

(61) 東京湾周辺の軟弱地盤での地震時挙動観測について

鹿島建設技術研究所 正員 大保 直人
 鹿島建設技術研究所 正員 石田 寛
 鹿島建設技術研究所 正員○鈴木 康嗣

1. まえがき

耐震工学において、地盤の増幅特性・構造物の振動特性・構造物基礎と地盤の相互作用および液状化時の地盤特性を解明するために、地震観測による地震データの蓄積が実施されている。特に、近年の東京湾臨海部の開発事業にあたっては、軟弱地盤地域に土木・建築構造物が多数計画されており、液状化発生の可能性を含めて地震時応答特性が検討されている。そのためには、臨海部における地震動の特性を調べる必要がある。

そこで、東京湾周辺の軟弱地盤における地震時の応答特性の解明、および液状化発生を確認するために、湾岸6地点で地震観測を実施している。その内、木更津・幕張・江東の3地点では間隙水圧計を設置している。

ここでは、地震観測システムの概要、観測結果の紹介、最適化による地盤の減衰定数の評価、および液状化発生の検討結果について紹介する。

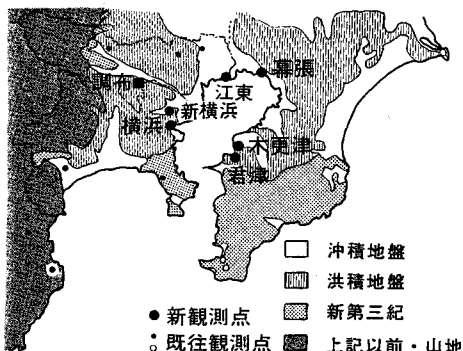


図-1 地震観測地点

2. 地震観測概要

東京湾周辺の軟弱地盤を対象とし、図-1に示した地震観測網（委託観測点1地点を含む）を整備した¹⁾。

本観測網の特長は、①東京湾を囲んで系統的に配置し、各観測点間の相互比較が行えること（図-1）、②地表・地中の同時観測であること（図-2）、③やや長周期領域の地震動を精度良く観測できるように速度計を基本とし、速度と加速度が同時に記録できること（図-2、表-1）、④江東・幕張・木更津では間隙水圧計を埋設したこと（図-2）、⑤観測データは電話回線を通して調布の観測センターで集中管理されること（図-3）などである。

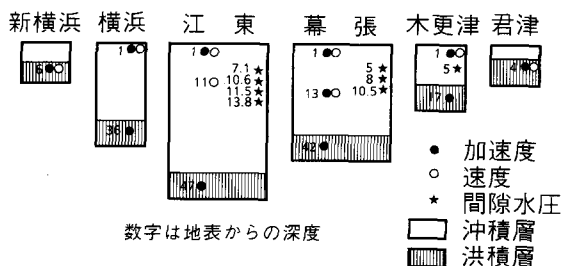


図-2 地震計・間隙水圧計設置深度

表-1 地震計主仕様

型式	速度帰還型
総合周波数特性 (誤差3%以下)	0.1~47Hz
最大測定範囲	± 100Kine ± 2000gal
最小分解能	0.3mKine 0.01 gal

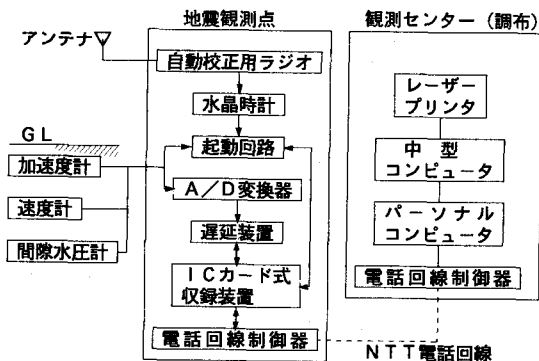


図-3 計測のブロック線図

3. 江東観測地点での観測結果とその検討

観測結果

1990年2月より地震観測を開始し、1991年4月現在までに約50地震の記録を収録している。これらの記録の内、諸元が明らかとなっている記録のマグニチュードと震央位置の分布を図-4に示す。収録された地震は、千葉県および茨城県を震源とした中小地震が多いが、マグニチュード6以上のものも8地震(図-4の範囲からはみ出す6地震を含む)記録されている。

