

## 2.1 地盤調査車による調査結果

### 2.1.1 調査の概要

地震によって液状化した地点の地盤特性を把握するために、多成分コーン貫入試験による地盤調査を行った。調査地点は、尼崎市、西宮市、神戸市深江浜町・魚崎浜町・灘浜町・六甲アイランド・ポートアイランドの計7地点である。いずれも埋立て地盤であり、液状化による噴砂や何らかの地盤変状が確認されている地点である。地盤調査は当社が保有している地盤調査車（Geo-Explorer）を用いて行った。

### 2.1.2 試験装置および試験方法

調査に用いた地盤調査車の外観を写真2.1-1に、神戸市魚崎浜町で行った試験風景を写真2.1-2に示す。地盤調査車は高精度の連続した地盤データを短時間に取得でき、地盤構造を的確に評価するシステムである<sup>1)</sup>。地盤調査車には多成分コーン貫入試験とMWD（Measurement While Drilling）検層という2種類の地盤調査機器を搭載している。地盤調査車の作業の模式図を図2.1-1に示す。地盤調査車は貫入装置が搭載されている作業室と、この貫入装置を制御すると共にデータを取得するコンピュータを搭載した計測室とからなっている。このように全装置を車に搭載しているため、機動性に富んだ地盤調査が可能である。地盤調査車の主な仕様を表2.1-1に示す。多成分コーン貫入試験は比較的緩い地盤（N値<40）用の調査機器であり、MWD検層は硬質地盤用の調査機器である。今回の液状化地盤の調査は主に多成分コーン貫入試験により実施した。多成分コーンの概要を図2.1-2に示す。一般的な三成分コーンにせん断波速度測定用の地震計（速度計）を組込んでいる。このコーンを2cm/secの一定速度で貫入しながら、コーンの先端抵抗、周面摩擦抵抗、間隙水圧を測定し、一旦貫入を停止して調査車に内蔵されているせん断波発生装置（板たたき法）により地表でせん断波を発生させ、せん断波速度構造を求めた。

表2.1-1 地盤調査車（Geo-Explorer）の主な仕様

	多成分コーン貫入試験	MWD検層
調査深度	最大80m	最大80m
調査項目	地盤構造、液状化強度、 S波速度構造	地盤の換算N値、 支持層の深度コンター
対象土質	粘性土、N値<40の砂質土	砂礫、土丹、瓦礫
調査能力	延べ100～250m/日	延べ150～350m/日

車体寸法：長さ8.75m×幅2.5m×高さ3.8m

車体重量：19.6 t

### 2.1.3 調査結果

神戸市魚崎浜町で行った調査結果の一例を図2.1-3に示す。左から付近（数十m離れている）で行われたボーリングの柱状図、標準貫入試験のN値、多成分コーン貫入試験の先端抵抗 $q_t$ 、周面摩擦 $f_s$ 、摩擦比 $R_f$ （周面摩擦と先端抵抗の比 $= f_s / q_t$ ）、間隙水圧 $P_w$ の深さ方向分布を示している。ボーリング柱状図によると、地層は複雑に変化しているが深度16.5mまでは概ね砂地盤である。ただし、深度2.1m～2.7m, 5.9m～10.7m, 12.9m～13.6mを除けば礫を混入した地盤である。一方、コーン貫入試験では、全体的にみると先端抵抗 $q_t$ と周面摩擦 $f_s$ は深さと共に漸増し間隙水圧 $P_w$ は静水圧に近い分布を示している。深度8m付近までの地盤は摩擦比 $R_f$ が概略1.0%程度であることから、細粒分をやや含んだ砂地盤であることがわかる。また、それ以深では摩擦比 $R_f$ がさらに大きくなり、細粒分を多量に含んだ砂地盤であると推測される。先端抵抗 $q_t$ と周面摩擦 $f_s$ は共にギザギザとしているが、これは地中の礫分にあたって局所的に抵抗が大きくなっているためである。標準貫入試験では平均的に地盤を評価してしまうので、礫を含んだ地盤ではN値を過大評価している可能性がある。一方、多成分コーン貫入試験ではデータが連続的に取れるため、抵抗の大きな礫部分と抵抗の小さな礫以外の部分を区別して評価することが可能である。

なお、本敷地地盤では阪神大震災により液状化が発生し、地盤の亀裂、噴砂とともに地盤が全体的に数十cm沈下していた。この沈下量から推定すると標準貫入試験のN値・コーン貫入試験の先端抵抗が共に小さな深度5.9m～10.1mの細砂・粗砂層のみでなく、標準貫入試験のN値は大きいがコーン貫入試験の先端抵抗が小さな深度3.7m～5.9mの礫混じり細砂層も液状化していたものと推測される。そこで、後のデータ整理では深度3.7m～10.1mまでの層が液状化したと判断した。

### 2.1.4 地震外力の算定

地震時の地盤の液状化抵抗を検討するためには、当該敷地における地震動強さから地盤内に生じたせん断応力を算出する必要がある。そこで、地震時に地盤中に生じた繰返しせん断応力比 $\tau_d / \sigma_v'$ を次式<sup>2)</sup>で定義した。

$$\frac{\tau_d}{\sigma_v'} = r_N \frac{\alpha_{\max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma_v'} (1-0.015Z)$$

