

特集論文(阪神・淡路大震災)

粘土層の地震後沈下過程の推定

松田 博

正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台2557)

兵庫県南部地震によって、ポートアイランドをはじめとして臨海部の埋立地においては広範囲にわたって噴砂がみられるとともに30~50cmあるいはそれ以上の地盤沈下が生じ、ライフライン等に著しい被害をもたらした。このような著しい沈下は、表層部の埋立て土層の液状化に伴う沈下の影響が大きいと思われるが、臨海部の人工島は粘土層上への埋立てによって築造されていることから、この粘土層の地震後沈下について検討を行った。その結果、兵庫県南部地震によって、粘土層内で発生した過剰間隙水圧の大きさとその消散に要する時間、さらに粘土層の沈下-時間関係について定性的傾向を知ることができた。

Key Words : earthquake, clay, settlement, pore water pressure, consolidation

1. まえがき

兵庫県南部地震においては、臨海部の埋立地において広範囲にわたって噴砂が見られるとともに、地盤の沈下が生じた。特にポートアイランドでは杭基礎で支持された建物と周辺地盤との相対沈下は30~50cmあるいはそれ以上に達するところもあり¹⁾、ライフライン等に著しい被害を与えた。このような著しい沈下は、地震と同時に生じたことから、表層部の埋立て土層の液状化に伴う沈下の影響が大きいと思われる。しかし、ポートアイランドをはじめとして、臨海部の人工島は沖積粘土層上への埋立てによって築造されているにもかかわらず、この粘土層の地震後沈下については明確にされていない点が多い。一方、地震によって粘土層が沈下したという報告としては、1957年メキシコ地震²⁾、1984年宮城県沖地震³⁾、1985年メキシコ地震⁴⁾での例があり、また実験室においても地震によって粘土層中には過剰間隙水圧が蓄積し、その消散によって沈下が生じることが確認されており^{5), 6)}、このことから兵庫県南部地震によって生じた粘土層の沈下についても検討することは重要である。さらに、このような粘土層の地震後沈下の大きさを計算する手法^{3), 4), 8), 9)}、および地震後沈下の経時変化を求める手法¹⁰⁾もすでに提案されている。

そこで、ここではポートアイランドを例にとり、兵庫県南部地震によって、粘土層内で発生した過剰間隙水圧の大きさとその消散に要する時間、さらに

粘土層の沈下-時間関係について検討を試みた。ただ、粘土層の地震後沈下の計算においては、多数の土質データを必要とするが、現時点において取得できないデータについては、既存の試料についての実験結果を用いることとした。そのため、過剰間隙水圧および沈下量の推定値は実際の値と異なると思われるが、地震後に生じる粘土層の沈下-時間関係についての定性的な傾向を知る上で重要と思われるので報告する。

2. ポートアイランドの地盤および層別沈下記録

神戸港の海底地盤は、図-1に示したポートアイランドの第1期埋立工事に際して行われた土質柱状図(図-2)から明らかなように、沖積粘土層(Ma13)が10~20mの層厚で堆積し、その下位には砂・礫の互層、さらにその下部には層厚20~30mの洪積粘土層(Ma12)、その下には再び砂・粘土の互層が存在する。一方、沖積粘土層の上面は南方向に低下し、層厚も増加する。また、東西方向に対しては、沖積粘土層の層厚はほぼ一定であるが、洪積粘土層の層厚は東方向に増加する傾向がある。

図-3(a)は図-1のKH-1地点で計測された沈下-時間関係である¹²⁾。現場は無処理地盤であって、地表面においては地震直後に約26cmの沈下が生じており、その大半の沈下が沖積粘土層と埋立土で生じ

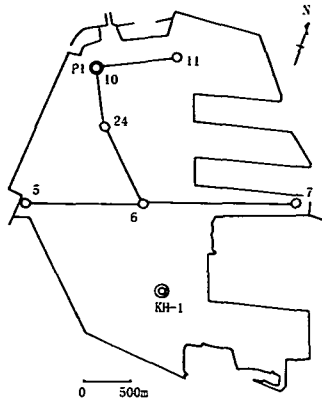


図-1 地盤調査位置 (ポートアイランド)

