

兵庫県南部地震による被害集中領域発生と地盤の関係 （その2、より実物に近い地盤モデルの地震応答解析）

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 前橋市上佐島町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年兵庫県南部地震によって構造物の被害が集中して発生した領域がある。これは地盤条件の変化点である岩盤基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。

そのため、このような地盤条件の変化点に焦点を当てて行なった簡易地盤モデルを用いた地震応答解析結果を、「第7回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム」において発表した¹⁾。その解析によって特に地盤歪の最大値の発生位置が基盤表面の傾斜角度が小さくなるとともに海岸線方向に接近して行く傾向が認められた。それは被害集中領域が基盤表面の傾斜角度が小さくなるとともに海岸線方向へ接近していく実際の傾向と似ていた。

しかし、2005年福岡県西部地震でも同様に地

盤条件の急変箇所では被害が集中する現象が発生しており、前回使用した地盤モデルは簡易なものであったため、今回はより大きく実際に近い地盤モデルを用いて、地盤条件の変化点の影響と基盤の傾斜角度の影響をしらべる地震応答解析を再度行なったところ、前回発表とほぼ同様な結果が得られたので、その結果を報告する。

2. 地震動と地盤・地形との関係の例

（1）兵庫県南部地震の地震動記録と地形の関係

1995年兵庫県南部地震（ $M=7.2$ ）の際に発生した構造物の集中被害領域である震度Ⅶの領域（震災の帯）は伏在活断層の位置とは必ずしも一致していない。震度Ⅶの領域（震災の帯）は、例えば図1に示すように六甲山地の岩盤とそれに接する堆積土層の境界部の後側で生じている²⁾。このように、硬軟地盤境界部の軟弱地盤側で発生している。しかも、その発生位置は東側から西側にかけて六甲山地から海側に離れる傾向が認められる¹⁾。

ここで、文献2)をもとに作成した、震度Ⅶの領

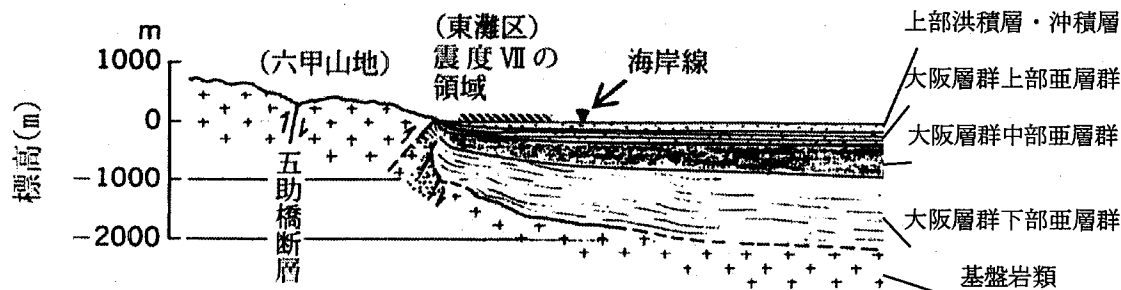


図1 神戸市東灘区の震度Ⅶの領域と地質断面図の関係²⁾

域の発生位置と基盤（岩盤）面傾斜角度の関係を示す図2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、海岸側に移動している¹⁾。

図3は兵庫県南部地震の時に神戸市内～大阪市内で記録された地震動（速度記録）を六甲山周辺の接峰面図（峰の等しい標高を結んだ線図）に記入したものである³⁾。等高線の密なところの①～⑤の粒子軌跡は長円形を示し、その長軸方向は等高線に対してほぼ直角方向になっている。等高線間隔の大きなところの⑥、⑦の粒子軌跡は南北方向と東西方向の振幅がほぼ等しい³⁾。また、全体的に見ると岩盤のある山側で振幅は小さく、堆積層の厚い海側で大きな振幅を示している傾向があり堆積層による増幅効果が推定される⁴⁾。

図4は兵庫県周辺の墓石の転倒、回転方向を示したものである⁴⁾。図3と比較すると、阪神地域では墓石は等高線に対しほぼ直角方向に転倒し、淡路島地域では海岸沿いでは海岸線に対してほぼ直交しているものが多いことが読み取れる³⁾。これから地震動は等高線に対し直角方向に発生しやすいことが考えられる³⁾。

