

(54) 川崎港における間隙水圧の観測と記録の解析

運輸省港湾技術研究所 井合 進
運輸省港湾技術研究所 倉田栄一

1. はじめに

地震時の砂質地盤の液状化予測のため、各種の数値解析法が提案されているが、現在のところ、その適用性を把握するため原位置において地震時の間隙水圧を測定した例はきわめて少なく、このような観測及びその解析が必要とされてきた。本研究では、川崎港の東扇島地区において、1987年に千葉県東方沖で発生したM=6.7の地震における観測結果と、その解析結果を報告する。

2. 観測地点

観測地点は川崎港と横浜港を結ぶ京浜運河に沿って展開する埋立地の1つの東扇島にある。観測地点の地盤は図-1に示すように、地表からGL-14mまでが置換・埋立による砂質土（以後砂層と記す）GL-14mからGL-35mまでが沖積粘性土、GL-35mから洪積層になる。GL-35mからGL-40mは砂質土と粘性土の互層、GL-40mからは砂れき層となる。この層を工学的基盤と見なし、以後この層を基盤と記す。N値は地表からGL-35mまでは3~4、GL-35~GL-40mまでは4~12、GL-40m以深で50以上となる。砂層の間隙水圧計の設置深度（GL-8m）の不覚乱試料をトリプルチューブサンプラーと地盤凍結（凍結と記す）によりサンプリングした。トリプルチューブサンプラー（以後チューブと記す）は3重管構造をもち、外管が回転し追い切りしながら試料を採取するサンドサンプラーである。対象の砂層はシルト・粘性分の少ない、均等係数は小さい、図-2に示す粒度の砂質土で、相対密度は約30%程度である。凍結試料の液状化強度は図-3に示すようになりに低い。液状化強度試験を振動三軸試験と中空ねじり試験で実施したが、両者の試験結果に明確な相違は表れなかった。しかし、チューブ試料と凍結試料の液状化強度試験結果では大きな相違がみられ、チューブサンプリングにおける試料の乱れが、ここでは約2倍以上高い液状化強度となって表れた。

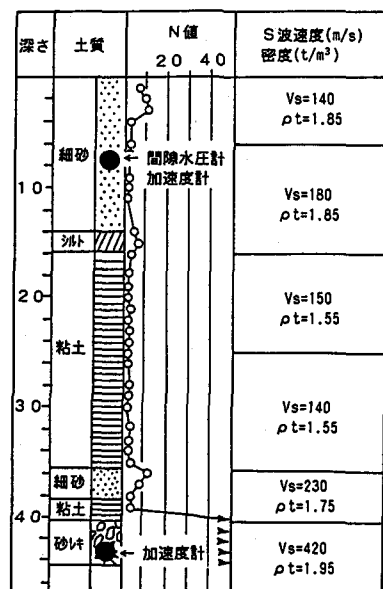


図-1 観測地点の土質柱状図

3. 観測システム

観測地点には砂層のGL-8mに間隙水圧計と加速度計が、基盤のGL-43mに加速度計が設置されている。間隙水圧計には半導体ストレインゲジタイプでフィルタに金属メッシュを取付けたものが、また、加速度計には力平衡サーボタイプが使用されている。1回の地震において約3分間は100Hzで、さらに約40分間は5Hzでサンプリングしてデータが記録される。