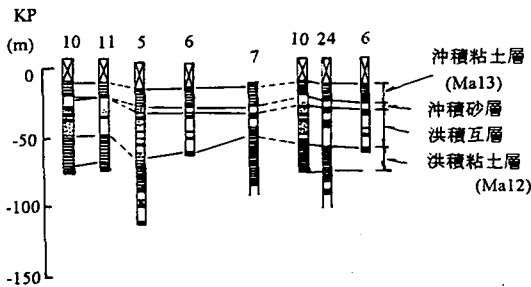
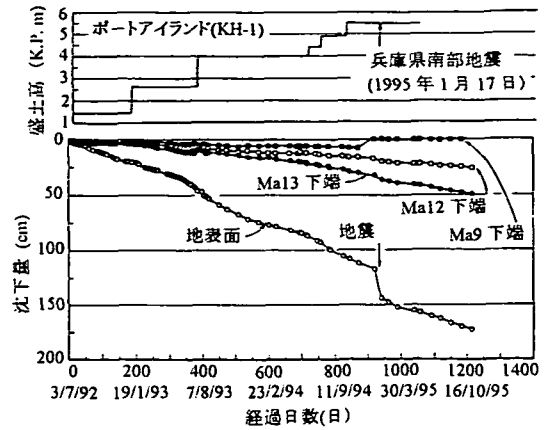


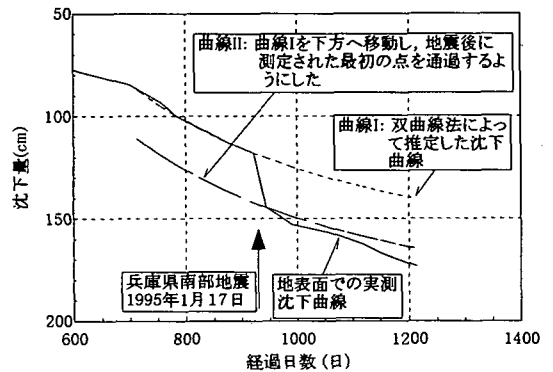
図-2 地盤断面図¹¹⁾ (ポートアイランド)

ている。また、洪積互層と洪積粘土層においても地震直後にわずかに沈下が認められる。図-3 (b) は、図-3 (a) の地表面での沈下の実測値のうち、地震前後の沈下-時間関係を拡大したものである。また、図中の曲線Iは、双曲線法によって、約712日後の载荷に対する沈下-時間関係をもとに、地震が生じなかった場合の沈下を予測したものである。曲線IIは曲線Iを下方に平行移動し、曲線が地震後の最初の計測点を通過するようにしたものである。曲線IIと実測結果を比較すると明らかに実測値が大きくなっており、地震は地盤の沈下-時間関係に影響を及ぼしていることがわかる。

一方、過剰間隙水圧の計測が沖積粘土層下位の洪積砂礫層において行われた¹²⁾。その結果を示したものが図-4であって、地震によって上昇した過剰間隙水圧は、時間経過とともに消散している。砂礫層での過剰間隙水圧の消散がこのように地震直後に消散しない理由については明らかにされていないが、



(a)¹²⁾



(b)

図-3 層別沈下-時間関係
(ポートアイランド, KH-1)

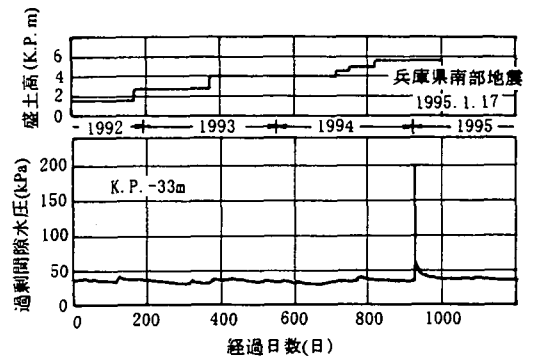


図-4 洪積砂礫層での過剰間隙水圧変化¹²⁾
(ポートアイランド, KH-1)

完全な排水層として機能していない可能性もある。また、沖積粘土層においても過剰間隙水圧の計測が地震前から継続的に行われており、地震によって上昇した過剰間隙水圧は地震後徐々に低下していると報告されている¹²⁾。

3. 地盤条件および入力地震波

図-5はポートアイランド内のP1地点(図-1)の土層断面¹³⁾を示したものである。ここでは、P1地点での地盤を対象として、沖積粘土層(第V層=⑧、⑨層)および洪積粘土層(第IX層=⑯、⑰層)において、地震時に蓄積される過剰間隙水圧、その消散に伴う沈下過程について検討する。同地点での粘土層の地震前の土質特性に関するデータは公表されていないが、第1期埋立地の中央部で埋立完了後に行われた土質調査結果¹¹⁾を示したものが図-6、図-7であって、それぞれ沖積粘土層と洪積粘土層についての自然含水比、液性・塑性限界、間隙