ただし、 $r_N$  : 0.1(M-1)

M : 地震のマグニチュード

$\alpha_{\max}$  : 地表面最大加速度 (Gal)

g : 重力加速度 (Gal)

$\sigma_v$  : 上載圧 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_v'$  : 有効上載圧 (kgf/cm<sup>2</sup>)

Z : 地表からの深度 (m)

なお、各調査地点の地表面最大加速度を予測することは現状では困難であるので、第1章の結果を参考にして300～400Galに設定した。この地表面最大加速度はあくまでも暫定値であり、今後の検討結果を踏まえて見直しを行う予定である。

### 2.1.5 液状化判定

2.1.3項に示した神戸市魚崎浜町の結果と同様な方法で各調査地点のデータを整理した。図2.1-4に各調査地点に生じた地震時の繰返しせん断応力比  $\tau_d / \sigma_v'$  とコーン貫入試験の換算先端抵抗  $q_{t1}$  の関係を示す。換算先端抵抗は次式の方法に従い、先端抵抗  $q_t$  から有効上載圧  $\sigma_v'$  の影響を換算したものである。

$$q_{t1} = q_t / \sigma_v'^{0.5} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

図2.1-4(a)には全データを、図2.1-4(b)~(d)には摩擦比  $R_f$  が0.5%以下、0.5~1.0%、1.0%以上に分けて示している。なお、図2.1-4には釧路沖地震、北海道南西沖地震、および北海道東方沖地震により液状化した地点と液状化しなかった地点で実施した試験結果<sup>3)</sup>を併記している。また、図2.1-4(b), (c)には凍結サンプリング試料から得られた液状化強度(三軸試験による軸ひずみ両振幅  $DA = 5\%$ , 繰返し回数  $N_c = 15$ 回) と換算先端抵抗  $q_{t1}$  の関係から細粒分含有率  $FC$  毎に得られた相関曲線<sup>4)</sup>も併記している。阪神大震災は地震動が大きかったことから、繰返しせん断応力比が大きな領域にデータが集中している。図2.1-4から次のことが指摘できる。

- 1) 同一の換算先端抵抗  $q_{t1}$  に対して摩擦比  $R_f$  が大きいほど液状化強度が大きくなる。
- 2) 摩擦比  $R_f$  で分けると、液状化・非液状化の境界が明確に示される。
- 3) 2)で示した境界は、細粒分含有率  $FC$  で分けた凍結サンプリング試料の液状化強度と換算先端抵抗  $q_{t1}$  の関係に概ね一致する。
- 4) 阪神大震災による液状化地域での調査点数はまだ少ないが、既往の調査結果<sup>3)</sup>と矛盾のない結果となっている。従って、阪神大震災における被災地域の液状化地盤調査にGeo-Explorerは適用可能である。

図2.1-4はコーン貫入試験の先端抵抗と周面摩擦から得られ、他の物理試験結果等を必要としない。従って、コーン貫入試験のみで液状化強度が推定可能であるといえる。

### 2.1.6 まとめ

阪神大震災により液状化した地点の地盤特性を把握するために、地盤調査車(Geo-Explorer)を用いた多成分コーン貫入試験を行った。液状化事例を繰返しせん断応力比とコーン貫入試験の換算先端抵抗との関係で整理したところ、液状化・非液状化の境界が明確に示された。従って、阪神大震災における被災地域の液状化地盤調査にGeo-Explorerが適用可能であるといえる。

#### <参考文献>

- 1) 鹿島技術研究所：GEO-EXPLORER (地盤調査車)、KaTRIリーフレット、94-21
- 2) Tokimatsu, K. et al. (1983) : Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content, Soils and Foundations, Vol.23, No.4, pp.56-74.
- 3) 古山田他 (1995) : 強震記録とコーン貫入試験結果に基づく液状化予測について、第30回土質工学研究発表会、掲載予定
- 4) 鈴木他 (1995) : コーン貫入試験及び標準貫入試験結果と原位置凍結試料の液状化強度との関係、第30回土質工学研究発表会、掲載予定



