

兵庫県南部地震の被害分布と断層構造および地盤特性の影響

The Effects of Geological Structure and Subsurface Properties on the Disaster Distribution in the Hyogoken Nanbu Earthquake

石川 浩次 (いしかわ こうじ)

中央開発(株) 技術顧問

緒方 信一 (おがた しんいち)

中央開発(株)東京支社 部長代理

馮 少孔 (ふえん しょうこう)

中央開発(株)探査計測部 副長

細谷 卓志 (ほそや たかし)

中央開発(株)技術開発部 技師

はじめに

1995年兵庫県南部地震で生じたいわゆる“震災の帯”の成因については、六甲南山麓付近の平地に接して分布する落差500~1000mの断層と基盤の深さ500~1000mに及ぶ二次元的な基盤構造形状が、地震動の地表への焦点効果をもたらしたことによるとされた^{3),6)}。また、震源地近傍の被害差については、起震断層からの距離減衰により生じたという説明もあった⁷⁾。

筆者らは被害調査¹⁾の結果から、被害と地質・地盤条件の関係について概略検討を行った⁸⁾。そして、震災後に各機関で実施された地質学的、地盤工学的調査報告^{2)~5),12)}を再検討し、地質別の地盤特性をデータベース化した。

本報告は神戸市西部、中部、東部域における被害分布と断層構造および地盤特性の影響について再検討を加えたものである。

1. 六甲南山麓の断層構造および地形・地質・地盤特性

1.1 断層構造

六甲山地の南山麓には、南西から北東方向にかけて、須磨~会下山~諏訪山~五助橋~芦屋~甲陽断層等一連の活断層が雁行状に分布しているのが知られている。こ

れら南山麓に発達する数条の断層帯は落差500~1000mに及ぶ断層構造を形成し、また、平野地下には数条の伏在断層が分布し、基盤深さは、1000~2000mに及ぶ基盤は段差を有する数段の複雑な基盤構造を形成していることが震災後の調査で明らかにされた⁴⁾。

1.2 地形・地質・地盤特性

1948年の米軍撮影の空中写真判読と最近の地質調査データ^{2)~5),12)}を参考にして、図-1に示す地形分類図を作成した。このうち扇状地の分類については、住吉川、旧生田川、旧湊川扇状地など、最終間氷期に形成された扇状地F-1(中位段丘Tmに相当)、晩氷期に形成された扇状地F-2(低位段丘Tlに相当)、および後氷期に形成された扇状地F-3(沖積扇状地A1に相当)とした。このうち、地形図から求めた等傾斜線 2° 以下は緩扇状地にあたる。扇状地中心付近の地形をみると、海側に凸で、天井川、自然堤防を形成し、現海岸付近まで続く。一般に、氾濫原、自然堤防の発達は乏しく、また、三角州の形成・発達は見られない。また、海岸付近は、海岸砂洲、浜堤(砂礫堆)等の微高地を形成している。

神戸市陸域全域のボーリング資料(13測線、265孔)^{2)~5),12)}を用いて、火山灰分析等による地質・地形分類を行い地質分類別の地盤特性をまとめた結果によると、低位段丘相当層の砂層(Tls)のN値はおおむね50以下(平均48.6)であり、工学的には表層地盤の扱いとなると考えられる。