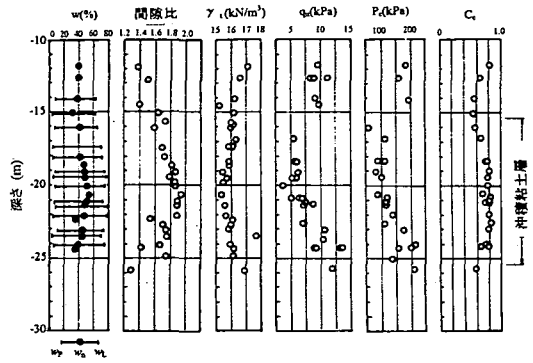


図-6 沖積粘土層の土質特性¹¹⁾

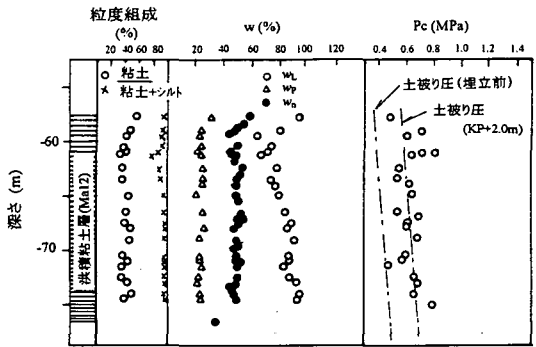


図-7 洪積粘土層の土質特性¹¹⁾

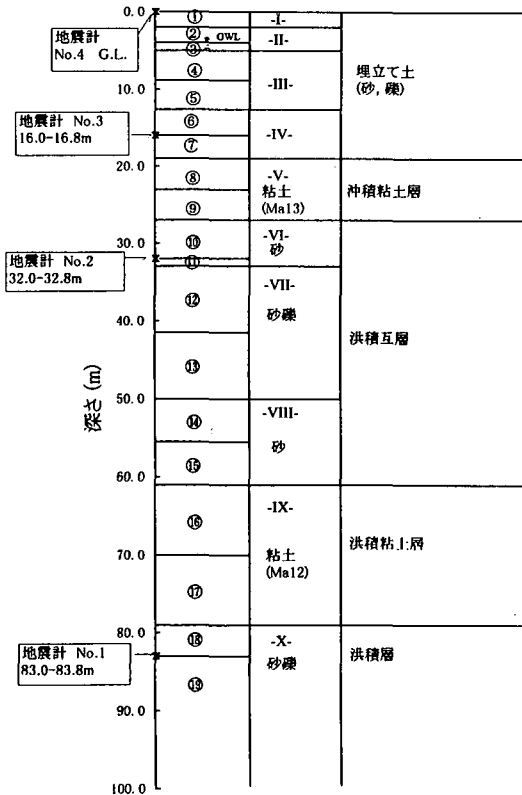


図-5 応答計算に用いた土層断面¹³⁾
(ポートアイランド, P1)

比、一軸圧縮強度、圧密降伏応力、圧縮指数等の結果である。同図より、液性限界の平均値は沖積粘土層で約 70 %、洪積粘土層で約 80 %、塑性指数はそれぞれ約 60、約 55である。

一方、図-1のP1地点においては、図-5に示した個所に地震計(地表面、深さ 16 m、深さ 32 m、深さ 83 mの4箇所)が設置され、いずれも兵庫県南部地震での加速度の記録が行われた。ここでは計測された地震加速度波形¹³⁾のうち、特に深さ 83 mでのNS成分とEW成分を用いることとした。また、粘土層内で地震時に生じる過剰間隙水圧の蓄積量を求めるためには、後述するように粘土層内で地震時に生じるせん断ひずみの時刻歴が必要である。そこで、ここでは応答計算にSHAKE¹⁴⁾を用いることとして、図-5に示したように地盤を19層に分割して、深さ 83 mの地点で計測された加速度波形を第18層と19層の境界に入力した。また、各分割層ごとの地盤特性(弾性波速度、密度等)については既報のデータ¹³⁾を用いることとし、せん断弾性係数と減衰定数については図-8を用いた。

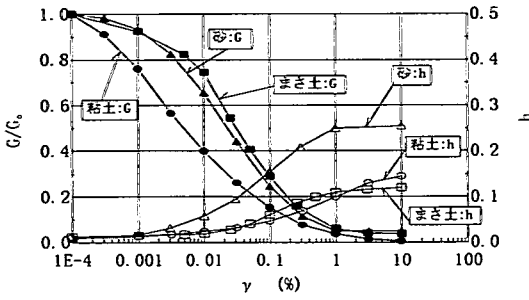


図-8 応答計算で用いたせん断弾性係数と減衰定数^{15), 16)}

ただ、SHAKEによる解析では、地震によって地盤内に蓄積される過剰間隙水圧の上昇を考慮できないことから、応答計算結果に誤差を生じることが考えられる。そこで、ここでは後述するように計算で得られる加速度波形を実測波形と比較して計算精度を確認することとした。