（2）福岡県西方沖地震の地震動と地形の関係

2005年3月20日に、福岡市の北西約40kmを震源とする福岡県西方沖地震（ $M=7.0$ ）が発生した。この地震においても警固断層周辺に壁や柱、家屋等の損傷、ブロック塀の崩壊などの構造物の被害集中領域が発生している（図5）⁵⁾。警固断層付近で被害が大きいことの要因としてその特異な地形が考えられている⁶⁾。警固断層は基盤（砂岩、礫岩、シルト岩よりなる）の深さが大きく変化するところに位置している。断層の西側は基盤

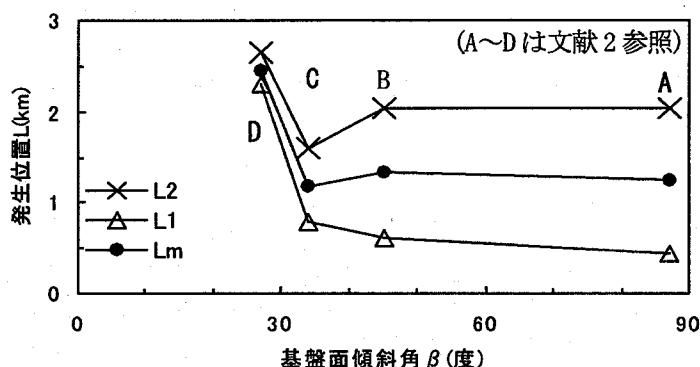
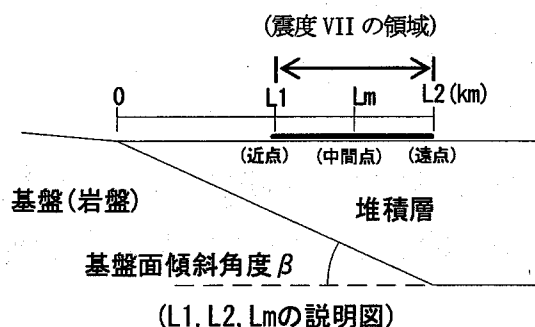


図2 震度Ⅶの領域の発生位置と基盤面傾斜角度の関係（文献2）をもとに作成）¹⁾



図3 六甲山周辺の接峰面図と1995年兵庫県南部地震の速度記録の粒子軌跡の関係³⁾

面が浅くなっているのに対して東側は基盤面が深く、その上に粘土や砂などの厚い堆積層が形成されている（図6）⁷⁾。図5より警固断層から東側の領域で比較的大きな地震動が観測されるとともに、特に被害が集中している⁵⁾。図7、8は警固断層付近に発生した被害集中領域における余震観測から求められた粒子軌跡を示している⁸⁾。これらの図は余震観測で求められた粒子軌跡⁸⁾を福岡市地盤図（

