

兵庫県南部地震による被害集中領域発生と地盤の関係

那須 誠¹

¹フェロー会員 博士(工学) 前橋工科大学教授 工学部建設工学科(〒371-0816 前橋市上佐鳥町460-1)

1. まえがき

現在、各種地震で発生した橋梁や建物等の被害を地盤条件に着目して調べている。1995年兵庫県南部地震の際に発生した構造物の被害集中領域である震度VIIの領域(震災の帯)は、地盤条件の変化点である岩盤と土砂堆積地盤の境界部でしかも後者側で生じている。これは各種構造物の地震被害などが硬軟地盤境界部の軟質地盤側で生じやすいことと似ており、地盤に生じた大きい歪の影響でその被害が発生したことが推定される。また、被害集中領域は基盤表面の傾斜角度が小さくなるとともに海岸線から離れて行く傾向も認められる。そのため今回、地盤条件の変化点の影響と基盤の傾斜角度の影響を調べるために簡易な解析モデルを作成して地震応答解析を行い、その歪の影響と基盤傾斜角度の影響を調べた。

2. 震度 VII の領域(震災の帯)と地盤状態

ここでは震度 VII の領域(震災の帯)への地盤の影響について考察する。

(1) 今回の震度 VII の領域(震災の帯)は図-1 に示すように六甲山地の活断層からややずれた海側に現れた²⁾。図-2 は六甲山地周辺の接峰面図(峰の等しい標高を結んだ線図)³⁾に震度 VII の領域 a~g⁴⁾を追加記入した図¹⁾である。この図をみると、西宮付近の領域 e を除くと、震度 VII の領域は神戸や芦屋、西宮付近(図中の領域 a, b, c, d)では六甲山地の麓にあり、宝塚付近(図中の領域 f, g)では北摂津山地の麓にあっ

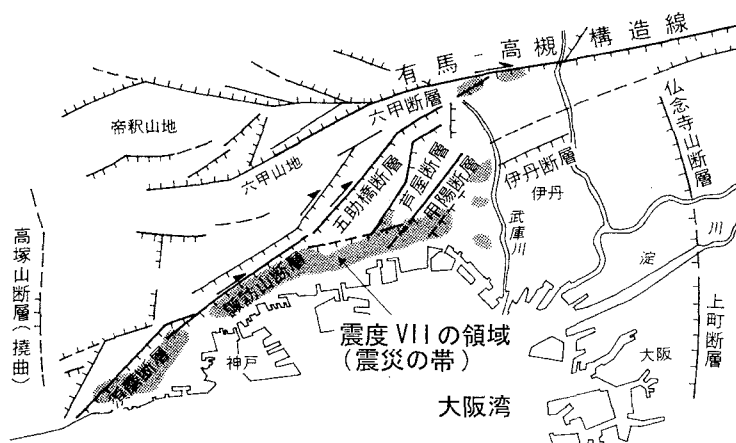


図-1 震度VIIの領域²⁾

て、殆どが地盤面の等高線の密なところではなくその脇の等高線間隔が大きいところに現れている。この等高線間隔から地盤状態を考慮すると、六甲山地の岩盤((花崗岩などの基盤岩で、以下では岩盤層と称する))と低平地の土砂その他からなる大阪層群と洪積、沖積層からなる堆積層(以下では堆積層と称する)の境界部の後側側、即ち硬軟地盤境界部の後側側で、震度 VII の領域が発生したことが推定される¹⁾。

伏在断層と震度 VII の領域は図-1 に示すように必ずしも一致していないことと、地質平面図上の震度 VII の領域を示す図-3 及び同図中の東灘区と中央区を横断する地盤の断面図を示す図-4 から分かるように、震度 VII の領域は伏在断層がつくる基盤の大きな段差の下盤側に位置していること等が明らかにされている²⁾。なお、文献 5) をみると領域 a と b の間は台地と段丘で昔から集落がある良好な地盤であり、また明治 18, 19 年作成の旧版地形図⁶⁾に震度 VII の領域を追加した図-5¹⁾をみると西宮の領域 e の南西側に接して昔から町が存在する良好な地盤(