写真2.1-1 地盤調査車（左：全景、右：貫入装置）



写真2.1-2 地盤調査車による調査風景（神戸市魚崎浜町）

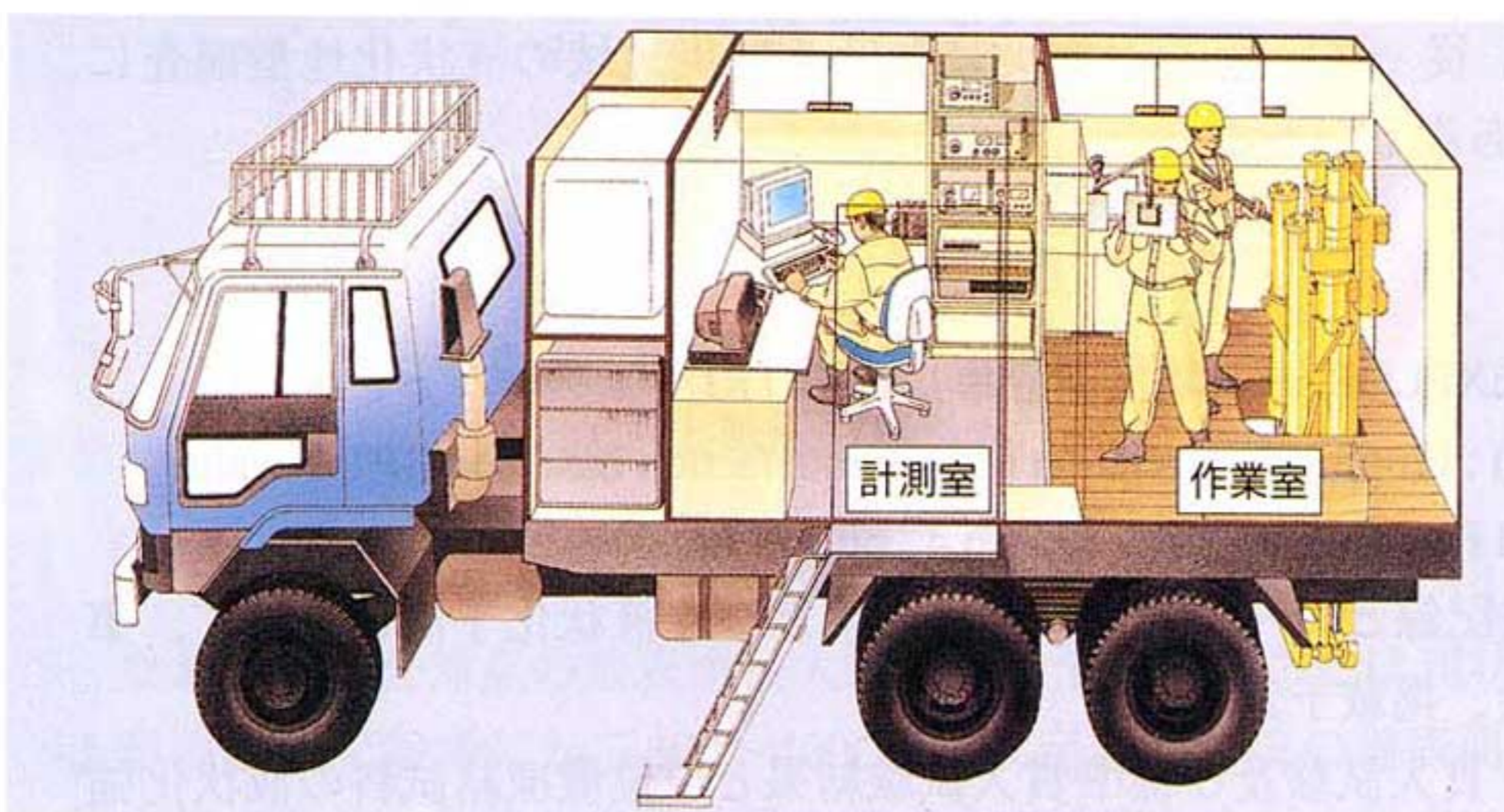


図2.1-1 地盤調査車による作業の模式図