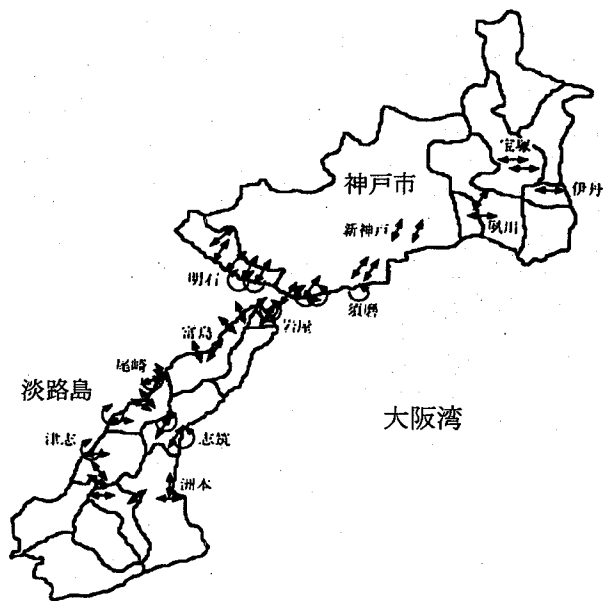


図4 墓石等の変位・回転方向⁴⁾

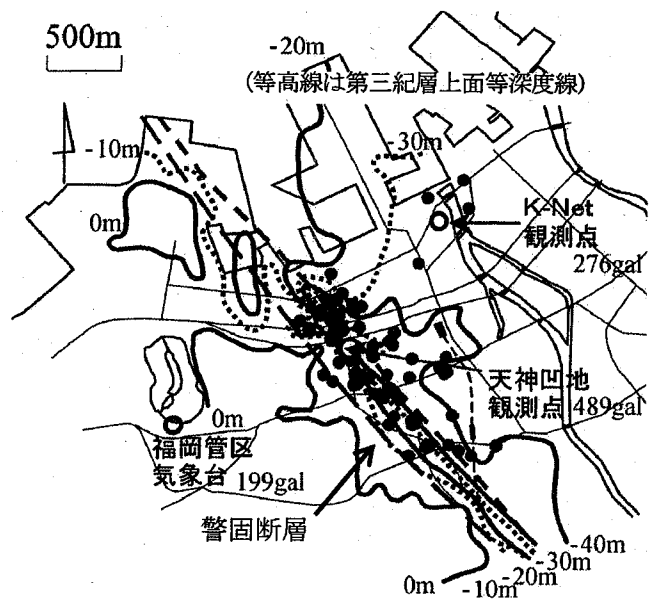


図5 コンクリート構造物被害(・印)の分布状況図⁵⁾

1981)の第三紀層上面深度の図⁸⁾に周期別に集成して作成したものである。両図からわかるように、粒子軌跡は長軸方向を密に並んだ等高線に対してほぼ直角な方向(南西-北東方向)に等しい長円形を描いている。ここで、図7、8に示されるfk01の粒子軌跡のみが等高線に対して直角な長円形を明瞭に描いていない。これは警固断層の東側よりも西側の方が堆積層が薄く存在し、第三紀層上面の傾斜も緩いことが影響していると考えられ、そのため振幅も小さくなったことが推定できる。また2つの図を比較して、図7に示した周期0.1-5秒の粒子軌跡の方がより大きな振幅であることが明らかにされている⁸⁾。

福岡市中央区のなかでも被害が大きかったのは天神地域であり、ビルのガラスの破損やクラック、壁の倒壊などさまざまであった。神社や寺では石碑、墓石の転倒も確認されており、構造上特異なものを除けば、多くは北東方向に転倒し、水鏡神社の灯籠は北北東(N20°E)に転倒した⁹⁾。北東方向

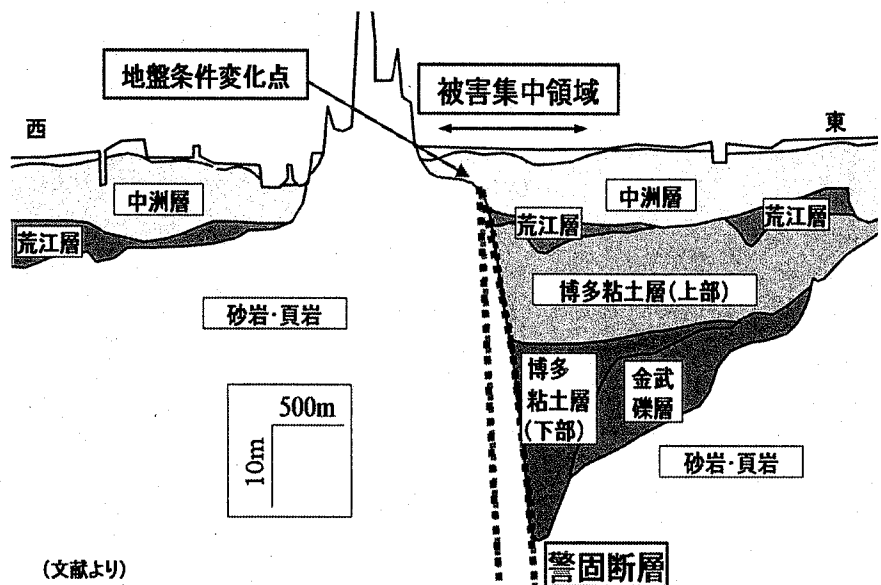


図6 警固断層付近の東西地質断面図⁷⁾

とは警固断層付近の等高線に対してほぼ直角な方向であり、すなわち地震動(その卓越方向は図7、8参照)が等高線に対して直角に作用し、それにより墓石等の転倒方向に影響を与えたものと推定される。