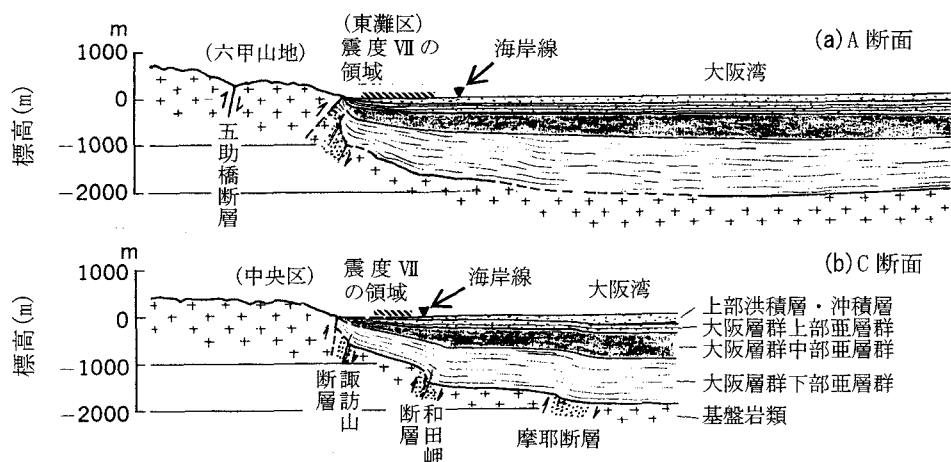


図-4 東灘区と中央区の地質断面図(図-3のA、C断面)²⁾

自然堤防)がある¹⁾。

(2) 図-4より震度VIIの領域(震災の帯)が六甲山地の岩盤とそれに接する堆積層の境界部の後者側で生じていることが分かる。しかも、図-3の地質図のA、C断面図の外に灘区と兵庫区のそれぞれB、D断面図(ここでは省略)もみると、震度VIIの領域はA断面付近で六甲山地に最も近い位置にあることと、B、C、D断面の順に六甲山地から海側に離れる傾向があることと、このことは六甲山地から海側へ続く部分の埋没岩盤表面(大阪層群底面)の勾配がA断面からD断面にかけて小さくなることに対応して発生していることが分かる¹⁾。

ここで、文献2)をもとに作成した、震度VIIの領域の発生位置と基盤(岩盤)面傾斜角度の関係を示す図-6⁸⁾をみると六甲山地の麓での震度VIIの領域の発生位置が埋没岩盤表面の勾配が小さくなるにつれて、六甲山地から海側に離れるとともに震度VIIの領域の幅が狭くなる傾向も明瞭に読み取ることが出来る。このように、震度VIIの領域の位置はA、B、C、D横断面の順に堆積層底面の傾斜が緩くなるとともに、海岸側に移動しており、それはあたかも軟らかい土層は厚さが薄くなるとともに相対的に剛性が大きくなるため、地震時の地表面変位が小さくなることに対応しているかのようである。震度VIIの領域の発生状態には六甲山地近くの堆積層底面の傾斜が急で深い部分よりも緩く浅い部分の剛性が相対的に大きいこと等が影響しているものと推定される¹⁾¹⁰⁾。

(3) 六甲山地周辺の接峰面図³⁾と兵庫県南部地震の速度記録の粒子軌跡⁷⁾の関係を示す図-7¹⁾をみると、

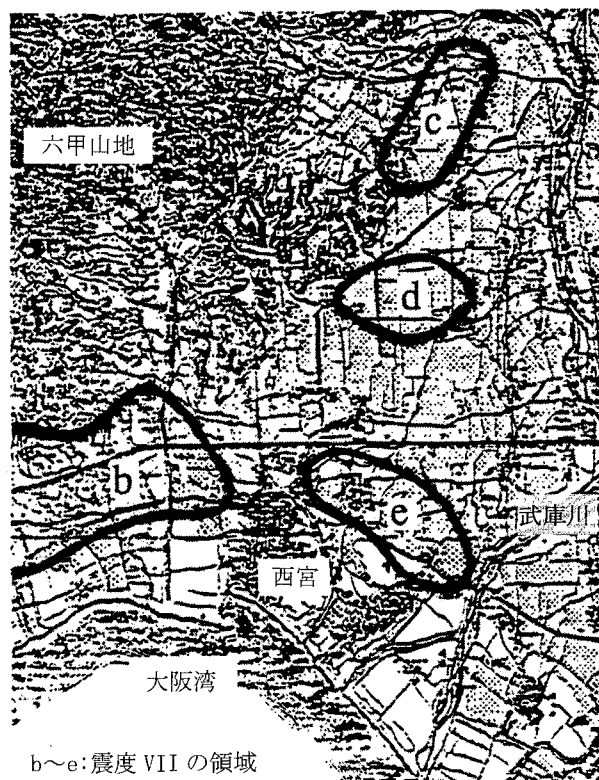


図-5 西宮市付近の旧地形図と震度VIIの領域⁴⁾の関係(文献6)に同4)を追加)¹⁾

神戸から芦屋にかけての地盤が傾斜したところでは粒子軌跡は長円形を示すとともに、その軌跡の長軸方向が地表面の最大傾斜方向にほぼ一致し、尼崎や大阪の平野内のほぼ水平なところでは粒子軌跡の南北方向と東西方向の振幅がほぼ等しい大きさである