2. 地域別の表層地質・地盤特性と被害との関係

神戸市域全域の表層地質・地盤特性分布状況と建物被害との関係について検討する。

2.1 中央部(中央区、生田川~元町駅付近)域

図-2に本区域における被害調査による震度¹⁾(JMA)と地形分類およびボーリング資料^{2)~5),12)}を用いた表層土質分布を示す。

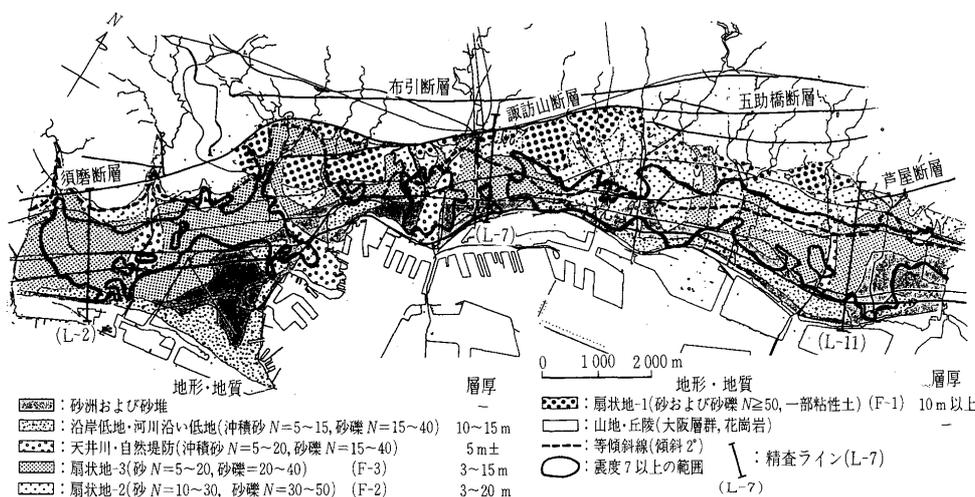


図-1 神戸市域地形分類図

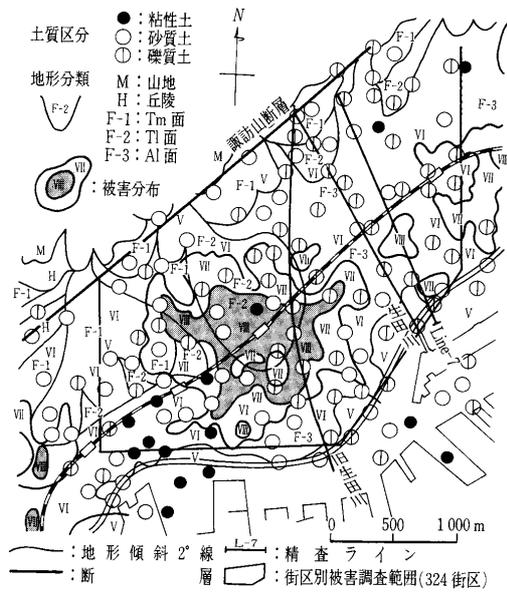


図-2 表層地盤特性および地形分類と被害分布図 (中央部域)

この結果によると、下山手通り南側の三宮駅から市役所にかけての傾斜2°以下の緩扇状地(F-2)では、街区の6割以上が、倒壊率50% (資料¹⁾では超震度VII(VIII)と表示)となっている。また、土質は、沖積層および低位段丘相当層の砂質土(Tls, As, N=20~40)が卓越し、工学的基盤面は沖積層底面以下に分布し、表層地盤の厚い基盤の深さ10~15m程度の凹地形構造を形成している。

一方、現生田川流域付近などの沖積扇状地(F-3)では、5割近くが震度VI、土質は砂礫土(Ag, N=30~40)が卓越し、表層地盤の厚さはせいぜい5~8m程度である。県庁から元町駅付近にかけての地形はF-1, F-2であり、砂質土(Tlg, Tms, N=20~>50)が卓越し、扇状地F-1では6割以上が震度Vとなっている。海岸に位置する阪神高速線付近の地形は扇状地F-3か沿岸

表-1 西部域のボーリング孔別の土質区分と被害との関係 (365孔)

土質	超震度VII	震度VII	震度VI	震度V	
粘土	N≤5(2m)	15	17	15	7
	N≤5(4m)	1	3	8	3
	N>5	15	25	12	14
計	<31>	<45>	<35>	<24>	
砂質土	N=0~10	7	13	15	11
	N=11~20	9	10	20	10
	N=21~30	0	0	2	6
	N=31~40	0	0	0	6
	N=41~50	0	0	1	0
	N=51~	0	0	0	2
計	<16>	<23>	<38>	<35>	
礫質土	N=0~10	2	3	6	6
	N=11~20	0	8	12	9
	N=21~30	0	4	13	14
	N=31~40	0	3	15	10
	N=41~50	0	2	6	1
	N=51~	0	0	2	2
計	<2>	<20>	<54>	<42>	
総計	<49>	<88>	<127>	<101>	