このように、兵庫県や福岡県等の地域における地盤条件と地震動の関係を調べると、地震被害は硬質地盤と軟質地盤の境界部の軟質地盤側で発生していることが多い。地盤面の等高線が密に並んでいる領域における地震動は地表面や基盤面の傾斜の影響に

より地盤面等高線に対してほぼ直角な方向に卓越する場合が多く、さらにその挙動は軟弱地盤層の厚いところほど顕著に現れていることが推定される。

3. 解析条件

地震応答解析モデルとして1995年兵庫県南部地震における被害集中領域の地盤を取り上げる。初めに小規模な地盤モデル（簡易地盤モデル）での地震応答解析結果から、地震被害集中領域は地盤歪みの集中する位置に相当することは報告済み¹⁾であるが比較のためにここで再度示すとともに、今回行った実物大に近い地盤モデルでの地震応答解析結果を以下に述べる。

被害集中領域は岩盤と土砂堆積層の境界部の岩盤（基盤）面傾斜角度が小さくなるとともに海岸線の方へ接近する傾向が認められるため^{1) 10)}、岩盤（基盤）面傾斜角度を幾つか変えた2次元地震応答解析用の地盤モデルを作成する。なお、地盤モデルとして地表に近いところほど強度が小さくなる実際の地盤¹¹⁾を想定する。

(1) 簡易地盤モデル

図9に示す簡易地盤モデルは土砂堆積層を軟弱地盤（厚さ15m）として基盤（岩盤）との2層からなるモデルであり、岩盤・土砂堆積層境界部の基盤面傾斜角度を30°、45°、60°、90°、

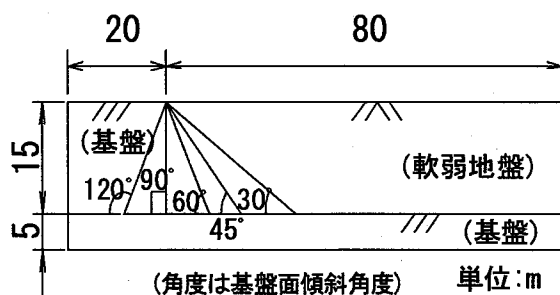


図9 解析地盤モデル(簡易地盤モデル)¹⁾



図7 警固断層付近の余震記録の粒子軌跡
(周期: 0.1-5秒, 文献8)を集成)



図8 警固断層付近の余震記録の粒子軌跡
(周期: 1-5秒, 文献8)を集成)

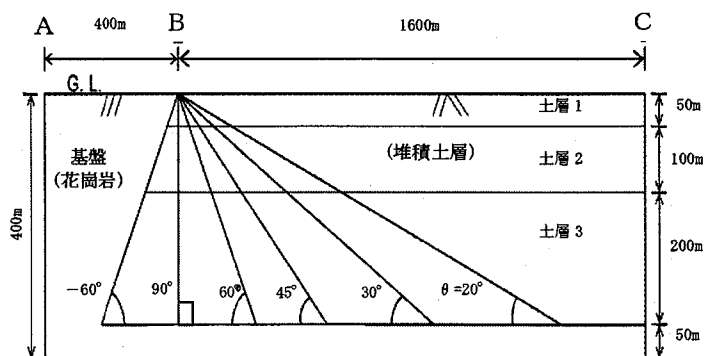


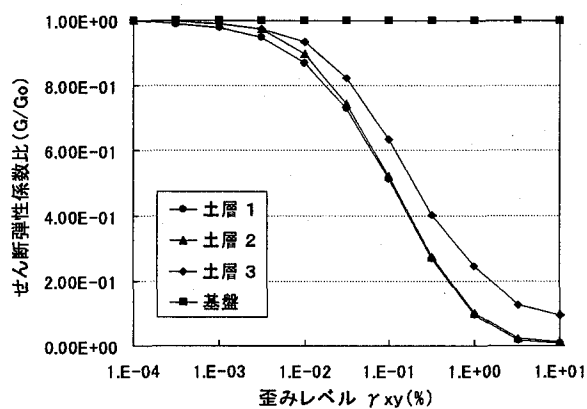
図10 解析地盤モデル(実物大地盤モデル,
θは基盤面傾斜角度)¹²⁾

表 1 土質定数 (簡易モデル)