1)9)10)。ポートアイランド付近は軟弱粘性土層が北西から南東方向に傾斜して厚くなっており、それらも考慮すると地震時の地盤は地盤の傾斜方向や土層の厚くなる方向に大きく動き易い性質を持つことが推察される¹⁾。

硬軟地盤境界部では地震時に軟質地盤はその境界線に平行に動くこともあるが、例えば六甲山地の麓の部分のように山側から海側にかけて地層が傾斜しているためその傾斜方向に地盤が動き易く、軟質地盤が海側から山側の方向に動くときもあれば、逆に山側から海側の方向に動くときもあることが考えられる。また、軟質地盤と硬質地盤の境界部分では、地震のときに軟質地盤に前者の場合には短縮側の動きが、後者の場合には伸張側の動きが生じて、いずれの場合にも歪が大きく生じることが考えられる¹⁰⁾。従って、地震時には地盤にこれらの伸長側や短縮側の動きや歪が急速に大きく生じ、これに伴って地盤に生じた大きい力が建物や橋梁等に作用して被害が大きく発生したこと等が考えられる。しかも、地盤の動きに追従できない状態にある構造物(異種支持地盤状態や完全支持杭基礎等の構造物)に地震被害が多いのは、地盤条件の変

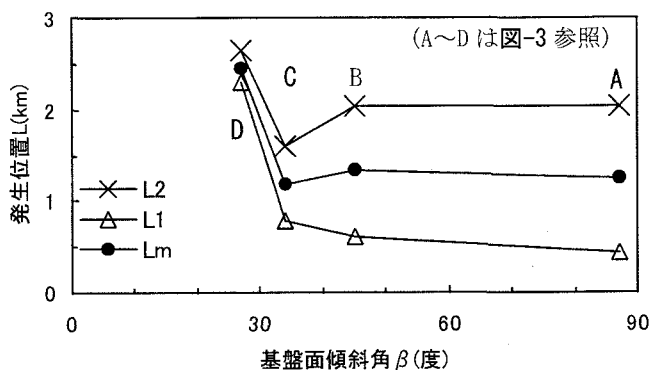
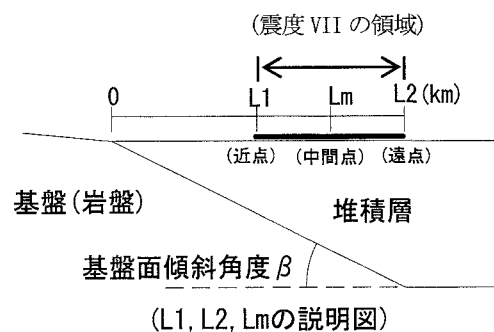