沖積低地で、砂質土(As, N=5~15)および礫質土(Ag, N=15~40)が卓越し、その5割以上が震度VI以下となっている。

2.2 西部(須磨区, 兵庫区, 長田区)域

本区域におけるボーリング孔別の土質区分と被害との関係を表-1に示す。これによるとJR新長田駅付近を中心とした後背低地の厚さ4m以下の粘性土(N≤5)が分布する区域では、その7割以上が震度VI~>VIIとなっている。また、砂および砂礫層の分布域と被害の関係は、N≤15で5割以上が震度VII以上、N≥30で7割以上が震度VI以下となっている。また、山側の中位・高位面の段丘および丘陵地は、主として砂礫土(Tlg, N=30~>50)から成り、震度V~VI程度と低い傾向になっている。

2.3 東部(灘区, 東灘区)域

本区域では、“震度VI”は標高5~40mにかけて東西に帯状に分布するものの、その帯の中で被害差が生じている。

いま、波動伝播の1/4波長則が成り立つとすると、表層地盤の特性値T_Gは次式で表される。

$$T_G(= \sum 4H_i/V_{si}) \dots\dots\dots (1)$$

ここにT_G=表層地盤の特性値(s), H_i:i番目の地層の厚さ(m), V_{si}:i番目の地層の平均S波速度(m/s)。

JR線南側の傾斜2°以下の住吉川扇状地の側扇部の細粒土(N≤20)卓越域(No.1, 4, 8)の地盤特性値T_Gは0.17~0.3秒で、超震度VII(倒壊率50%以上)と最も大きく、JR線北側の扇状地の砂礫土(N≥30)分布域(No.5, 7)の地盤特性値T_Gは、0.10~0.15秒で震度VIIとなっている。一方、住吉川流心付近で、深度3m以下に玉石混じり砂礫(N≥50)が浅く分布する区域(No.6)では、地盤特性値T_Gは0.10秒以下で震度VIとなっている(図-3)。

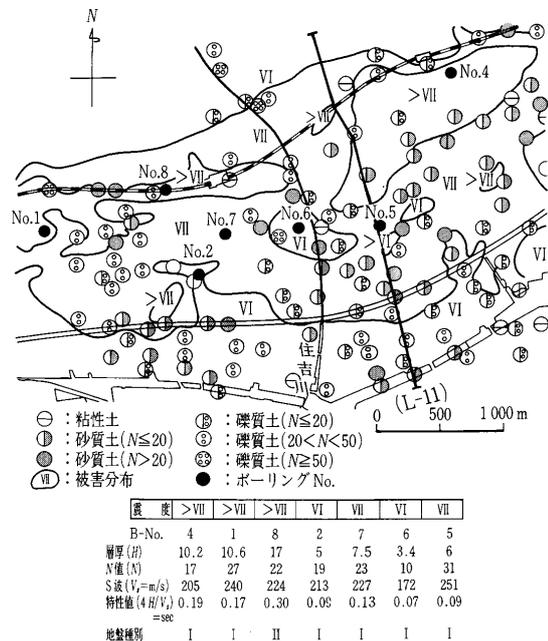


図-3 表層地盤特性および被害分布図 (東部域)

また、海岸域付近では、 $N=20$ 前後の砂質土 (As) および砂礫 (Ag) が分布するが、 T_G はおおむね0.10秒以下と推定され、震度VIとなっている。