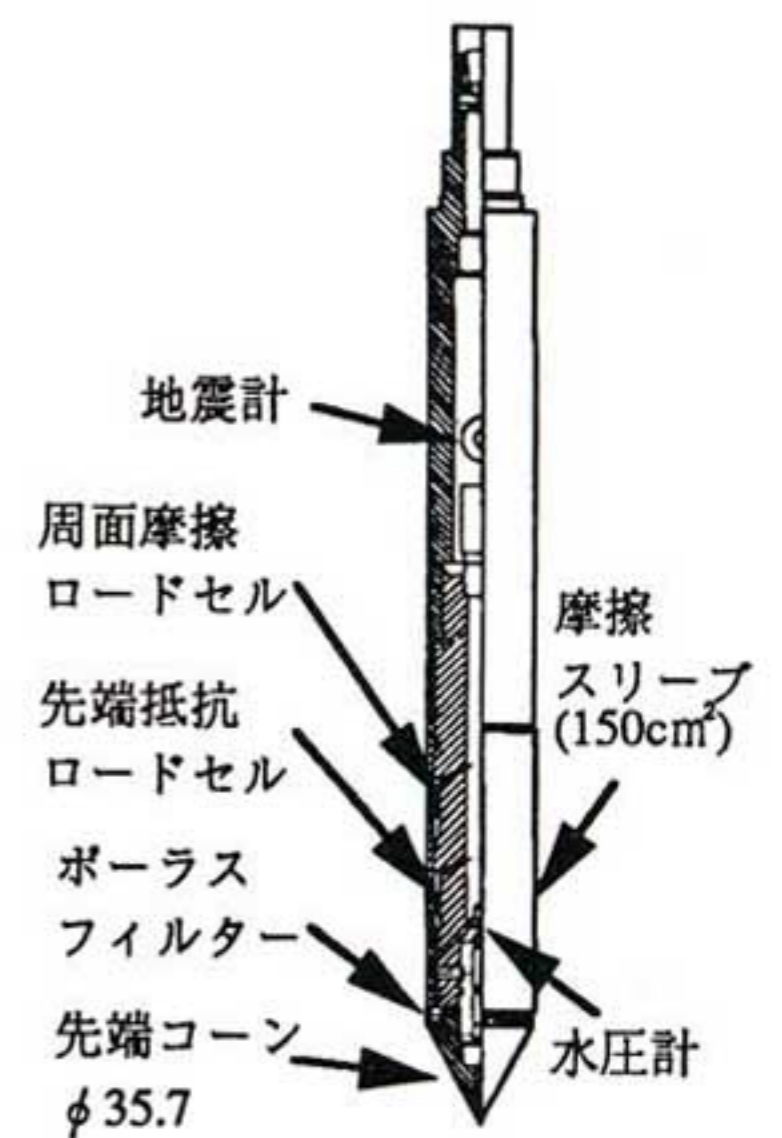


図2.1-2 多成分コーンの概要

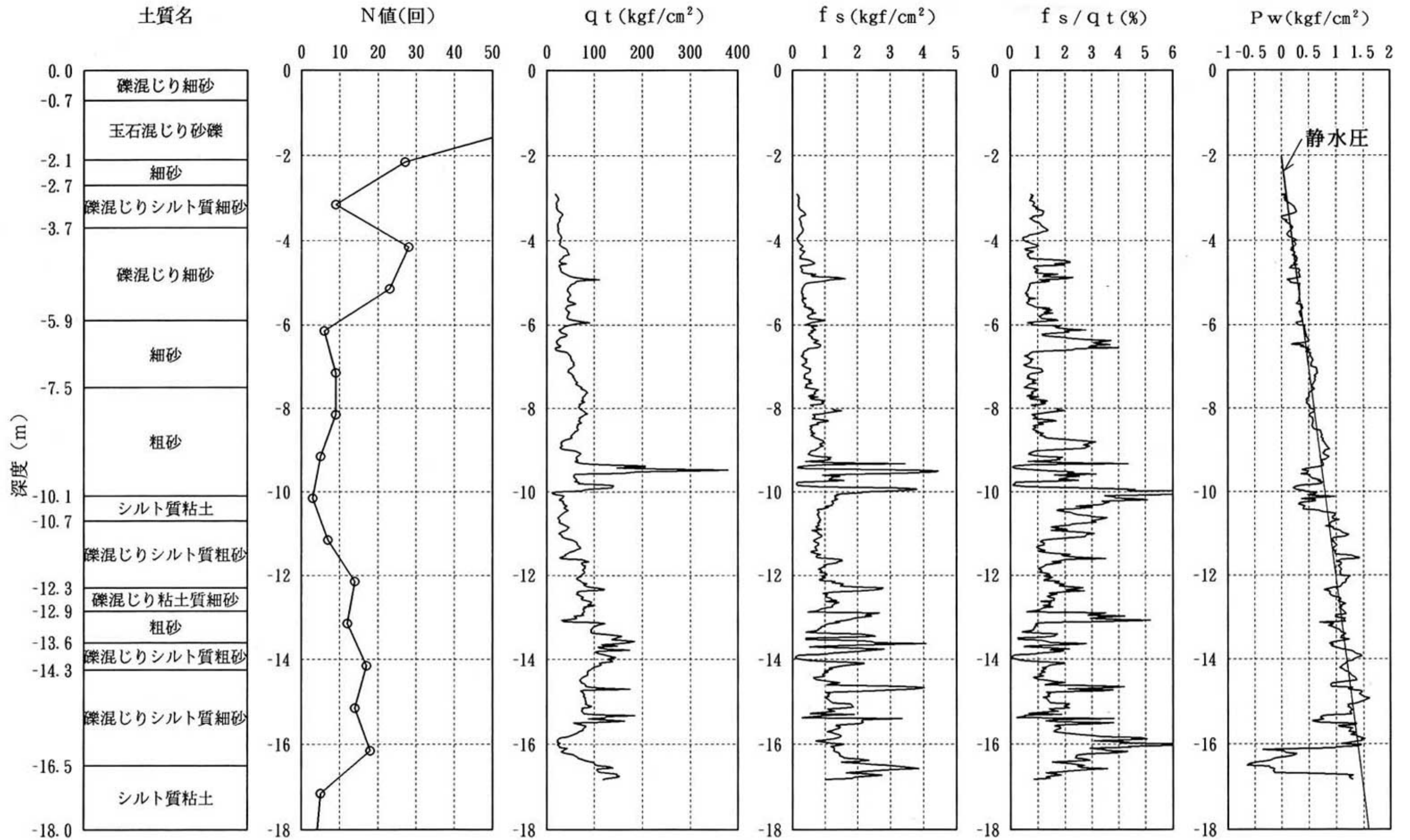


図2.1-3 調査結果の一例 (神戸市魚崎浜町)