図-6 震度Ⅶの領域A～Dの発生位置と基盤面傾斜角
度の関係(文献2)をもとに作成)⁸⁾

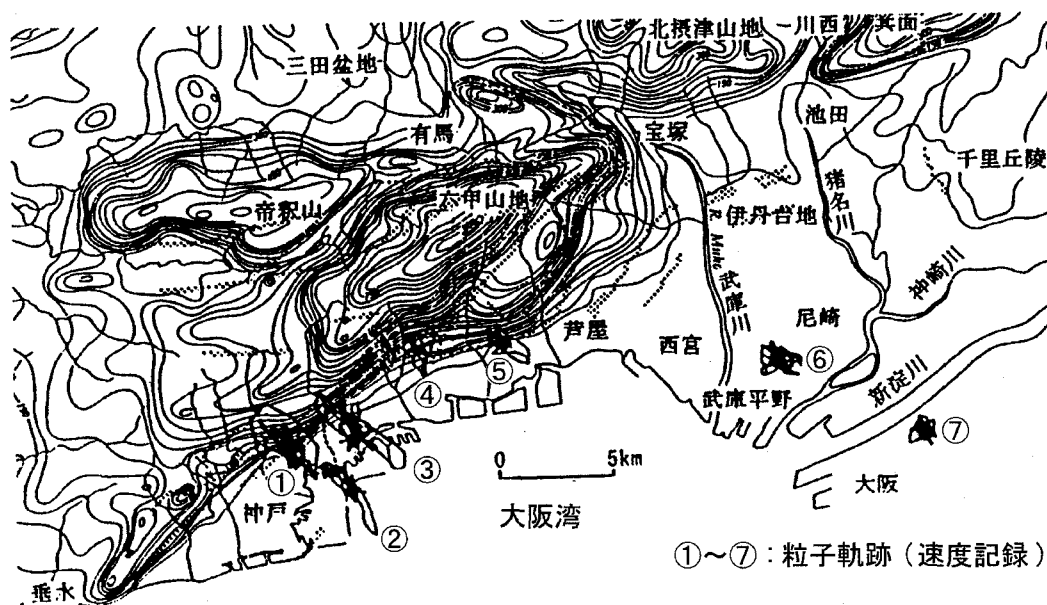


図-7 六甲山周辺の接峰面図と地震動による粒子軌跡の関係(文献3)に同7)を追加)¹⁾

化点に発生する地盤の伸縮や歪に基づく力がなお一層大きく作用するためと考えられる¹¹⁾。

なお、図-8 は 2002 年 6 月のイソ(Changureh-Avaj)