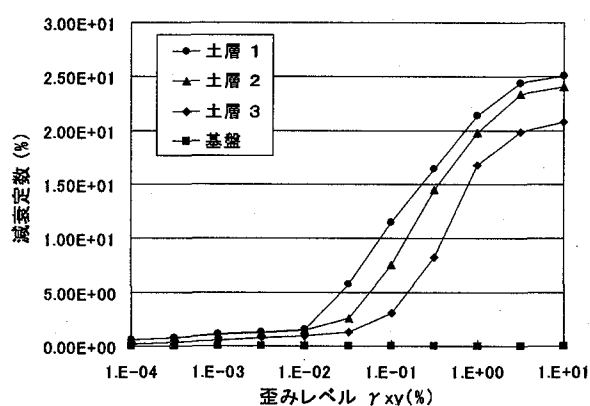
項 目	基盤	軟弱地盤
単位体積重量 ρ (tf/m ³)	1.95	1.80
初期せん断弾性係 G_0 (MPa)	9.81×10^2	1.45
初期の減衰定数 h_0	0.005	0.05
ポアソン比 ν	0.40	0.492

表 2 土質定数 (実物大モデル)

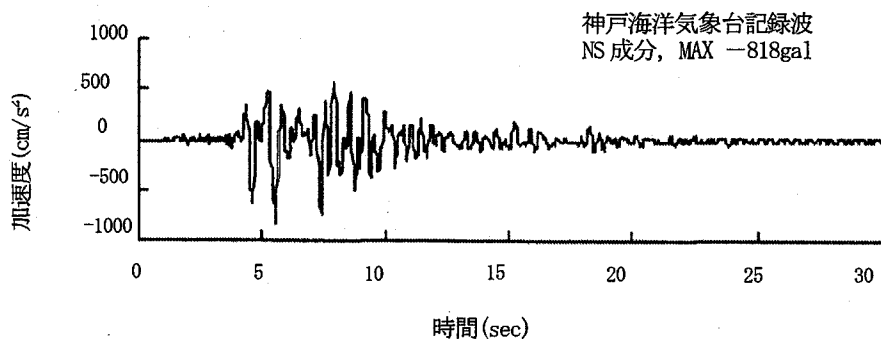
	基盤	土層1	土層2	土層3
ポアソン比 ν	0.45	0.492	0.49	0.49
単位体積重量 ρ (tf/m ³)	2.10	1.75	1.80	1.90
せん断波速度 V_s (m/s)	4800	150	300	600
初期せん断弾性係 G_0 (MPa)	4.90×10^4	3.92×10	1.62×10^2	6.86×10^2
初期減衰定数 h_0	0.005	0.05	0.05	0.05



(a) せん断弾性係数比



(b) 減衰定数比

図 12 材料特性曲線¹²⁾図 12 入力地震動波形¹⁾

120° (= -60°) に変化させた。地盤の土質定数を表1に示す。基盤以外の軟弱地盤のせん断弾性係数比と減衰定数に依存性を考慮する¹⁾。

(2) 実物大地盤モデル

図10に示す実物大地盤モデルは土砂堆積土層3層(厚さ計350m)と基盤(岩盤)層の計4層からなるモデルであり、岩盤と土砂堆積層の境界部の基盤面傾斜角度は20°の他は簡易地盤モデルと同様に变化させた。既存データ¹¹⁾を元に決定した地盤の土質定数を表2に示す。基盤以外の土砂堆積層のせん断弾性係数比と減衰定数に、図11に示すように依存性を考慮する¹²⁾。

(3) 境界条件と入力地震動波形と解析プログラム

図9、10の地盤モデルの境界条件として左右側面はエネルギー伝達境界、底面は粘性境界を考慮する。入力地震動波形は図12¹⁾に示す神戸海洋気象台記録波形のNS成分であり、最大値を100galに調整して地盤モデル底面から水平方向(図9、10の地盤モデルの左右方向)に加振して上昇波として入力させた^{10), 12)}。このときに使用した2次元地震応答解析プログラムはmicro-FLUSH^{13) 14)}である。

