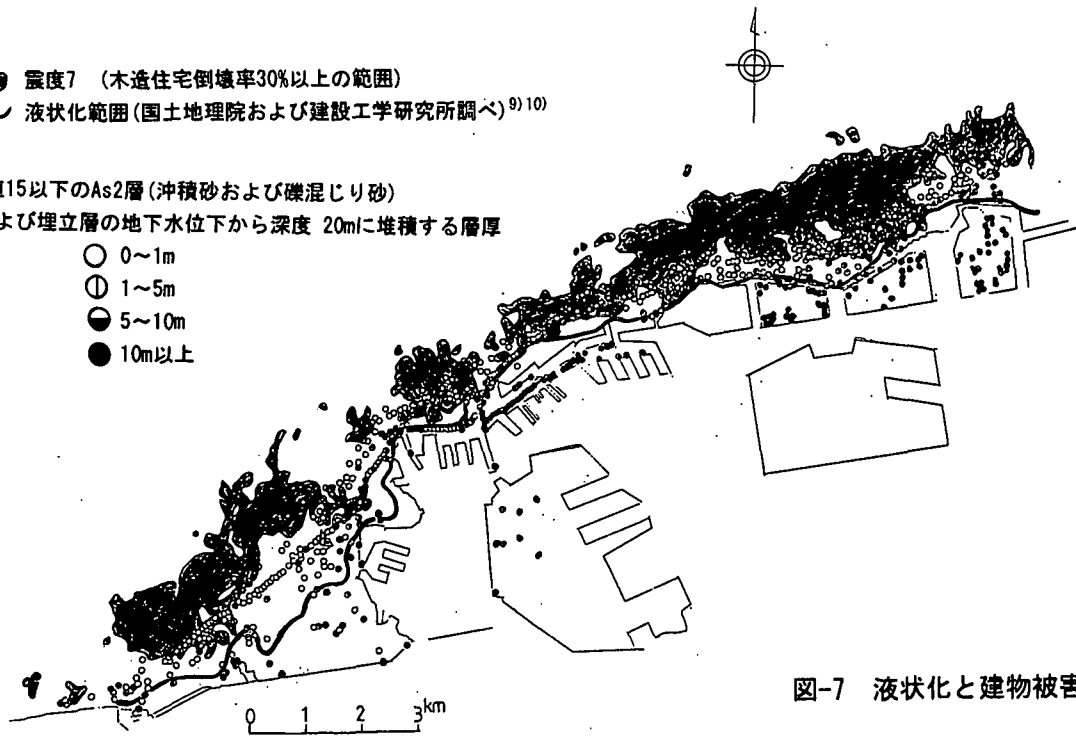


図-7 液状化と建物被害

被害集中域での地震動に関して以下の報告が示されている¹¹⁾。これによると、地盤の地震動卓越周波数が木造建物や中低層のRC建物のそれに一致しているのが被害集中の一因との事である。また、深部地盤において、基盤が急激に深くなる地域で地震動のフォーカシングのような現象により地震動振幅が大きく増幅され、さらに表面付近にS波速度100m/s程度の軟らかい層を10m程度考えると現象をより明確に説明できる。従って震度7の帯は基盤の形状と軟らかい表層地盤の両方を考慮した地震動の増幅効果により形成されたと考えられる。ポートアイランドは海を埋め立てて人工的に作られた島で、地表面近くは埋立土砂、以下粘土や砂質土の沖積層とさらに砂礫の洪積層と続く地盤構造となっている。地震動は一般に地表面近くの軟らかい表層で増幅されるが、本震の記録は地表面近くの水平成分の地震動が地中よりも逆に小さくなっている。上下成分は地中で小さく地表近くで急に大きくなっている。これは強震動に対して表層地盤が強い非線形性を示したことを意味しているとの事である。また、上下動の最大加速度値が水平動よりも大きかった観測点を調べてみると殆どが海岸線であるとか、川筋であるとか、埋立て地盤であるとか、非常に軟らかい地盤であることがわかる。これらの事実から上下動が大きくなったのはむしろ地盤条件によるものという様に結論することができる。