観測波形の内、地表で得られた速度波形の特徴的な2例を図-5に示す。地震記録(a)は、1990年2月20日に発生したもので、震央は図-4に示したように伊豆半島と大島間の海域にあり、マグニチュードM6.5、深さ5kmと浅い。地震記録(b)は、継続時間が300秒にもおよび、長周期成分を含んだ波形であり、その卓越周期(約8秒)から、主に関東平野の厚い堆積層の影響で発生した表面波であると考えられる¹⁾。一方、地震記録(b)は1990年5月3日に茨城県北部(図-4参照)で発生したM5.2、深さ58kmの地震であり、記録中に表面波は見当たらない。両者の震源距離はほぼ等しいので、この相違は伝播経路の違いによるものと考えられる。

次に、これまでに得られたGL-47mとGL-1mの加速度記録のフーリエスペクトル比の平均値をNS成分、EW成分に分けて図-6に示す。NS成分は0.90Hzに、EW成分は0.94Hzに1次の卓越周期があり、5Hz程度まではほぼ同一の傾向を示しているが、5Hz以上の周波数範囲では、NS成分の方が応答倍率が大きくなる特徴を示している。

最適化による減衰定数の評価

江東観測地点の地震動記録に基づいて、図-7に示したフローに従って地盤の減衰定数を求めた。以下に概要を述べる。

- ① 地中観測点(GL-47m)における加速度記録の最大値が2Gal以上である地震を選び、S波の初動から約10秒間をデータウィンドーにより取り出した。
- ② NSおよびEW成分のそれぞれのフーリエスペクトル比は、5Hz以下でよく一致していることが認められたので、ここでは比較的地震ごとにばらつきが少ないNS成分の0.3~5.0Hzを対象に地盤のS波速度および減衰定数を求めることとした。用いた記録は14組

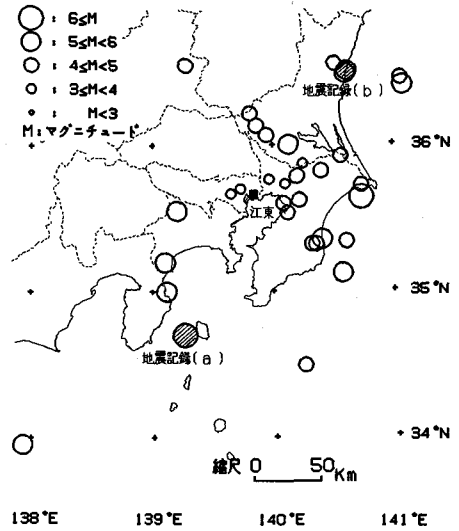
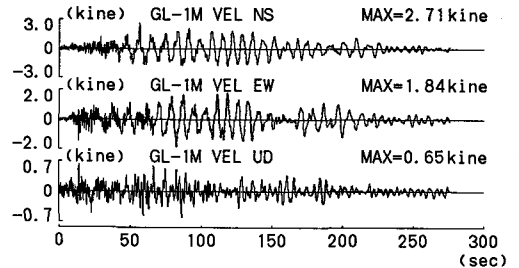
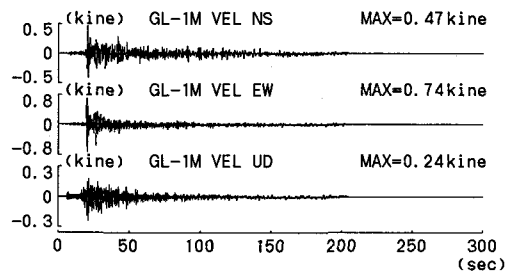


図-4 主な観測地震の震央分布



(a) 伊豆大島近海地震(1990年2月20日)



(b) 茨城県北部地震(1990年5月3日)

図-5 観測記録例

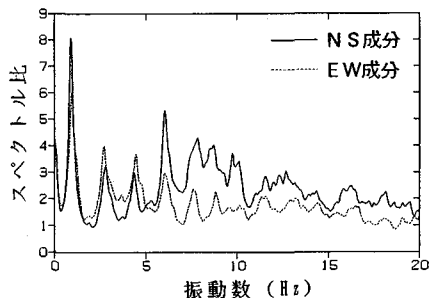


図-6 加速度記録のフーリエスペクトル比 (GL-1m/GL-47m)

(地表加速度の最大29Gal)である。

③最適化の対象パラメータであるS波速度および減衰定数の初期値は、それぞれS波検層結果および経験的な値を設定した。その他の地盤定数(層厚、密度)は地盤調査による値に固定した。