3. 地盤特性値と震度および倒壊率の関係

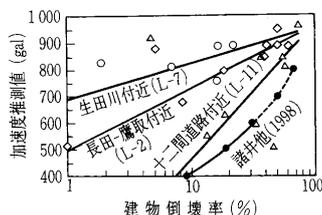
強震記録観測点の土質柱状図³⁾を用いて、表層地盤特性値 T_G を求め、最大水平加速度 A と表層地盤特性値 T_G との関係を以下の式にまとめた。

$$A = 100 \times T_G^{-B}, B = 2.34 + 0.65 \times \ln(T_G) \dots (2)$$

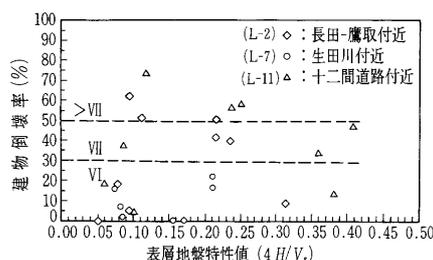
ここに A = 最大水平加速度 (gal), $T_G = 4H/V_s$ (m/s), H : 表層の厚さ (m), V_s : S波速度 (m/s)。

それによると、両者の関係は表層地盤特性値 T_G の逆数 ($1/T_G$) = 3~5 Hz (Ⅱ種地盤) の周波数帯域で増幅する凸の関係を示した¹⁰⁾。また、中央部域において、被害調査による震度とその地点の表層地盤特性値の逆数 $1/T_G$ も同様な関係を示した¹⁰⁾。本式を用いて、各詳細被害調査地点¹⁾の表層地盤特性値 T_G から推定した最大加速度との関係を求めた (図—4)。それによると地域ごとに異なるが、両者に強い相関性が見られた。

次に、同様に建物倒壊率¹⁾と表層地盤特性値 T_G の関係を求めた (図—5)。これによると、倒壊率の大きくなる被害は、 $T_G=0.12, 0.24$ および 0.36 秒前後に数次モード的に集中して現れた。建物と表層地盤の共振(振幅)現象による可能性を示唆するものと考えられる。また同じ特性値 (例えば0.21秒) における被害差は、地域によ



図—4 倒壊率と加速度の関係



図—5 倒壊率と表層地盤特性値の関係

る深部構造の影響の異なる現れとも考えられる。

また、両者間の関係は各ラインで異なっており、墓石調査から推定した諸井ら¹³⁾との結果と比較すると、倒壊率に比べて推定加速度はいずれも大きくなった。加速度の推定法のほかに、倒壊率の違い、また各区域の建物の老朽度差の影響によることなどが考えられる。

なお、本検討の前に、“震災の帯”の原因を検討するために、ポートアイランドの地震記録と東灘区の深層調査で作成された地質構造モデルと表層地盤構造モデルを用いて、波動方程式シミュレーション解析を行った結果によると、いずれのケースも山側の断層に近いJR線付近から振幅が急速に大きくなることを示した¹¹⁾。このゾーンは、断層下盤の基盤深度の急変点付近と対応し、海側に向かって一定の幅を有しているため、深い地質構造の幾何学的形状によるフォーカシング効果を示したものと考えられた。

4. 断層からの距離と被害の関係

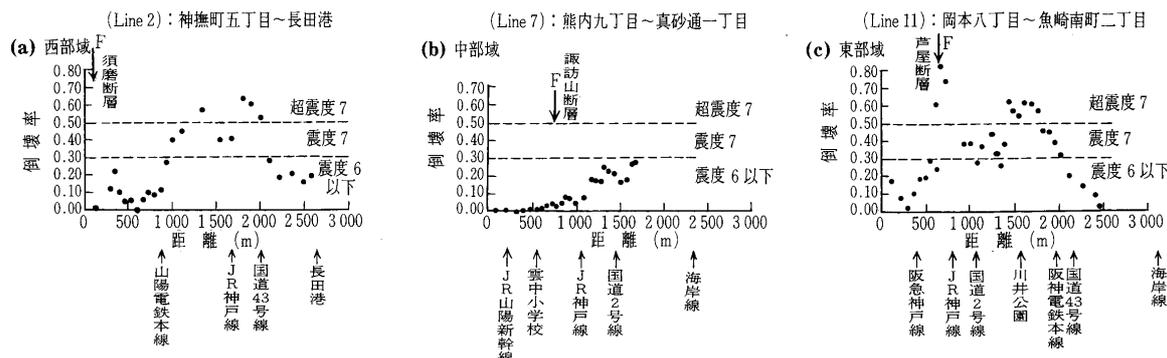
“震災の帯”の北側の山麓沿いに六甲断層帯が分布する。これらの断層を震源断層とみなして、精査ライン3ルート(西部域(L-2)、中央部域(L-7)、東部域(L-11))建物の倒壊率と断層からの距離との関係を調査した。その結果3ラインとも、距離1km以内では、全域にわたって倒壊率30%以下(震度VI)であり、一部分は震度Vとなっている。“震災の帯”は断層から1~2kmの距離の範囲に平行に分布し、倒壊率0~50%の域は距離0.2~1.7km付近に、倒壊率50%以上の域は距離1.4~2.0km付近に部分的に分布する傾向にある。また、断層から0~3kmの範囲内においては、断層から離れるほど倒壊率が增大する傾向にあり、距離減衰の傾向は各ラインとも認められない。