4. 地震によって生じる過剰間隙水圧およびその消散にもなう沈下

(1) 地震後に粘土層に蓄積される過剰間隙水圧と沈下量の推定方法^{10), 17), 18)}

地震時に粘土層が非排水条件のもとで繰返しせん断を受けたとき、粘土層内部に蓄積する過剰間隙水圧 u_{dyn} は、繰返し回数 n によって次式のようにあらわされることが既に示されている⁶⁾。

$$\frac{u_{dyn}}{\sigma_{vo}'} = \frac{n}{\alpha + \beta \cdot n} \quad (1)$$

ここに、 σ_{vo}' は圧密圧力であり、 α 、 β は次式で与えられる。

$$\alpha = A \cdot \gamma_{dyn}^m \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\gamma_{dyn}}{B + C \cdot \gamma_{dyn}} \quad (3)$$

$$\text{ただし } \gamma_{dyn} > -\frac{B}{C}$$

ここに γ_{dyn} は繰返しせん断ひずみ振幅であり、 A 、 B 、 C 、 m は実験定数である。繰返しせん断中に蓄積し

た過剰間隙水圧を繰返しせん断終了後に消散させると間隙比変化 Δe を生じるが、その大きさは次式によって与えられる。

$$\Delta e = C_{dyn} \cdot \log SRR \quad (4)$$

ここに、 C_{dyn} は動的圧縮指数であって、粘土の圧縮指数を C_c 、膨張指数を C_s とすると、 $C_s < C_{dyn} < C_c$ の関係がある⁵⁾。また、 SRR は応力減少比 (=Stress Reduction Ratio) であって、次式であらわされる。

$$SRR = \frac{1}{1 - \frac{u_{dyn}}{\sigma_{vo}'}} \quad (5)$$

ただし、式(4)は、 $u_{dyn}/\sigma_{vo}' \leq 0.95$ の場合に成り立つことが確認されている⁶⁾。また、ここでの手法が、粘土層を対象としていることから、砂地盤のように過剰間隙水圧が拘束圧に等しくなるまで上昇するようなケースに対しては、式(4)の適用には限界がある。

繰返しせん断を与える直前の間隙比を e_0 とすると、沈下ひずみ ε_v は次式で与えられる。

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (6)$$

したがって、実験定数が求まると式(6)によって粘土層の地震後に生じる沈下ひずみを求めることができる。

一方、室内試験では一様なひずみ振幅条件で実験が行われているため、式(1) - (6)によって沈下ひずみを求めるためには、応答計算によって得られるランダムなひずみの時刻歴を一様なひずみ振幅 γ_{dyn} に変換する必要がある。すでに、砂の液状化解析においては、その変換手法について提案されているが、粘土層の地震後沈下に関しては、過剰間隙水圧が拘束圧に至らない場合でも沈下が生じるために、砂地盤で用いられた手法をそのまま適用することはできない。そこで、粘土地盤に対する変換手法として次式が提案されている¹⁶⁾。

$$\gamma_{dyn} = F \times (\gamma_{max})^G \quad (7)$$

ここに、 γ_{max} はランダムなひずみ時刻歴における最大ひずみ振幅である。また、 F 、 G はひずみ波形、および粘土によって決まる定数である。

さらに、繰返しせん断中に蓄積した過剰間隙水圧の消散速度は、動的圧密係数 C_{vd} であらわされ、それは次式で示されるように応力減少比 SRR の関数として与えられる¹⁰⁾。

$$\frac{C_{vd}}{C_v} = a \times SRR^b \quad (8)$$

ここに、 C_v は圧密係数であり、 $a (\geq 1)$ 、 $b (< 0)$ は実験定数である。式(8)は繰返しせん断によって粘土が攪乱を受けると、 C_{vd}/C_v は増加し、特に攪乱の程度が小さいほど C_{vd}/C_v は大きく、応力減少比 SRR の増加とともに C_{vd}/C_v は減少することを示している。したがって、式(8)において標準圧密試験で得られる圧密係数が与えられると、地震によって粘土層内部に蓄積した過剰間隙水圧の消散速度の推定ができる。

以上のことから、地震時において粘土層のせん断ひずみの時刻歴が応答計算によって求まると、粘土層内に蓄積される過剰間隙水圧の大きさ、およびその消散過程、さらに沈下-時間関係の推定ができる。