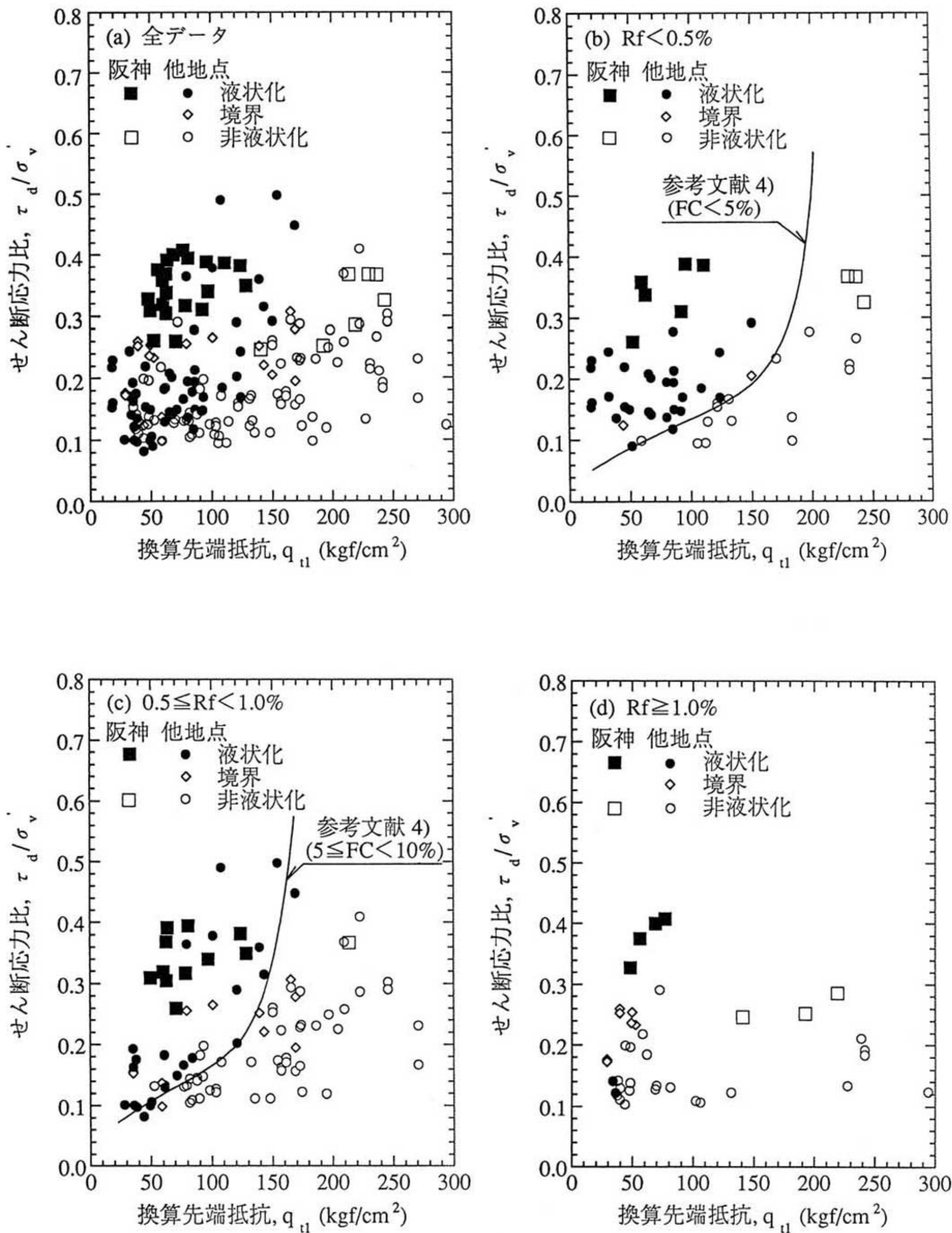


図2.1-4 液状化挙動と換算先端抵抗の関係

## 2.2 液状化地盤の再現と検証

### 2.2.1 概要

阪神地区には大学、民間等の研究機関の協力によって運営されている、関西地震観測研究協議会（座長：土岐憲三京都大学教授、事務局：（財）大阪土質試験所内）による地震のアレイ観測網が設置されている。今回は、ポートアイランドにおいて神戸市が実施していた地震観測システムで観測された兵庫県南部地震の加速度記録を事務局より借用し、解析を実施した。

図2.2-1に加速度計の設置地点を示す。当該地点では、地表面から約19mまでの部分はN値が5前後の飽和砂質地盤で、19mから約27mまでは軟らかい粘土層で、これより深い部分は硬い洪積層となっている。観測された加速度は、地表面から深さ79mでの最大値が679Galであり、深さ28m、12mと地表面での最大値がそれぞれ544Gal、565Galと341Galであった。今回の地震では、地表面での加速度が深さ79mでの加速度のほぼ半分になっており、地震が起きた時に飽和砂質表層地盤に過剰間隙水圧が発生し、地盤剛性が低下していたことが推測される。地震時の地盤の応答を再現し、解析による予測手法の妥当性を検証するため、液状化解析プログラムDYNAFLOWを用いて、成層地盤を1次元モデルとし、加速度が大きかったNS方向について観測結果のシミュレーションを実施した。