地震の被害箇所(●印は建物被害箇所, ▲印は飛び石発生箇所¹²⁾)を示している。その被害は南北両側の山脈の間の南北約 20km の範囲に発生し、特に南側に被

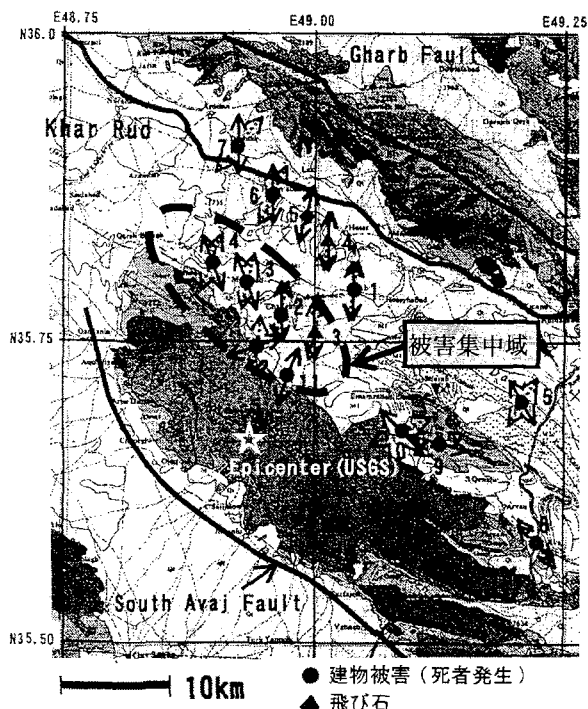


図-8 2002年6月のイラン(Changureh-Avaj)地震の被害箇所¹²⁾

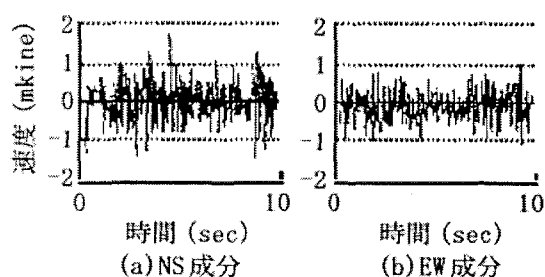


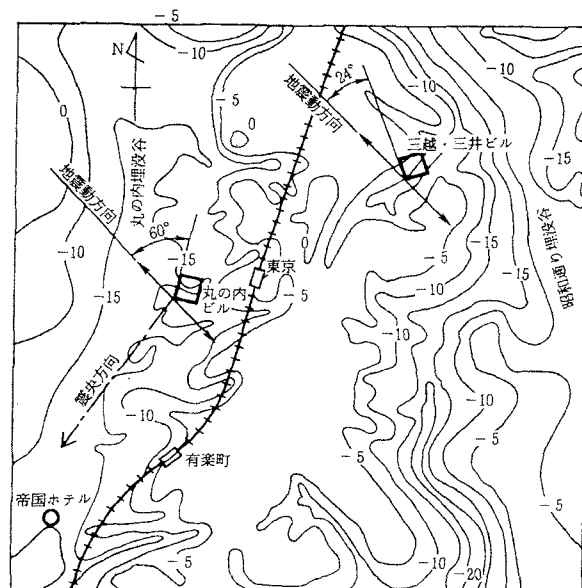
図-9 神戸市役所付近の常時微動¹³⁾

害が集中(破線の楕円内)している。しかもここでも断層から離れたところの山際で、地盤の良い山地と土砂堆積層の境界部の後側で被害が集中して発生している。即ち、神戸付近の震度 VII の領域(震災の帯)と同様な地盤条件の変化点で発生していることが分かる。

3. 解析方法

上述した地盤構造即ち地盤条件の変化点と基盤の傾斜角の影響を調べるために、軟弱地盤と基盤からなりたつ地盤の簡易な解析モデルを作成して地震応答解析を行った⁸⁾。

まず、今回の地震では図-7 に示すように地震動が



(実線の矢印は 1923 年関東大地震の際の丸の内ビルと三越・三井ビルでの地震動の作用方向)

図-10 東京駅付近の沖積層底面の等深線(T.P., m)¹⁵⁾

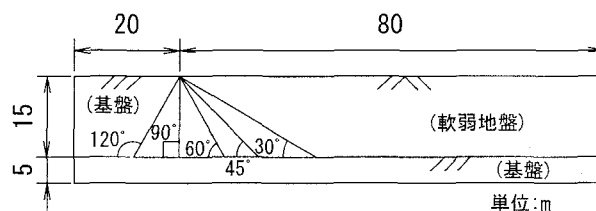


図-11 解析地盤モデル

NS 方向即ち六甲山斜面の最大傾斜方向に卓越したが、地震が生じていない常時にも例えば図-9¹³⁾に示すように微動が同じ南北(NS)方向で地盤の傾斜方向に卓越しているので⁹⁾¹⁴⁾、解析モデルの加振方向は水平方向(後掲の図-11 の左右方向)とする。また、解析モデルの軟弱地盤厚さは例えば図-10¹⁵⁾に示すように過去の地震被害が軟弱地盤厚さが約 15m までの地盤で多くみられること¹⁶⁾から 15m とする。

以上のことを考慮して図-8 に示すように、軟弱地盤底面が傾斜した部分と水平な部分からなり、軟弱地盤底面傾斜部分の傾斜角(水平方向とのなす角度)を 120°と 90°, 60°, 45°, 30°の 5 種類に変化させた 2 次元解析モデルを作成した。

解析定数を表-1 に、地盤のせん断弾性係数比と減衰定数の歪依存性を図-9¹⁷⁾に示す。入力する地震動の波形は図-10¹⁸⁾に示す神戸海洋気象台の記録波形の NS 成分であり、最大値を 100gal に調整して地盤モデルの底面から上昇波として入力させた。このときに使用した地震応答解析プログラムは micro-FLUSH¹⁹⁾である。

表-1 土質定数

項 目	基盤	軟弱地盤
単位体積重量 ρ (t/m ³)	1.95	1.80
初期せん断弾性係 G_0 (MPa)	9.81E2	1.45
初期の減衰定数 h_0	0.005	0.05
ポアソン比 ν	0.40	0.492

4. 解析結果

解析では地表での応答や地盤の変形状況への基盤面傾斜角度の影響を把握するため、せん断歪みやせん断応力、加速度、速度、変位の最大値とモデル全体の変形図等を求めた。図-11 は各モデルの地表面の最大せん断歪分布を示す。このような図をせん断歪以外にも作成して求めた最大値の発生位置は、水平加速度や速度では基盤・軟弱地盤境界点上(水平距離20m)で、せん断応力では距離 0~20m 間の基盤面上で生じ、水平・鉛直の直歪は境界点近くの軟弱地盤で生じた。しかし、それら以外では図-12 の関係が得られ、水平相対変位の 120° と 90°、せん断歪の 30° の場合を除くと傾斜角度が小さくなるにつれて水平距離が20m より遠い地点で最大値が現れた。水平直歪と鉛直直歪では図-11 の水平相対変位と類似の傾向が得られたが、変位と異なり最大値の水平方向の分布範囲が比較的狭い。