(2) 地震後の過剰間隙水圧の消散と沈下過程

図-9はP1地点の深さ32mで実測された加速度波形と応答計算によって得られた加速度の時刻歴を示したものであって、両者は比較的良好に一致している。また、図-10、図-11はそれぞれ沖積粘土層、洪積粘土層について、応答計算によって得られたせん断ひずみの時刻歴を示したものである。沖積粘土層においては最大ひずみ振幅は0.7%程度と比較的大きく、洪積粘土層においても0.2%程度の最大せん断ひずみを生じることがわかる。

表-1は、図-5において、第⑧、⑨層および第⑬、⑭層の各層における、応答最大せん断ひずみ、

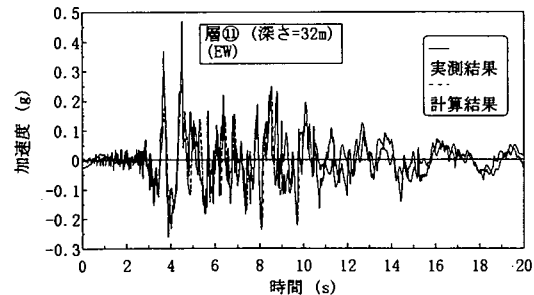


図-9 深さ32mでの地震波形(実測結果¹³⁾と応答計算結果)

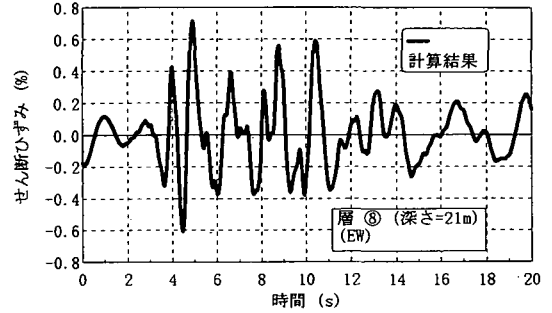


図-10 沖積粘土層でのせん断ひずみの時刻歴

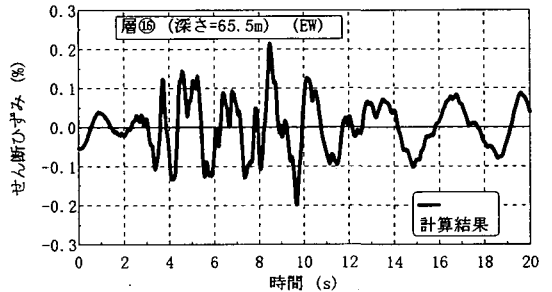


図-11 洪積粘土層でのせん断ひずみの時刻歴

過剰間隙水圧比、応力減少比(SRR)、動的圧密係数、間隙比変化、沈下ひずみ、そして沈下量についての計算結果を示したものであって、加速度波形のEW成分とNS成分に対する結果である。なお、同表の計算過程においては、式(1) - (8)での実験定数が必要であるが、先述したように、ポートアイランドの粘土の値について、すべての値を入手できないことから、特に過剰間隙水圧と沈下量の推定においてはカオリンの実験定数¹⁾を用いている。このため、推定値は実際の値とは異なると思われるが、地震後に生じる粘土層の沈下-時間関係についての定性的傾向を知ることができると考えられる。同表において、加速度のEW成分による結果とNS成分による結果を比較すると、沈下量が大きく異なっていることがわかる。すなわち、沖積粘土層においてはEW成分に対して約7cm、NS成分では約17cmとなっている。この原因は、EW方向とNS方向の加速度波形を比較した場合、明らかにNS方向成分の加速度が卓越している¹⁹⁾ためであると考えられる。なお、ここでは地震波のEW成分とNS成分それぞれについて計算を行ったが、実際には地盤に

表-1 沖積粘土層と洪積粘土層の地震後沈下

地震波	層番号	層厚 (cm)	γ_{max} (%)	u_{dyn}/σ_{vo}'	SRR	C_{dyn}	C_v (cm ² /d)	C_{vd} (cm ² /d)	Δe	ϵ_i (%)	ΔH (cm)	層別沈下 (cm)
EW (深さ=83m)	8 (Ma13)	400	0.729	0.458	1.846	0.093	22.2	298.7	-0.0247	1.076	4.30	7.48
	9 (Ma13)	400	0.520	0.364	1.572	0.093	22.2	348.9	-0.0183	0.794	3.18	
	16 (Ma12)	900	0.226	0.164	1.196	0.093	50.1	1025.9	-0.0072	0.314	2.83	5.03
	17 (Ma12)	900	0.189	0.130	1.150	0.093	50.1	1065.7	-0.0056	0.245	2.21	
NS (深さ=83m)	8 (Ma13)	400	2.205	0.741	3.863	0.093	22.2	146.1	-0.0546	2.373	9.49	17.36
	9 (Ma13)	400	1.882	0.674	3.064	0.093	22.2	182.9	-0.0452	1.966	7.87	
	16 (Ma12)	900	0.593	0.342	1.519	0.093	50.1	814.2	-0.0169	0.734	6.60	12.78
	17 (Ma12)	900	0.549	0.324	1.478	0.093	50.1	835.7	-0.0158	0.686	6.18	