### 2.2.2 地震観測のシミュレーションおよび考察

解析に用いたDYNAFLOWは液状化現象を解析できる有効応力解析プログラムである。構成則はMulti-Yield-Surfaceに基づく塑性理論を用いている。必要な構成則パラメータは種々の土質室内試験の結果によって算定できる。解析に使用したDYNAFLOWについては2.2.3で述べる。

今回は、弾性パラメータは神戸市提供のN値とPS検層のデータによって定めたが、塑性パラメータはN値から経験式によって算出した。図2.2-2に解析モデルを示す。左右の境界は常に同じ挙動するように拘束条件を与えた。解析は、まず自重計算を行い、地盤の初期応力を求め、次に深さ79mで取れた加速度波を基盤から入力し、動的計算を実施した。

図2.2-3に加速度の解析結果と実測結果の比較を示す。計算結果と実測結果は定性的に一致しており、ここに示したモデルで地盤の実挙動を再現できることが分かる。一方、過剰間隙水圧の上昇を見るため、地表面の近くでの過剰間隙水圧の時刻歴を図2.2-4に示す。深さ4.25mでの最大過剰間隙水圧比が0.96に至っており、この部分の地盤がほぼ液状化したものと考えられる。これより下の地盤では、過剰間隙水圧比が0.5前後になっており、地盤が液状化していないものの、過剰間隙水圧の上昇によって地盤剛性が低下したものと考えられる。

以上の結果をまとめると、次のような結果が得られる。

(a) 今回の地震では、表層の飽和砂質地盤に過剰間隙水圧が発生し、これによって地盤剛性が低下して加速度の応答が小さくなったと推測できる。液状化の発生は深さ4.25m前後の範囲に集中しており、ほかの部分の地盤は液状化していない。

(b) DYNAFLOWによって実地盤の液状化現象を再現できるが、今後、さらに良好な解析

結果を得るためには、地盤性質を調べ、さらに詳細解析を行う必要があると考えている。

### 2.2.3 液状化解析プログラムDYNAFLOW

ここで使用したDYNAFLOWは鹿島と米国プリンストン大学との共同研究で開発された液状化解析プログラムであり、2次元及び3次元の解析が可能となっている。運動方程式は他の液状化解析プログラムと基本的に同じであり、Biotの多孔質運動理論に準じた固体-流体連成方程式を用いている。構成則はマルチサーフェイス理論を用いており、砂の非線形性、異方性および応力-ひずみ関係の履歴特性が表現できる。必要な構成則パラメータは、物理的性質試験及び三軸圧縮、伸張試験よりすべて求めることができる。

DYNAFLOWは多数のオプション機能を持ち、要素数、荷重数などに制限されることがなく、効率の良い計算が可能なシステムとなっており、豊富な要素ラブラリーと物性モデルを備えているため、複雑な構造物-地盤系の解析ができる。

これまでにDYNAFLOWを用いて地盤液状化予測及び液状化対策工法評価を多数実施しており、その有効性と実用性は振動台実験、動的遠心実験および地震観測のシミュレーション解析によって検証されている。今後、広範囲にわたって、地盤液状化予測及びその対策工法の評価において威力を発揮することが期待される。