構造物への影響が大きいと考えられるせん断歪の最大値は特に顕著に傾斜角度が小さくなるにつれて遠方で現れており、しかも図-13 に示すようにその歪の最大値の大きさも小さくなる。この傾向は Fig. 6 と対応していると考えられる。なお、せん断歪の最大値発生地点の距離が 45° のときより小さくなっている 30° の場合はせん断歪も小さく生じており、被害が生じにくくなることに対応するようである。それは実際の地震被害発生状況を見ると、例えば両側の地盤面勾配が異なるような自然堤防等では地盤面勾配の急な方で被害が多くみられる(例えば文献 15) 参照) ことと関係があるように思われるからである。

なお、図-11 においてせん断歪の最大値発生位置付近で、例えばせん断歪1/10.0025 の水平線と歪曲線の左右交点間の間隔をみると、それは基盤面傾斜角度が 120° や 90° のときに最も大きくその角度が小さくなるにつれて減少する傾向が認められる。これは図-6 が示す埋没岩盤表面勾配が小さくなる

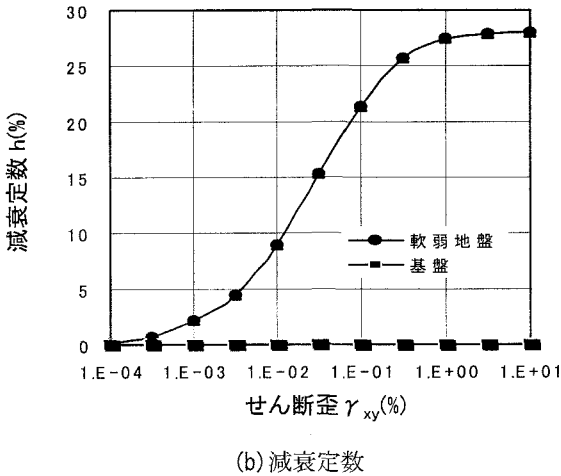
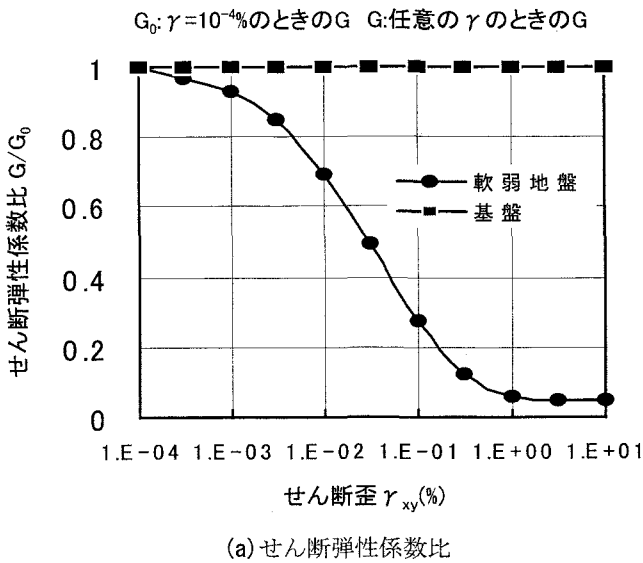


図-12 せん断弾性係数比と減衰定数の歪依存性

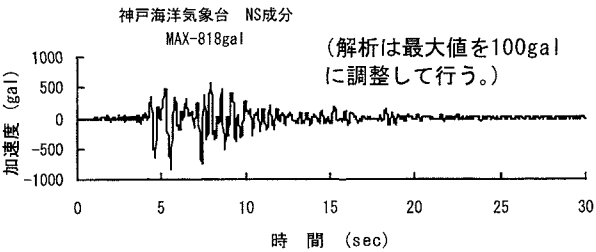


図-13 入力波形¹⁸⁾

につれて震度 VII の領域の幅が狭くなる傾向と対応していることが考えられる。

5. まとめ

兵庫県南部地震による震度 VII の領域(震災の帯)