以上の結果を整理すると、震災の帯の中の地形・地質・地盤特性および断層から距離と被害度との関係は、区域別に表—2のようにまとめられる。

5. まとめ(震災の帯状・島状分布と断層構造・地質・地盤特性の影響)

本文における検討結果から、震災の島状、帯状分布の成因に及ぼす地質・地盤特性の影響について以下のようにまとめられる。

1) 地形・地質・地盤特性の素因として以下の3点が



図—6 精査ルートの倒壊率調査結果

表-2 “震災の帯”の中の地形・地質・地盤特性と被害度との関係

区域	代表地点	標高 (m)	地形特徴	表層地質	地盤特性 ($N > 50$ $\sigma_s < 350$ m/s)				震度 (JMA)	活断層から の距離 (km)
					N値	V_s (m/s)	厚さ (m)	$T_G = 4H/V_s$ (s) (地盤種別)		
西部域	JR新長田～ 鷹取駅	7～10	後背(低)湿地	粘性土(Ac)卓越	2～7	150	11～20	0.26(Ⅱ)	>Ⅶ	1.0～2.1
	妙法寺川流域	5～20	緩扇状地(F-3)	砂質土(As)卓越	5～20	180	5～10	0.16(Ⅰ)	Ⅵ, Ⅶ	0.6～1.8
	阪神高速道路 南	5～7	沿岸砂礫洲	砂礫(Ag)卓越	≥ 30	230	≤ 5	<0.08(Ⅰ)	Ⅵ	2.1～2.8
中央部域	三ノ宮駅～ 市役所	7～15	河成低地, 緩扇状地 (F-2, F-3), 凹地形 構造	砂質土(As, Tls) 卓越	12～25	170	≤ 15	0.35(Ⅱ)	>Ⅶ	0.6～1.3
	生田川流域	5～40	扇状地	砂礫(Ag)卓越	30～40	270	5～8	0.07(Ⅰ)	Ⅵ	0.2～1.3
	県庁～ 元町駅ライン	10～25	扇状地, 丘陵 (F-2, F-1)	砂, 砂礫(Ag, Tls) 卓越, Tm層薄い	20～50	230	≤ 10	0.17(Ⅰ)	Ⅵ	1.0～1.5
東部域	天上川ライン	12～20	緩扇状地(側扇部, F-3)	砂質土(As, Ags) 卓越	5～15	180～200	10～15	0.19(Ⅰ)～ 0.33(Ⅱ)	>Ⅶ	0.2～0.7
	石屋川ライン	12～20	緩扇状地(側扇部, F-3)	砂質土(As, Ags) 卓越	10～25	150～240	≤ 12	0.17(Ⅰ)～ 0.26(Ⅱ)	>Ⅶ	1.1～2.0
	住吉川ライン	5～40	(緩)扇状地(F-3)	玉石砂礫(Ag, Ab) 卓越	20～40	250～270	5～10	<0.10(Ⅰ)	Ⅵ～Ⅶ	0.17～2.0

(注: >Ⅶは倒壊率50%以上)