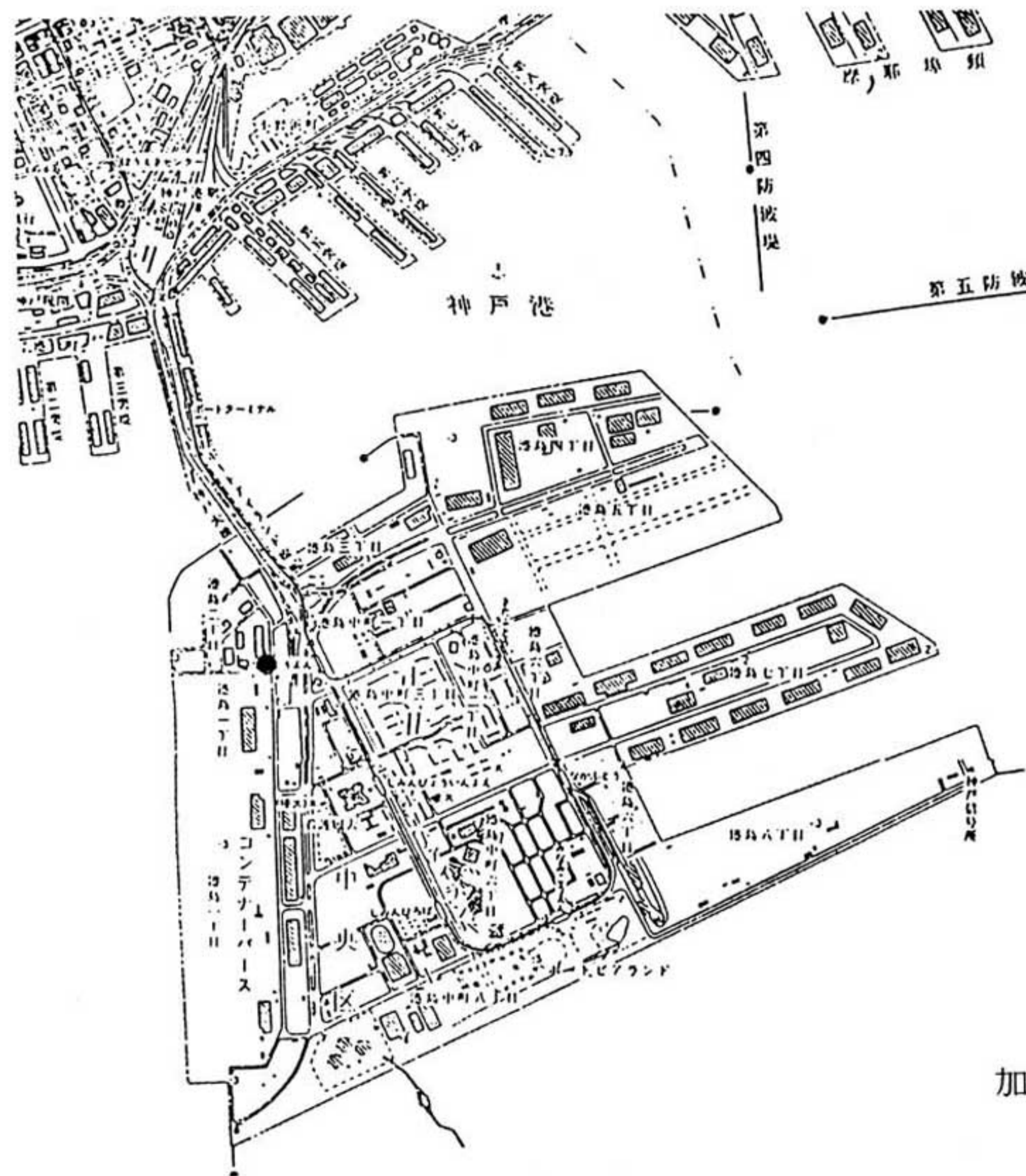


図2.2-1 加速度計設置地点

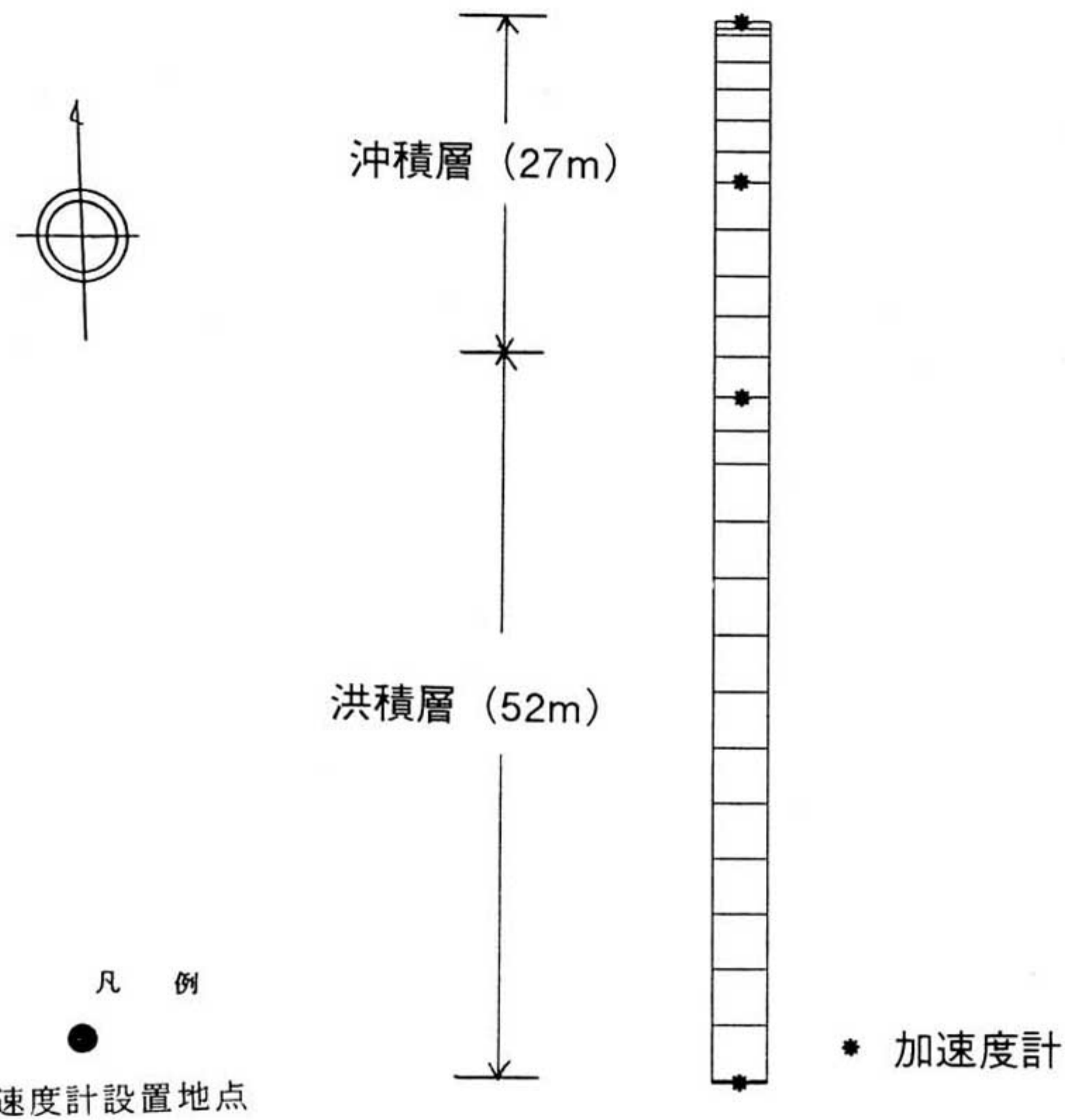