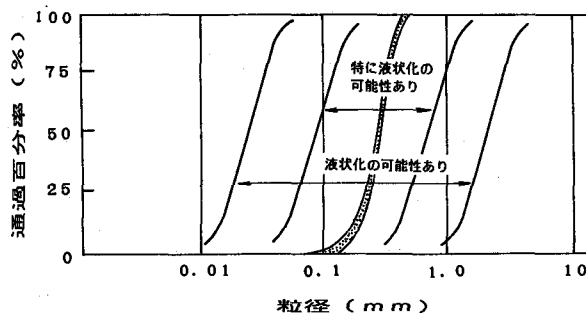


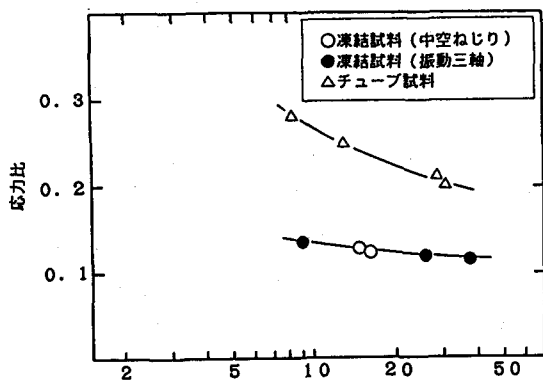
図-2 砂質土の粒土分布

4. 地震

対象地震は1987年12月17日に千葉県東方沖の深さ58kmに発生したマグニチュード6.7の地震である。この地震では千葉、銚子、勝浦で震度Vが観測され、首都圏全域で強い地震動に見舞われた。千葉県、東京都の埋立地で液状化による噴砂が数多く観察された。なお、東扇島の観測地点付近では噴砂が目撃されたという報告はない。観測地点と震央の位置を図-4に示す。

5. 間隙水圧と加速度記録

観測された間隙水圧と加速度の記録波形を図-5に示す。間隙水圧記録はデータの初期部分の平均値を差引き、静水圧に相当する分が除去されている。地震による間隙水圧記録の最大値は水頭75cmであった。ちなみに水平合成最大加速度は93Galであった。図-6に示すように間隙水圧は加速度の主要動において間隙水圧が急激に上昇し、それ以後は間隙水圧は徐々に消散していく過程が記録されており、既往の報告と同様の傾向を示している。間隙水圧波形には周期の長い成分と短い成分がみられ、これを分離してスムージングによって求められた周期の長い成分が過