4. 解析結果

(1) 簡易地盤モデル

図13は簡易地盤モデルにおいて求められた地盤の最大せん断歪みの地表面における分布を示す。こ

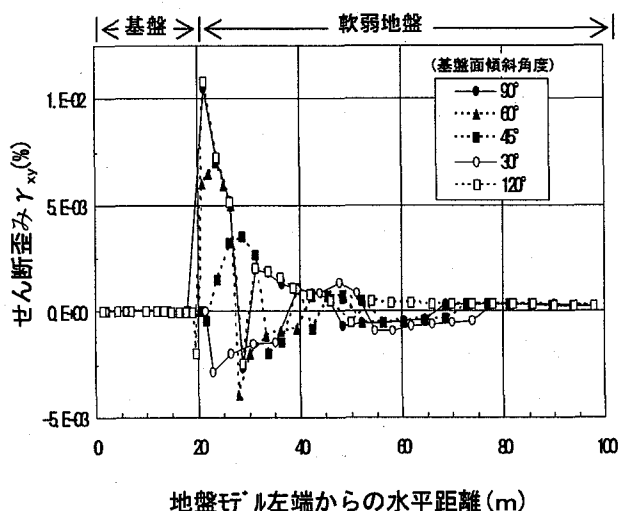


図13 地盤表面におけるせん断歪の分布(簡易モデル)¹⁾

のような図をせん断歪み以外にも作成して求めた各種の最大値の発生位置と基盤面傾斜角度の関係として図14が得られた。この図をみると、特に構造物への影響が大きいと考えられるせん断歪みの最大値は、傾斜角度30°の場合を除くと、基盤面傾斜角度が小さくなるにつれて岩盤・土砂堆積層の境界部から右側へ(土砂堆積層側で)離れていくことが分かる。さらに、図15に示すようにせん断歪みの最大値の大きさも境界部から右側へ小さくなっていくことが分かる。

(2) 実物大地盤モデル

図16は実物大地盤モデルにおける最大せん断歪みの地表面における分布を示す。図17、18は図15から読み取って作成したグラフである。そのうち、図17は基盤面傾斜角度と地表面におけるせん断歪み最大値の関係を、図18は基盤面傾斜角度と地表面におけるせん断歪み最大値発生位置の関係を示す。これらの図をみると、せん断歪みは地表面の岩盤・土砂堆積層境界部である400m地点(図10のB地点)より土砂堆積層側で大きく変化し、図17に示すように基盤面の傾斜が急な場合は大きい値を示し、傾斜が緩くなるにつれてその値も小さくなっていくことが分かる。なお、同図中の点線はせん断歪みの最大値を絶対値で表示したものである。また、図18よりその最大値の発生位置は基盤面傾斜が垂直に近いほど境界部に近く、傾斜が緩やかになるほど境界部から離れていくことが分かる¹²⁾。

5. あとがき

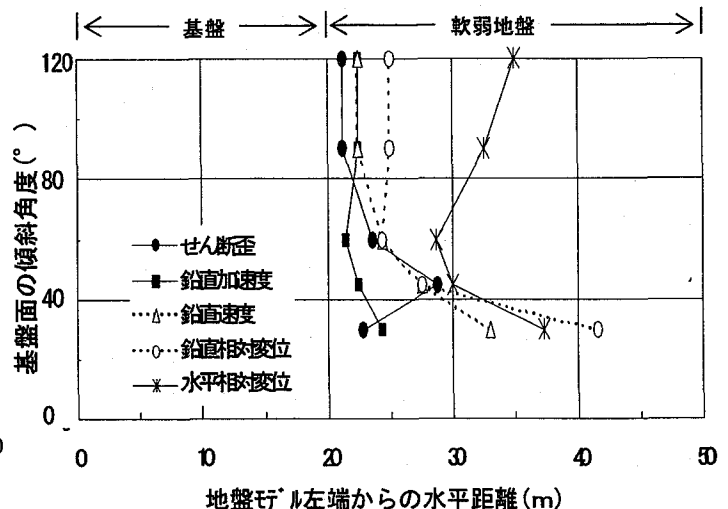


図14 せん断歪み等の最大値発生位置と基盤面傾斜角度の関係(簡易モデル)

以上に述べたように、簡易地盤モデルと実物大地盤モデルの地震応答解析結果から、地盤のせん断歪みにおいて同様の結果が得られた。即ち、岩盤・土砂堆積層の境界部において、地盤強度の小さい方の土砂堆積層側の地盤において地盤のせん断歪みが大きく出るとともに、その最大値が境界部の岩盤（基盤）面傾斜角度が小さくなるとともに海岸線側に接近して現れることが分かった。このことは地震被害集中領域（震災の帯）の実際の現れ方¹⁾に対応していることが推察される。