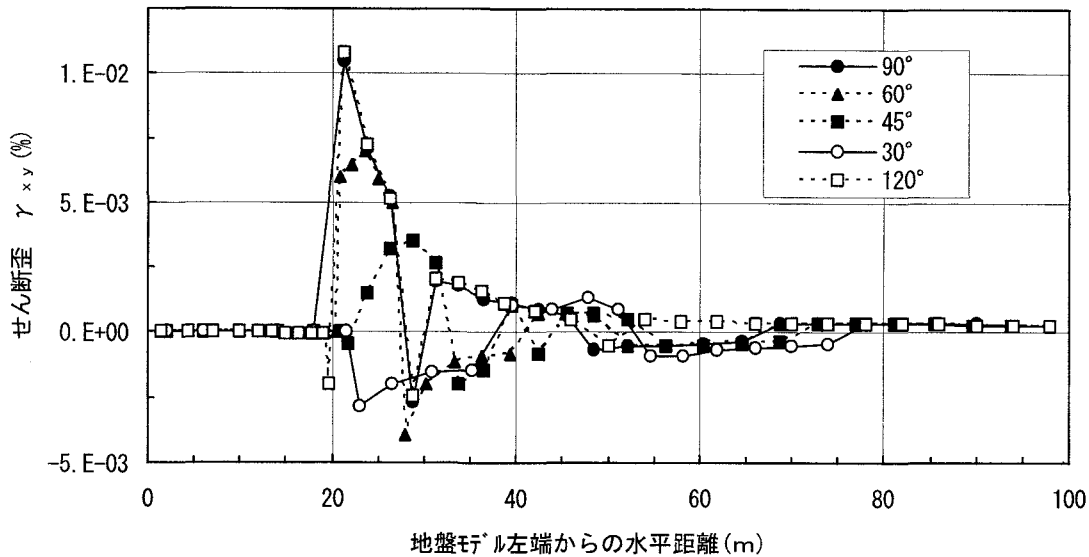


図-14 地盤表面におけるせん断歪の分布

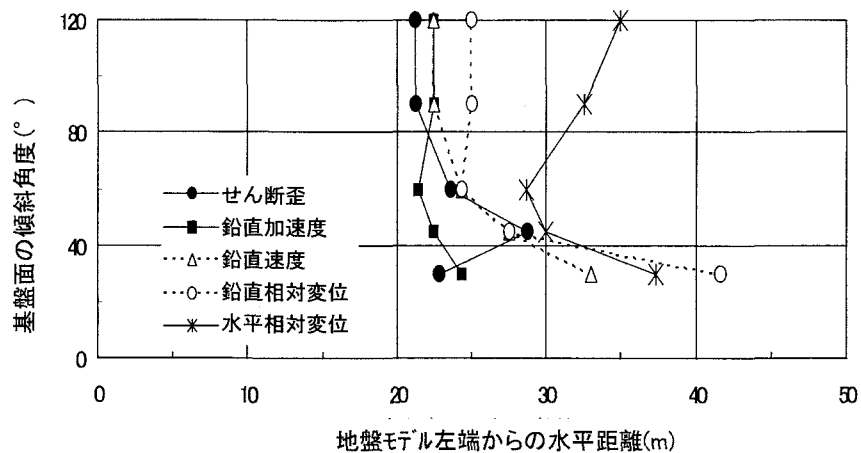


図-15 最大せん断歪と鉛直加速度, 鉛直速度, 鉛直相対変位発生位置と基盤面傾斜角度の関係

も各種構造物の被害と同様に地盤条件の変化点で、即ち硬軟地盤の境界部の軟質な地盤側で生じており、これは地震被害も含めて一般的に地盤や構造部材の剛性変化点で相対的に軟らかい側で問題が発生し易いこと⁹⁾²⁰⁾と似ている。

なお、震度 VII の領域(震災の帯)は詳しく見ると複雑であり、西宮や宝塚では帯状の激震地帯から離れた位置に飛石状にも発生した。しかし、今回実施した地震応答解析では簡易な地盤モデルを用いたが、その結果からも震度 VII の領域の発生に地下構造と表

層地盤特性等が大きく影響したこと、即ち地盤の形状と土質が大きく影響し、地盤条件変化点において地盤に発生した大きいせん断歪が大きく影響した可能性等が推定される。今後、実際の地盤をモデル化して地震応答解析を行って詳細に検討する予定である。

謝辞：以上の調査と地震応答解析でお世話になった宇高竹和株式会社地震工学研究所代表取締役、森本巖基礎地盤コンサルタンツ株式会社地震防災室長、大場恒彦日本物理探査株式会社技師長、引用させていただ