あげられる。

- ① 六甲南山麓平野地下には、落差1000～1500 mの数条の逆断層構造が発達する。
 - ② 平地の表層地盤地質は、主として後期更新世以降から完新世に至る連続した扇状地性粗粒堆積物($N=10 \sim >50$)と沖積低地の後背湿地性の粘性土($N=3 \sim 5$)および海成粘土(Ma13, $N=1 \sim 3$)からなる。
 - ③ 低位段丘層砂層(Tls)のN値は、おおむね50以下であり、本層は工学的には表層地盤に該当すると考えられる。
- 2) 六甲断層帯を震源断層とみて、断層からの距離と倒壊率の関係をみると、被害は断層近傍1 km以内では小さく、倒壊率は断層から1～2 kmの帯の中で最大であるが、その中でも、大小に変化する傾向にある。震源近傍域の被害(揺れ)は、震源断層からの距離減衰の関係は明らかでない。
 - 3) 震度Ⅵ以上の幅1～2 kmの“震災の帯”の生じた主な原因は、大局的には深さ1000～2000 mに及ぶ深い二次元的断層構造形状により地震波動が被覆層で実体波と表面波の増幅、干渉(フォーカシング効果)によるものと推定される。
 - 4) この震災の帯の中で、震度Ⅶ以上の島状の被害差が生じた主な原因は、震災の帯の中でN値50以下の低速度表層地盤($V_s \leq 150 \sim 300$ m/s)で5～15 m程度の厚さの違いがあり、表層のくさび状または凹地形構造を有し、かつ表層地盤特性値 $T_G (=4H/V_s)$ に支配され、とくに T_G 0.12～0.4秒付近の地盤特性で増幅が生じたものと推定される。
 - 5) 建物の倒壊率は、表層地盤特性値 $T_G=0.12$ s, 0.24s, 0.36sの周期で数次モード的に増加する傾向を示し、かつ地盤と建物の共振現象の影響があったことを示唆する。

以上、被害に及ぼす断層構造、地質・地盤特性の影響について検討し、被害の島状・帯状分布の原因についても述べたが、工学的地盤の設定条件の妥当性および表層地盤特性値と地盤特性値との関係については、データを追加し、更に検討する必要があると考えている。

参考文献

- 1) 中央開発：兵庫県南部地震・阪神大震災災害調査報告書, 1995.
- 2) 神戸市企画局, 岩見義男編：神戸の地盤, 神戸市, 1980.
- 3) 地盤工学会阪神大震災調査委員会：阪神・淡路大震災調査報告書(資料編 Vol. 1), pp. 43～144, 1996.
- 4) 兵庫県阪神地域活断層調査委員会：阪神・淡路大震災調査報告書, 兵庫県, 1996.
- 5) 阪神高速道路公団：阪神高速道路公団3号神戸線, 5号湾岸線(震災復旧編)地質資料, 阪神高速道路公団, 1997.
- 6) Pitarka et al.: Basin structure effects in the Kobe area inferred from the modeling ground motions two after shocks of the January 17, 1995 Hyogoken-Nanbu-earthquake, Jour. phys. Earth, 1995.
- 7) 岩崎好則：直下型地震の地震動特性と残されている問題, 第33回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1121～1122, 1998.
- 8) 石川浩次・溝口昭二・小野 論：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.
- 9) 石川浩次・細谷卓志・逸見健一郎：兵庫県南部地震における“震災の帯”の中の被害の差と地形・地盤条件—(神戸市中央部域)—, 第33回地盤工学研究発表会講演集, pp. 209～210, 1998.
- 10) 馮 少孔・石川浩次・緒方信一：1995年兵庫県南部地震における表層地盤の動的特性及び地震動の評価, 第33回地盤工学研究発表会講演集, pp. 207～208, 1998.
- 11) 石川浩次・馮 少孔：深い地質構造の地盤特性と“震災の帯”の検討, 日本応用地質学会平成8年度研究発表論文集, pp. 101～104, 1996.
- 12) 神戸市震災復興本部：Kobe-Jibankun(未公開データ), 神戸市, 1998. 12公表予定.
- 13) 諸井孝文・武村雅之・宮村正光：1995年兵庫県南部地震による気象台震度と住家全壊率の関係, 第11回日本地震工学シンポジウム, pp. 238～244, 1998.

(原稿受理 1998.9.7)