④観測記録によるスペクトル比と一次元波動理論に基づくその残差二乗和を目的関数として、S波速度および減衰定数を最適化した。

最適化のアルゴリズムは準ニュートン法を採用し、収束条件は目的関数の減少の度合いがある一定値を下回ることにした。

最適化によるスペクトル比の変化の比較を図-8に示す。これより、パラメータの初期値では説明できないスペクトル比の2次および3次のピークが最適値を用いると観測記録と良く一致することが分かる。また、得られた最適値と初期値のS波速度および減衰定数の深さ方向分布を図-9に示す。これより、S波速度の最適値は深部では初期値からほとんど変化しないのに対して、浅部では約1.7倍に増大していることが分かる。また、深さ47mまでの平均的な減衰定数は6.6%と得られた。

スペクトルは3次までのピークが一致しており、この振動数範囲では減衰の振動数依存性はほとんど認められない。

D Y N A I Dを用いた液化化発生に関する検討

江東観測地点では、液化化解析手法の検証を目的として解析に必要な入力パラメータを求めるための地盤調査を実施している。地盤調査は、ボーリング調査とPS検層を先行して実施し、当該地点の地盤応答の解析に必要な地盤定数を求めるために不攪乱試料を採取した。

ここでは、一次元液化化解析プログラム「D Y N A I D」を用いて当該地点での液化化発生の検討を試みた。本プログラムの特長は、解析に必要な入力パラメータを、比較的容易に物理試験および三軸圧縮・伸張試験より求められるところにある²⁾。

解析に用いた入力地震動を図-10に示す。これは、1987年12月17日に発生した千葉県東方沖地震を東京大学生産技術研究所西千葉実験所の基盤で観測されたNS成分の波形である。当該地点で基盤に相当する地点に埋設されている地震計の設置深さ46.7m

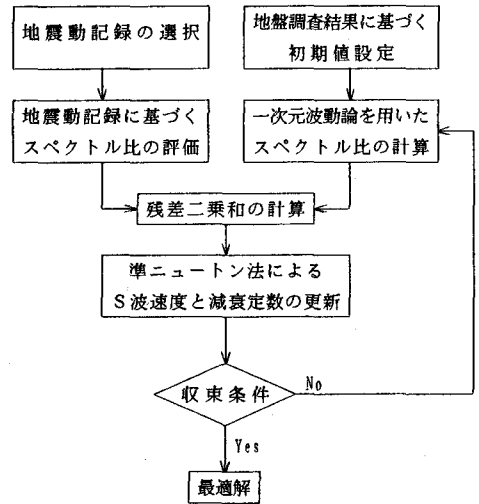
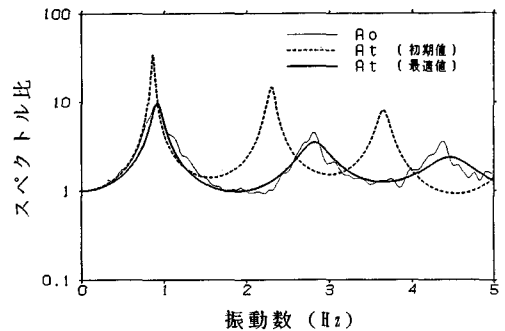


図-7 最適化フロー



Ao : 加速度記録による相乗平均
At : 一次元波動理論による理論値

図-8 加速度フーリエスペクトル比
(GL-1m/GL-47m)

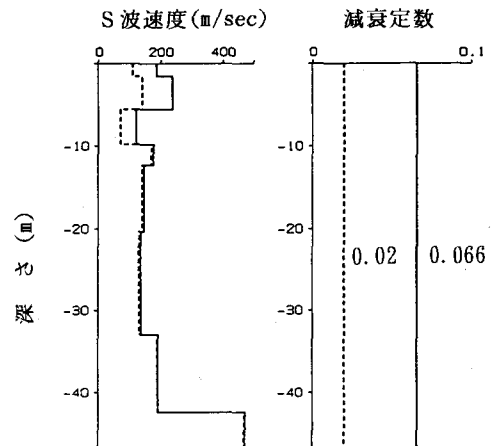


図-9 初期値と最適値の比較

を入力点とし、地表までを36の要素でモデル化した。解析条件は、下端固定、上端自由および側方半無限とした。入力の大さは、観測波形原波(ケース1)、観測波形の3/4(ケース2)および1/2(ケース3)の3ケースとした。