は多方向の地震加速度が作用しており、鉛直方向加速度の影響をも含めた検討が必要であると考えられる。すでに、砂地盤の液状化後の沈下に関して多方向せん断と一方向せん断の関係が得られている²⁰⁾が、粘土地盤については明らかにされていないことから、今後検討の余地がある。

地震後に生じる粘土層の沈下は粘土層内に蓄積された過剰間隙水圧の消散によって生じる。過剰間隙

水圧の大きさは表-1に示したように求まっているので、その消散過程を計算することができる。

図-12, 図-13はそれぞれ地震時に沖積粘土層および洪積粘土層内に蓄積された過剰間隙水圧の消散過程を示したものであり、図-14, 図-15はアイソクロンを示したものである。なお、ここでは地震後の再圧密過程は、粘土層を多層に分割して、図-14, 図-15に示した $t = 0$ dでの過剰

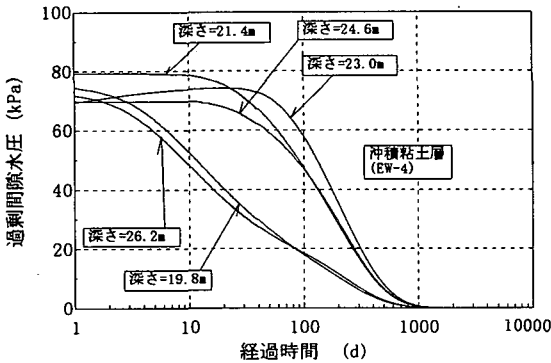


図-12 沖積粘土層での過剰間隙水圧消散過程

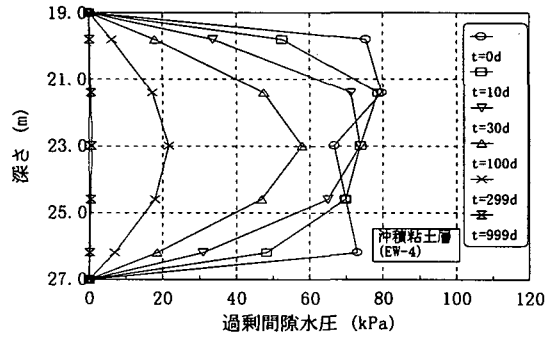


図-14 沖積粘土層での過剰間隙水圧分布の変化

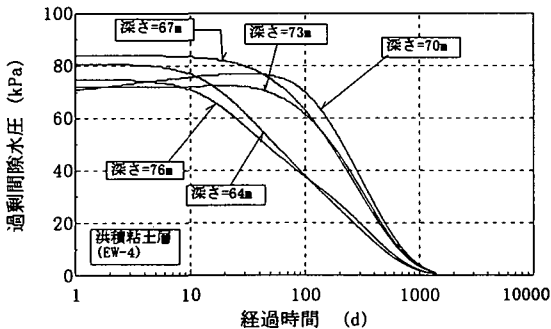


図-13 洪積粘土層での過剰間隙水圧消散過程

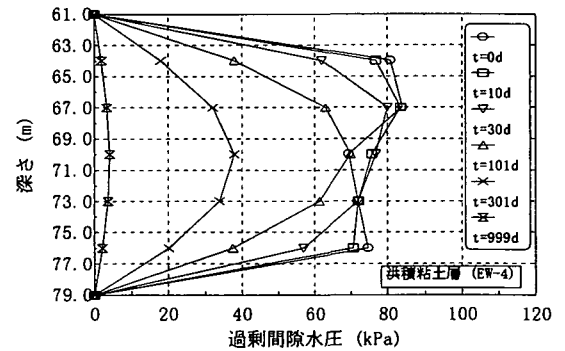


図-15 洪積粘土層での過剰間隙水圧分布の変化

間隙水圧を初期値としてTerzaghiの一次元圧密方程式を差分近似して計算した。その際の排水条件としては、沖積粘土層、洪積粘土層の上下境界はいずれも排水層とした。また、圧密係数の値としては、標準圧密試験の結果が報告されている²¹⁾ので、その結果をもとに、沖積粘土層については $C_v=22.2 \text{ cm}^2/\text{d}$ 、洪積粘土層については $50.1 \text{ cm}^2/\text{d}$ とし、式(8)によって各粘土層の動的圧密係数 C_{vd} を求めた。図-12、図-13より、沖積粘土層では90%圧密に要する期間は約400日、洪積粘土層では約700日を要し、洪積粘土層の方が消散速度は遅いといえる。このように、地震によって生じた過剰間隙水圧の消散には長期間を要するという結果は、現場の観測結果¹²⁾と一致している。