従って、地盤状態の不連続性が被害集中領域発生の要因の1つであり、表層地盤の形状と土質が被害位置に大きく影響したこと等、即ち1995年兵庫県南部地震で発生した被害集中領域は地盤の不連続点で発生しており、各種構造物の地震被害等が硬軟地盤境界部の軟質地盤側で発生しやすいこと¹⁾と類似であることが確認された。

なお、以上の解析から、地盤の硬い部分と軟らかい部分では地震時の動きが異なり軟らかい方が硬い方よりも大きく動くので、両者が接している境界部に構造物が存在すると構造物の基礎が地盤から強く押されて、偏土圧が作用して被害を受けることが推察される。喩えれば「地震時に地盤にしわ寄せ効果」が発生して構造物被害が発生することが推察さ

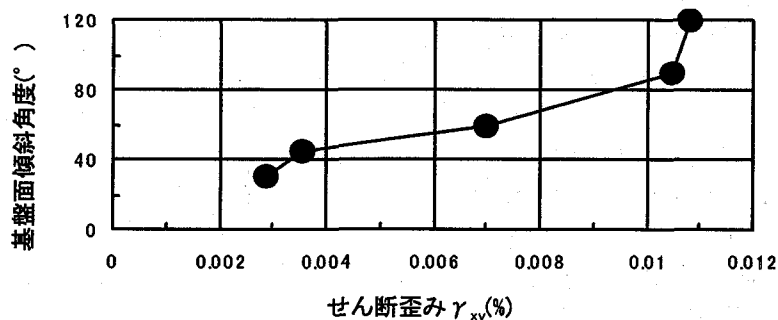


図 15 せん断歪み最大値と基盤面傾斜角度の関係（簡易モデル）¹⁾

れる。今後ともこのような地震被害原因に関する考察を継続する予定である。

終わりに、以上の地震応答解析に際して参考や引用させて頂いた文献の著者、並びにお世話になった（株）地震工学研究所と解析作業で御協力を頂いた本学卒研生の高田健太郎、関塚尚貴両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被害集中領域発生と地盤の関係，第7回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演文集，pp. 359-366，2004. 1.
- 2) 藤田和夫，佐野正人：阪神・淡路大震災と六甲

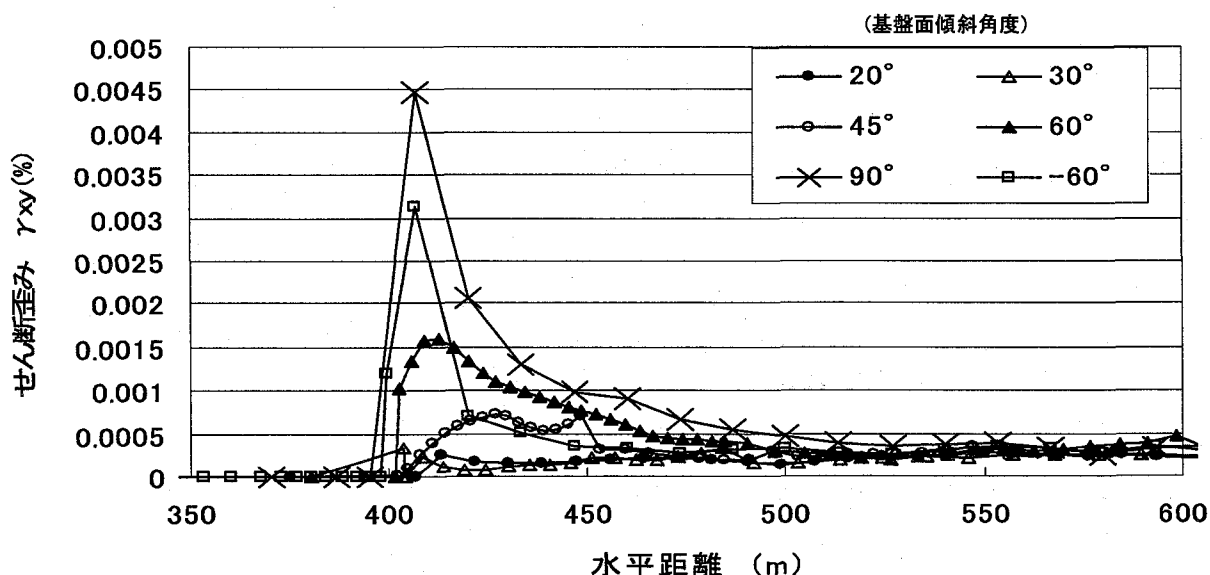


図 16 地盤表面におけるせん断歪み最大値の分布（実物大モデル）¹⁵⁾

変動, “震災の帯” をもたらした埋没大地形, 科学, Vol. 66, No. 11, pp. 793-805, 1996. 11.