4. 地盤情報のデータベース化

地震被害の特徴やその要因の分析に利用する目的で地盤情報データベースシステムを構築した。

(1) 基本システム構成

システムの基本となるデータは大きく分けて、地図情報、被害情報、地盤情報の3つであり、これらを有機的に関連づけたシステムである。

(2) 登録情報

本システムは、主に被害情報と地形・地質分類、活断層位置などの地盤情報の一部を数値地図に載せたものである。デジタル化している情報の代表例を以下に示す。

①建築物被害度(震度)マップ

木造建物とRC建物(5~10階建)を対象に、単位の倒壊率から気象庁震度階に準じた方法で街区毎の震度を表示した。これらの結果を閉鎖領域となるコンター図で表わし、色区分したポリゴンデータとして登録した。

②被害箇所マップ(被害状況写真)

現地調査のときに、撮影した建物、道路、鉄道、液状化等の被害状況の代表写真をビットマップデータとして登録した。マップ上に撮影地点をマークで表示し、写真の対象構造物が識別できるように色分けした。

③地震外力分布マップ

地震波の観測地点をマップ上にマークで示すと

ともに、観測記録の諸元(表形式)と地震波形(ビットマップ)を登録した。

④地形・地質分類マップ

山地、段丘、扇状地、後背湿地などの地形・地質を分類し、エリア毎に色区分し、ポリゴンデータとして登録した。

⑤古地形マップ

明治前期(明治18年陸軍参謀本部作成)の古地図から0, 5, 10, 20, 30, 40mの等高線をデジタル化し、システムに登録した。

⑥活断層マップ

主要な活断層の位置をデジタル化し、システムに登録した。

⑦建築物被害度精査ルートマップ

①の方法で距離～倒壊率関係図に示したもので、ビットマップデータとして登録した。

5. 考察

被害分布が帯状または斑状をなすのは、地震動、地形、地質構造、地盤特性等が複雑に絡み合った結果と考えられ、被害の概略は以下のとおりである。

1) 震災の帯は、次の地形、地質、地盤条件で起こった。

①地形区分では扇状地、緩扇状地性低地(後背湿地)

②地質は更新世後期以降の扇状地性堆積物(砂質土)

③地盤種別では、 $N \leq 5$ の粘性土、 $N \leq 15$ で層厚4m以上の粘土混じり砂、 $N \leq 20$ の砂礫地盤

④六甲変動の影響を受け、六甲山の地形と対応し、東六甲の標高40m以下～5m、西六甲の20m以下～5mの地域

2) 震度超7は次の3地区に見られた。

①更新世以降の緩扇状地の砂質～細粒土の区域(東部域)

②沖積低地の後背湿地性の粘性土の区域(長田区)

③沖積層と段丘堆積物が厚い埋没地形の区域(三宮付近)

3) 標高5m以下の海岸低地の沖積層、海成層堆積物の区域では、被害は比較的小さく震度は6程度であった。

4) 低位段丘、沖積扇状地でも扇頂から扇中央部では砂礫、玉石を主体としており、比較的被害は少なかった。

要約すると、被害の分布は、①最終氷期後期～晩氷期～後氷期(完新統)の緩扇状地の陸成扇状地成堆積物である砂質土、細粒土を主体とする地域(東部域)、②沖積低地の後背湿地性の粘性土($N < 4$)を主体とする区域(長田区)、③沖積層と段丘堆積物が厚い埋没地形の区域(三宮市役所付近)の3地区にみられ、これらの被害は、構造物と地盤の振動特性の影響が特に大きかったことが考えられる。

一方、比較的被害の少なかった所(震度6以下)は①海寄りの海岸砂洲、砂質土(As)、粘性土(Ac)(縄文海岸線、標高5m)以下の海成堆積物、②山寄りの、中～高位段丘堆積物(Tm, Th)、大阪層群(0sg)の砂質土、粘性土、砂礫土、③扇状地の扇頂、扇中央部の玉石混り砂礫土分布の多い所、であるように見られた。