既に、地震に起因した最終沈下量は、表-1のようにより得られており、過剰間隙水圧の消散過程についても知ることができた。そこで、有効応力の対数と沈下ひずみの関係が線形関係にあると仮定すると、粘土層の沈下-時間関係を推定することが可能である。図-16、図-17はその結果を示したものであって、それぞれ加速度波形のEW成分とNS成分に対する結果である。両図より、沈下はかなり長期にわたって生じることがわかる。一方、図-3(b)において、地震後に粘土層の沈下と推定される時間依存性の沈下が生じており、ここでの結果と一致している。

ここでは粘土層の地震後沈下の推定を試みたが、計算で用いた実験定数の多くは、ポートアイランドから採取した粘土に対する値ではないため、得られた結果は実測値とは一致しないことが考えられる。ただ、実験定数に関しては、現時点で現場から不攪

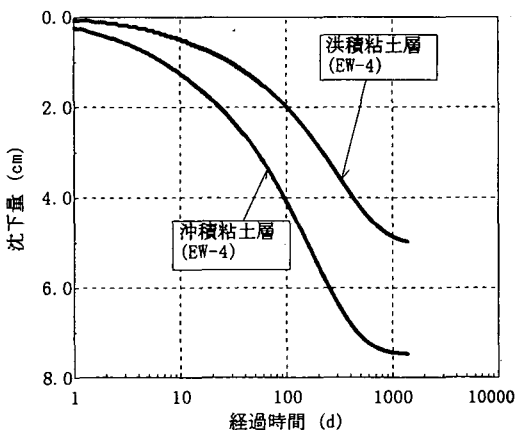


図-16 地震後沈下-時間関係 (EW成分)

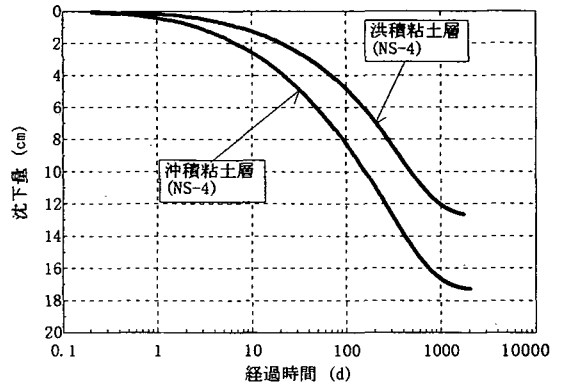


図-17 地震後沈下-時間関係 (NS成分)

乱試料の採取をして実験を行ったとしても、採取した試料はすでに動的な応力履歴を受けているため、そのデータを用いて得られる結果も厳密な意味での地震後沈下の値を与えるものではない。ここで行った計算はただ単に粘土の地震後沈下に関する傾向を知ることにとどまるかも知れない。しかし、式(1)-(8)に含まれる定数を、より一般性のある形にして、ここで用いた手法が種々の地盤に対して適用できるようにすることにより、地震後に生じる粘土層の沈下の大きさをより正確に把握できると思われる。

4. 結論

地震に起因して生じる地盤の沈下のうち、ここでは特に粘土層の沈下についてポートアイランドの地盤を例にとって沈下-時間過程を試行的に推定した。今回用いられた土質定数は、すべてがポートアイランドの粘土に対するものではないが、地震後に生じる沈下の大きさ、沈下の継続時間等について以下のような定性的傾向を見出すことができた。

- 1) 粘土層での地震時の最大せん断ひずみは、沖積粘土層で、0.7%、洪積粘土層で0.2%に達する。
- 2) 実測された加速度記録をもとに地震後沈下を計算すると、東西方向よりも南北方向の加速度によって得られる沈下量が大きくなる。
- 3) ポートアイランドでの地表面沈下には、沖積粘土層、洪積粘土層の沈下も含まれており、二次圧密が問題となるような精密な構造物においては無視できない大きさであると考えられる。
- 4) 地震時に粘土層内で発生した過剰間隙水圧の消