図-11に、3つの解析のほぼ解析終了時に相当する35秒時の過剰間隙水圧の深さ方向分布の重ね書きを示す。この図の実線は有効上載圧に相当し、横軸が0になると液状化したことになる。深さ6.7mおよび13m付近の砂層の間隙水圧は、入力が大きくなるに従い上昇の傾向にあり、この地点においては入力地震動が50Gal程度で液状化発生の可能性があることを示唆している。

図-12には、有効応力解析で得られた地盤応答加速度を、基盤入力加速度振幅で基準化した加速度振幅の深さ方向分布を示した。地表での加速度応答倍率は、液状化の発生が高くなるとやや小さくなる傾向が見られる。

これまでに観測された地表での最大加速度は、せいぜい29Gal程度と小さくこの結果と比較できるレベルではないため、ここでは観測結果と解析結果との比較は実施していない。また、これまで観測された最大の間隙水圧の上昇はせいぜい有効応力の3%程度であり、液状化発生を議論できるデータは得られていない。現在新たな地盤データが得られつつあり、これを用いて今後この結果を再検討して液状化発生の可能性について検討を継続して行きたい。

4. あとがき

ここでは、地震観測システムの概要、観測結果、全応力解析および有効応力解析手法を用いて当該地点での地盤応答特性結果について紹介した。今後さらに地震観測を継続し、観測記録を基に軟弱地盤での地震時の挙動を解明して行きたい。

液状化解析においては、J. H. Prevost教授に指導を頂いた。また、ここで用いた入力地震動は東京大学生産技術研究所の片山恒雄教授より提供されたものである。ここに記して深甚なる謝意を表す。なお、本地震観測は筆者らと太田外気晴、丹羽正徳、宮村正光、武村雅之、池浦友則、福岡篤信と共同で実施している。

【参考文献】1) 丹羽、大保、鈴木、野澤：東京湾臨海部の地震動特性に関する研究-その1、日本建築学会学術講演梗概集、1990、2) 林、大保、Prevost：液状化解析プログラム『DYNALD』とその1検証、第8回日本地震工学シンポジウム、1990

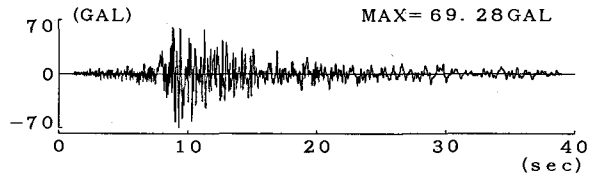


図-10 入力地震動(ケース1:観測波形原波)

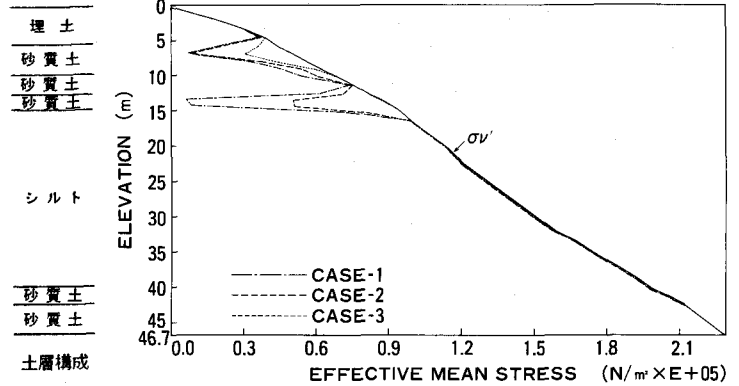


図-11 過剰間隙水圧分布の比較

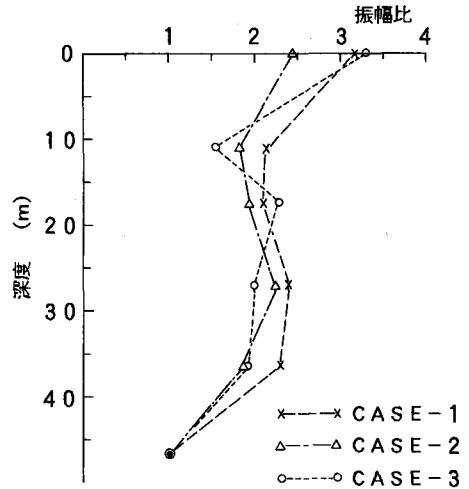


図-12 加速度応答の深さ方向分布