軸ひずみ両振幅5%までの繰り返し回数

図-3 砂質土の液状化強度

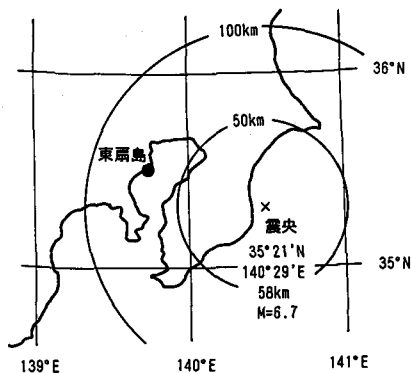


図-4 震央の位置

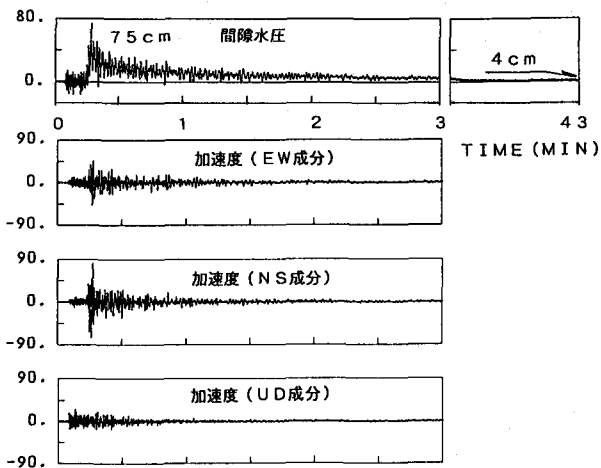


図-5 砂層における観測記録波形

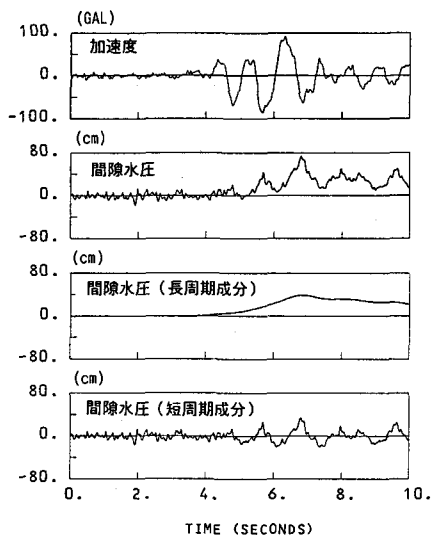


図-6 観測記録波形の主要動部分

剰間隙水圧、周期の短い成分は他の要因によるものと仮定して、短周期成分の波形を加速度、速度、変位波形と比較してみると明かに加速度波形に近い波形を示していた。間隙水圧の短周期成分と加速度波形を振動数領域で比較すると図-7のフーリエスペクトルに示すように一致がみられ、相互相関では0.54と高い相関度と、主要動の約半周期遅れに相当する遅れ時間が求められた。これらの検討から短周期成分の主因は間隙水圧計自体の振動による動水圧で、間隙水圧計の受圧面の向く方向が卓越振動方向にたまたま一致したことで短周期成分を大きくしたものと考えられる。図-5にみられる記録終了時の水頭4cm程度の残留間隙水圧が、その後完全に消散したのかについては、この地点において静水圧の変動があるために確認は出来なかった。

6. 有効応力解析

本観測により示された地震時の過剰間隙水圧および地震動がどの程度数値解析的に再現できるかを検討をするために有効応力解析を行った。ここで用いた有効応力解析モデルは、応力-ひずみ関係としては東畑、石原による任意方向せん断面の双曲線型モデルに、履歴ループの大きさを任意に調整可能なように拡張させたものを、また、過剰間隙水圧発生モデルは著者によるモデルを用いた。¹⁾ 過剰間隙水圧のモデルには、変相角を含めて5個のパラメータが必要である。これらのパラメータは非排水繰返しせん断試験結果をもとに、試験と同一条件で要素シミュレーションを行い、試験結果をシミュレートできるように試行的に求められるものである。ここでは、パラメータの選定に図-8の非排水繰返し中空ねじりせん断試験の過剰間隙水圧上昇曲線（応力比：0.123）を用いた。選定したパラメータに対応する要素シミュレーションによる過剰間隙水圧上昇曲線を同図に示す。対象地盤を水平成層地盤とみなし、1次元地盤モデルにより地震応答解析を実施した。モデル地盤は17個の要素からなり、動的解析では下方を固定し、入力地震動としては