6. おわりに

地震動特性と木造建物被害の関連性が高いことに着目して、震災分布＝地盤加速度分布図を作成した。この震災を地盤から見た場合、表層10mまでの土質(粘性土なのか砂質土なのか)が特に大きく関与していると予測される。とともに沖積層よりも締まっている、洪積層の砂質土を主体とする緩扇状地で特に大きかった事なども指摘される。

構造物の被害あるいは地震動の特性等について種々の検討が報告されている^{11, 12)}、が震災の帯が震源から40kmも離れた場所であること、浅い地盤での動的挙動、地震時の地盤と構造物の相互作用の解明等々、今後の課題は山積みされている。地震動で最初のフィルターをかけ、地質、地形と進めて、最後に地盤の項を重ねることにより地震と被害の全体像を把握することができると思う。

さらに、震災に関する地盤データベースを利用して、被害要因の究明とともに、今後の耐震設計・防災対策に活用できるようにデータを整備する必要性があると思う。そのためには、高度なシステムの構築だけでなく、充実したデータベース化のための詳細で的確な地盤情報の収集・整理と公開が望まれる。

【参考文献】

- 1) 中央開発株式会社：1995年兵庫県南部地震災害調査報告書, 1995. 3.
- 2) 小野諭・石川浩次・溝口昭二：1995年兵庫県南部地震による建物等被害度について, 土木学会第50回年次学術講演会論文集, pp. 948~949, 1995. 9.
- 3) 藤原悌三：建築構造物の被害の実態, 第32回自然災害科学総合シンポジウム要旨集, pp. 55~62, 1995. 10.
- 4) 田中真吾編著：六甲山の地理, 神戸新聞総合出版センター, 1988.
- 5) 藤田和夫・笹間太郎：大阪西北部の地質, 地質調査所, 1983.
- 6) 沖村孝：兵庫県南部地震による六甲山系の斜面崩壊, 阪神大震災調査報告-都市直下型地震と地盤工学的諸問題-, 地盤工学会, pp. 49~60, 1995. 7.
- 7) 岩見義男 編：神戸の地盤, 神戸市企画局, 1980.
- 8) 石川浩次：神戸の地形・地質・地盤と構造物の帯状, 島状被害, 「阪神大震災」中間報告会-人工改変と地震災害-予稿集, 日本応用地質学会, pp. 72~104, 1995. 5.
- 9) 建設工学研究所：阪神大震災被害状況調査報告書(概要版), 1995. 4.
- 10) 国土地理院：平成7年兵庫県南部地震災害現況図(第II版), 1995. 7.
- 11) 入倉孝次郎：震源メカニズムと地震動, 建築雑誌, Vol. 110. No.1377, pp. 15~18, 1995. 9.
- 12) 土岐憲三・後藤洋三・江尻譲嗣・澤田純男：兵庫県南部地震の震源特性と地盤震動特性, 土木学会誌, Vol. 80, No.9, pp. 32~43, 1995. 9.

Geology of Kobe Area and Earthquake Disaster Zone

Koji ISHIKAWA, Shoji MIZOGUCHI and Satoshi ONO

summary

We started immediately after the earthquake, an investigation of its damage, covering the remains of wooden houses and reinforced concrete buildings in the Kobe area. The investigation result indicate that the earthquake damage was generally distributed in a belt or spot from depending on JMA grade of seismic intensity, 1.5~2.0km wide in the east-west direction from the JR Kobeline in the north to the Kobe highway line in the south.

The relationship between building damage and earth movement were found to have been very complicated by the influence of geological structure, topography, distance from seismic center, classification of sedimentary deposit, active faults, etc, upon one another.

This paper presents a geo-database based on the results of this survey, introduces some features of this database based on the damage intensity and geographical map with examples, and describes further aspects in the future. We describe relationship between geology and earthquake damage.