散は長期間継続する。

謝辞：本研究の一部は鹿島学術振興会からの研究助成によって行われたものである。また、ポートアイランドの埋立てに関する資料は、神戸大学の田中泰雄助教からお送り頂くとともに、兵庫県南部地震による埋立地盤変状調査報告書は神戸市港湾整備局からお送り頂いた。さらに、応答計算で用いた地震波は、関西地震観測協議会から提供して頂いたものであり、実験と計算については、本学学部生及び大学院生の協力を得た。末筆ながら感謝致します。

参考文献

- 1) Matsuda, H. and Shimizu, Y.: *The Kobe Earthquake, Geodynamical aspects, Computational Mechanics Publications, Southampton, UK, pp.73-98, 1996.*
- 2) Zeevaert, L.: *Foundation engineering for difficult subsoil conditions*, New York, Van Nostrand Reinhold Company, 1972.
- 3) 鈴木猛康：動的応力履歴を受けた飽和粘性土の沈下挙動，応用地質，25巻3号，pp.21-31，1984.
- 4) Jaime, A. P., Romo, M. P. and Jasso, M. R.: Seismic induced settlement in a building, *8th Pan-American Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.257-275, 1987.
- 5) 松田博，安原一哉，「非排水繰返しせん断を受けた飽和粘土の圧密」，土と基礎，39-12，pp.71-77，1991.
- 6) O-hara, S. and Matsuda, H.: Study on the settlement of saturated clay layer induced by cyclic shear, *Soils and Foundations*, Vol.28, No.3, pp.103-113, 1988.
- 7) Matsuda, H.: Prediction of post-earthquake subsidence in laminated clay-sand layers, *Proc. of 5th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Vol.2, pp.15-24.
- 8) 松村康博，安原一哉：粘土層を含む多層地盤の地震時沈下，粘性土の動的性質に関するシンポジウム，地盤工学会，pp.169-176，1995.
- 9) Dam, T. K. L.: Behavior of saturated clay subjected to undrained cyclic loading and subsequent drainage, *Ph.D. Thesis, Yokohama National University, 1995.*
- 10) Matsuda, H.: Rate of earthquake-induced settlement of level ground, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, VII, pp.321-328, 1995.
- 11) 谷本喜一，田村健一郎：臨海埋立て地盤の沈下性状について，建設工学研究所報告第31号，pp.229-243，1989.
- 12) 神戸市開発局：兵庫県南部地震による埋立地地盤変状調査（ポートアイランド，六甲アイランド）報告書，pp.88-105，1995.
- 13) 関西地震観測研究協議会，1995.
- 14) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B.: SHAKE a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, *EERC Reports, (EERC 72-12)*, pp.1-88, 1970.
- 15) Seed, H. B. and Idriss, I. M.: Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses, *EERC Reports (EERC 70-10)*, pp.1-15, 1970.
- 16) 運輸省港湾局：阪神・淡路大震災による港湾施設等被災状況調査報告書（第2集），1995.
- 17) Matsuda, H. and O-hara, S.: Geotechnical Aspects of Earthquake-Induced Settlement of Clay Layer, *Marine Geotechnology*, Vol.9, pp.179-206, 1990.
- 18) Matsuda, H. and Hoshiyama, E.: Uniform strain series equivalent to seismic strain, *Proc. of the 10th WCEE*, pp.1329-1334, 1992.
- 19) 地盤工学会：阪神淡路大震災調査報告書（解説編），p.258, 1996.
- 20) Nagase, H. and Ishihara, K.: Liquefaction-induced compaction and settlement of sand during earthquakes, *Soils and Foundations*, Vol.28, No.1, pp.65-76, 1988.
- 21) 金澤 寛，野上行久，信川恒夫：六甲アイランドの地盤特性と地盤改良工事，基礎工，No.5，pp.9-21，1992.

(1996.6.18 受付)

ESTIMATION OF POST-EARTHQUAKE SETTLEMENT-TIME RELATIONS OF CLAY LAYERS

Hiroshi MATSUDA

In a wide area of the near-shore reclaimed land, a very large bulk of mud was ejected immediately after the Hyogo-ken Nanbu Earthquake on 17 January 1995 and the ground subsidence of 30 - 50 cm or more was observed. Such a noticeable settlement is considered to be mainly caused by the liquefaction in a sandy soil layer with about 20m thick which is underlain by the alluvial clay layer. However, there are many unknown factors about the earthquake-induced settlement of alluvial and Pleistocene clay layers. In this paper, the dissipation of the earthquake-induced excess pore water pressure and the post-earthquake settlement-time relations of clay layers are investigated.