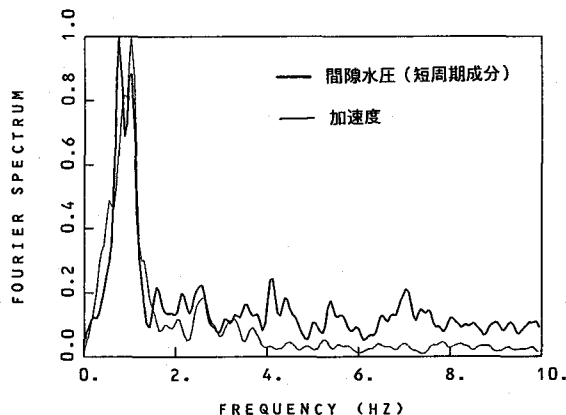


図-7 間隙水圧の短周期成分と加速度のフーリエスペクトル

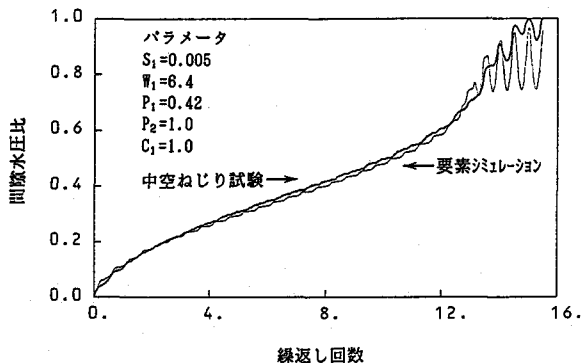


図-8 パラメータの選定に用いた過剰間隙水圧上昇曲線

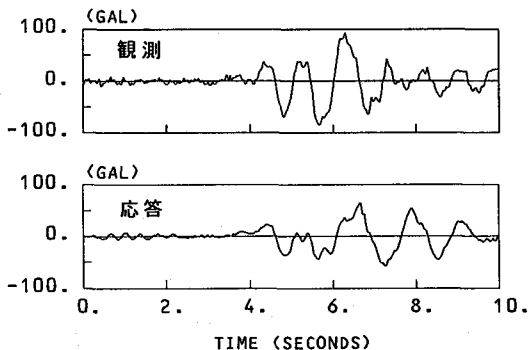


図-9 加速度の応答波形と観測波形

基盤で観測された水平成分の振動が卓越する方向の波形になおしたものを用い、時間間隔は0.01秒10秒間を入力した。計算は非排水条件下でこない、積分ではWilson- θ 法($\theta=1.4$)を用い、数値解析的に安定性を高めるためにレーレー減衰として $\alpha=0.0$ 、 $\beta=0.005$ を液状化の進行にともなって減少させる形で用いた。解析結果についてみると、砂層のGL-8mにおける加速度応答値は図-9に示すように観測値に対して25%程度低い結果となった。この要因としては図-10に示すように地盤のモデルと実地盤の伝達特性の相違が考えられる。一方、過剰間隙水圧応答は図-11に示すような結果が得られた。有効上載圧の約5%に満たない低いレベルの過剰間隙水圧を、この程度に再現できたことは、この解析手法の適用性がある程度支持するものと考えられる。また、原位置の砂の力学特性が凍結サンプリングによって正確に把握されたことも観測結果と整合する解析結果が得られたことに大いに寄与したと考える。

7. 結論

本研究で得た結論は以下のとおりである。

- 1) 観測地点の砂層は均等係数が小さく、特に液状化しやすい粒土の砂質土が相対密度が30%といった非常にゆるい状態に堆積していた。チューブと地盤凍結により不覚覧試料を採取したが、チューブ試料の液状化強度は凍結試料の2倍以上となって表れた。
- 2) 千葉県東方沖で発生したM=6.7の地震において、砂層(GL-8m)では合成最大加速度 93Gal が観測され、水頭40cm(有効上載圧力の約5%に相当)の過剰間隙水圧が発生した。過剰間隙水圧は加速度の主要動に対応して、急激な上昇がみられ、以後徐々に消散する過程が記録されていた。約43分を経過した時点で水頭4cm程度の残留間隙水圧が認められた。
- 3) 間隙水圧波形には過剰間隙水圧とほぼ同じ大きさの短周期の波が重なるように記録されていたが、この短周期成分は加速度波形と高い相関度を示し、間隙水圧計自体の振動がおもな起因と考えられる。
- 4) 1次元の地盤モデルの有効応力解析を行い、地震時の地震動応答と過剰間隙水圧応答が観測値に対して、やや低い値となったが、概ね本解析法は工学上満足すべき適用性があるものと結論される。

参考文献

- 1) S.Iai, Y.Matsunaga, T.Kameoka : Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of The Port and Harbour Research Institute, Vol.29 No.4, 1990, pp.27-56

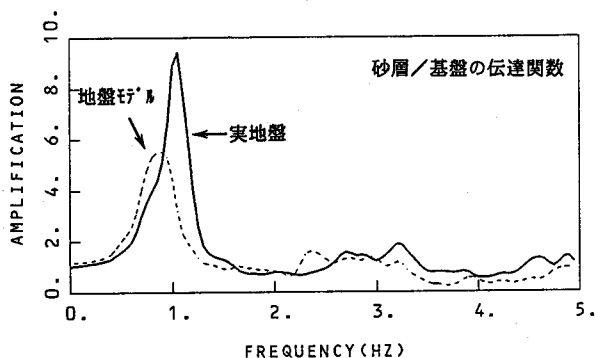


図-10 地盤モデルと実地盤の伝達特性

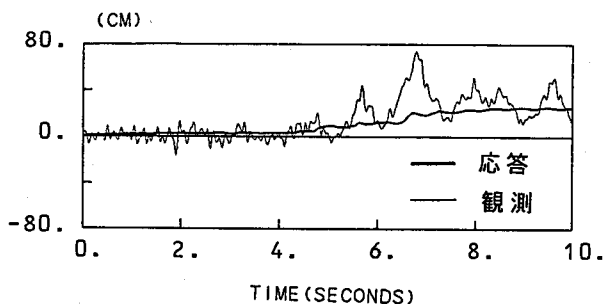


図-11 過剰間隙水圧の応答波形と観測波形