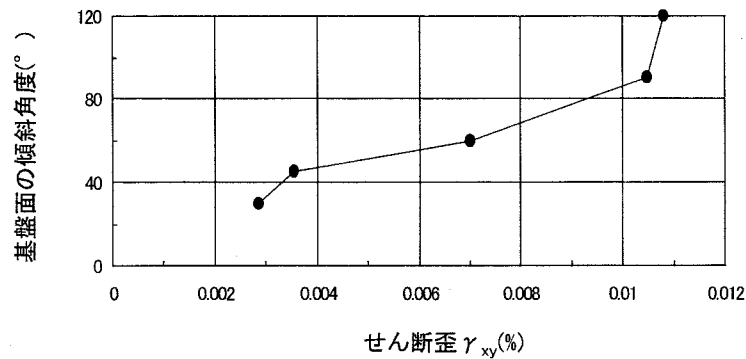


図-16 最大せん断歪と基盤面傾斜角度の関係

た貴重な文献の著者藤田和夫博士他の方々並びに解析作業で御協力を頂いた本学卒論生の高田健太郎君に厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 那須誠:兵庫県南部地震による震度 VII の領域と地盤, 第 26 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要, I-68, pp. 128-129, 1999. 3.
- 2) 藤田和夫, 佐野正人:阪神・淡路大震災と六甲変動, ”震災の帯” をもたらした埋没地形, 科学, Vol. 66, No. 11, pp. 793-805, 1996. 11.
- 3) 藤田和夫, 笠間太郎:大阪西北部地域の地質, 地域地質研究報告, 地質調査所, 1982.
- 4) (社)日本建築学会編:阪神・淡路大震災調査報告, 建築編 1, 鉄筋コンクリート造建築物, p. 42, 丸善, 1997. 1.
- 5) 建設省国土地理院編:土地条件調査報告書附図(京都播磨地域), 1966. 3.
- 6) 地形図, 1:2 万, 1884 年測量, 今津村, 1885 年測量, 西宮町.
- 7) 瀧瀬一起, 吉田真吾, 植竹富士:震源過程モデルによる兵庫県南部地震の強震記録の再生, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会, pp. 97-102, 1996. 1.
- 8) 那須誠:震災の帯(震度7の領域)発生原因の研究-簡易モデルによる地震応答解析-, 第20回日本自然災害学会学術講演会要旨集, No. 2-9, pp. 85-86, 2001. 10.
- 9) 那須誠:地震動と地形の関係, 研究集会「地震波伝播の理論とシミュレーション」配布資料, 東大地震研, 1997. 5.
- 10) 那須誠:地震被害への地盤の影響と被害機構の推定(その 5, 地震動と地形の関係), 前橋工科大学研究紀要, 第 5 号, pp. 39-46, 2002. 3.
- 11) 那須誠:地震による被害構造物と無被害構造物の地盤の違い, 土木建設技術シンポジウム2003 講演論文集, pp. 299-306, 2003. 7. 25, 東京.
- 12) 源栄正人, 鏡味洋史, M. R. Ghayamghamian:2002 年 6 月 22 日イラン(Changureh-Avaj)地震被害調査報告-その 1:構造物被害から見た震源近傍における地震動の方向性, 日本自然災害学会学術講演会講演概要集, 2002. 9.
- 13) 藤原悌三ほか:平成 7 年兵庫県南部地震の被害調査に基づいた実証的分析による被害の検証, 資料編 兵庫県域における合同微動観測, 平成 7 年度文部省科学研究費研究成果報告書(課題番号 07300005), pp. 66-82, 1996. 3.
- 14) 那須誠, 水出有紀, 大場恒彦:地盤条件変化点における建物の地震被害への地盤の影響の考察, No. 303, 土木学会地震工学論文集, 第27巻, 2003. 12.
- 15) 那須誠:震央方向と直角方向に生じた地震被害と地盤構造, 鉄道総研報告, Vol. 5, No. 4, pp. 53-61, 1991. 4.
- 16) 那須誠:地震被害と地盤構造の関係, 日本応用地質学会平成 3 年度研究発表会講演論文集, No. 23, pp. 89-92, 1991. 10.
- 17) 那須誠, 羽矢洋:鉄道線路沿いの土の動的性質-動的変形定数と液状化強度-, 鉄道総研報告, Vol. 2, No. 1, pp. 45-51, 1988. 1.
- 18) (財)日本気象協会編:平成 7 年兵庫県南部地震の記録, 1995. 1. 17.
- 19) 株式会社地震工学研究所編:micro-FLUSHマニュアル, 1997. 9.
- 20) 那須誠:阪神・淡路大震災による構造物被害と地盤の関係, 第 4 回耐震補強・補修, 耐震診断に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp. 123-130, 2000. 7.