3) 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.

4) 大林組技術研究所報特別号, 阪神・淡路大震災, 調査・分析/対応技術, pp 4-14, 1996.

5) 笠間清伸他: 市街地域における被害概要と地質・地盤特性, 福岡県西方沖地震における被害調査報告, (社)地盤工学会, 福岡県西方沖地震地盤工学会調査団発行, pp 87-92, 2005. 6.

6) 大塚久哲, 古川愛子: 地震および地震動, 福岡県西方沖地震・土木学会被害調査団速報第2報, 土木学会ホームページ, 2005. 4.

7) 佐藤研一: 地質・地盤

条件, 福岡県西方沖地震・土木学会被害調査団速報第2報, 土木学会ホームページ, 2005. 4.

8) 山中浩明他: 2005年3月20日の福岡県西方沖地震の余震観測速報, 一警固断層周辺での地震動特性の理解を目指して, 震災予防, No. 203, pp. 35-36, 2005. 6.

9) 黒木貴一: 2005年3月20日発生の福岡県西方沖地震の調査速報 (続き), 日本地理学会ホームページ, pp. 1-11, 2005. 3. 23.

10) 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講演概要集, No.

2-9, pp. 85-86, 2001. 10.

11) 足立紀尚他: 新関西地盤, 神戸および阪神間, 関西地盤情報活用協議会発行, 1998. 10.

12) 関塚尚貴, 那須誠: 地盤条件変化点における地震動 (その2, 地震応答解析による検討結果), 第33回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, I-58, 2006. 3.

13) 株式会社地震工学研究所編: micro-FLUSHマニュアル, 1997. 9.

14) ㈱基礎地盤コンサルタンツ編: Flush Complexマニュアル, 2000.

15) 関塚尚貴: 地盤条件変化点における地震動解析, 平成17年度前橋工科大学卒業研究論文, 2006. 3.

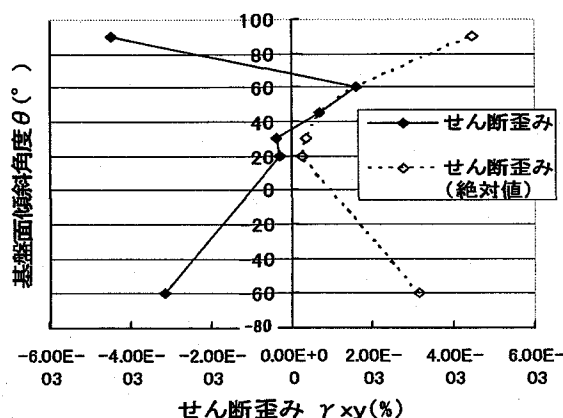


図 17 基盤面傾斜角度と地表面のせん断歪み最大値の関係(実物大 7° ル)¹²⁾

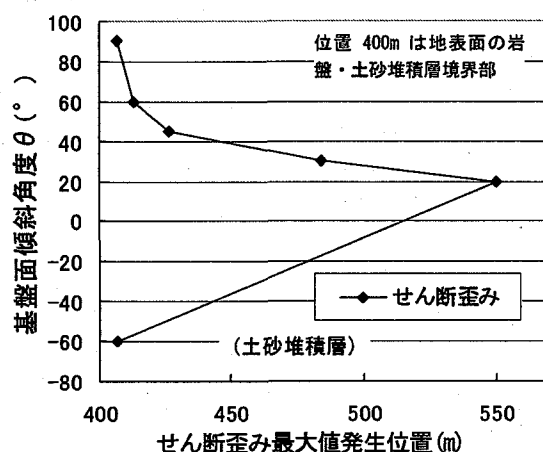


図 18 基盤面傾斜角度と地表面のせん断歪み最大値発生位置の関係(実物大 7° ル)¹²⁾