図2.2-2 FEM解析モデル

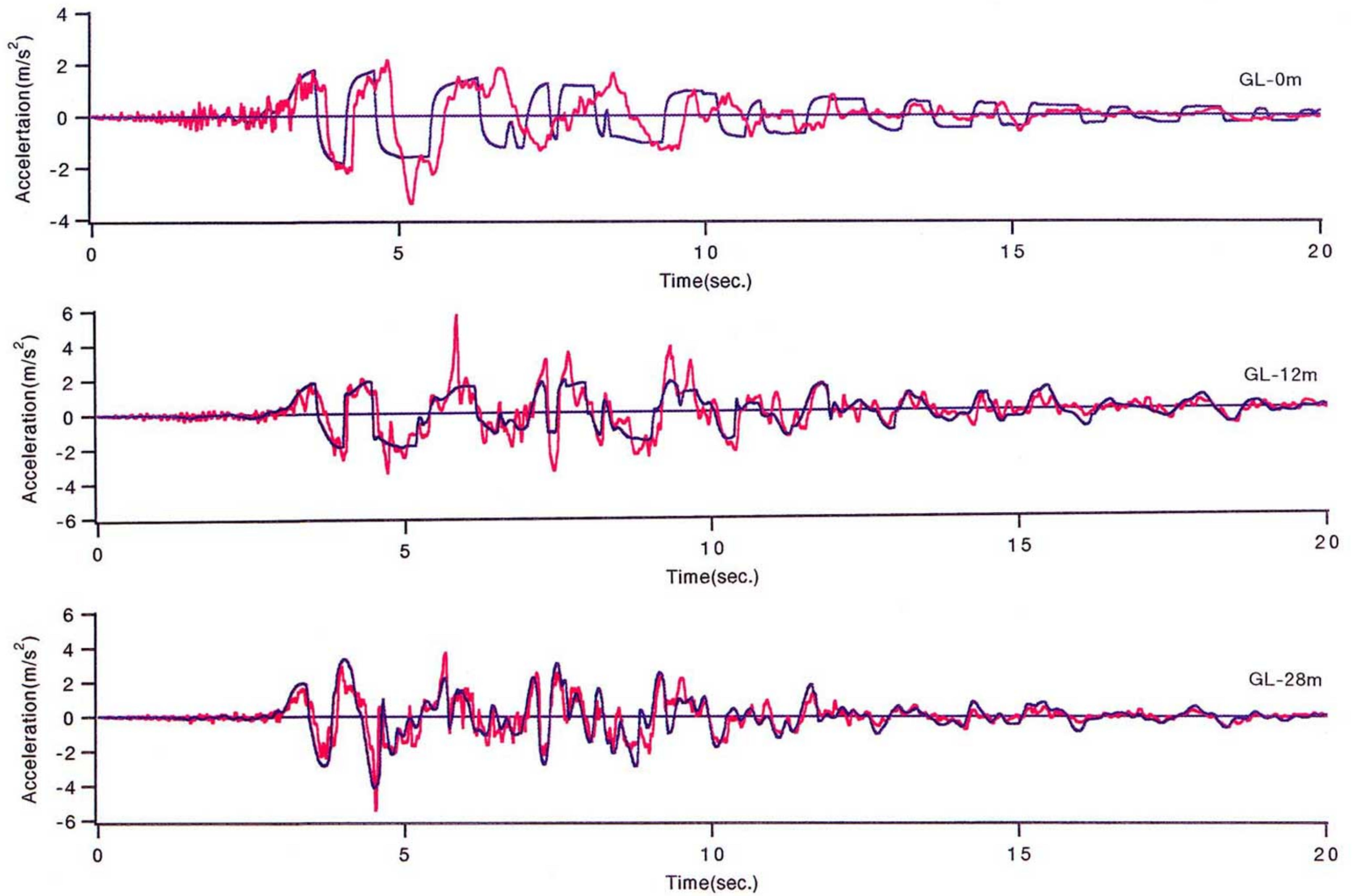


図2.2-3 加速度の解析結果と実測結果の比較

— 実測  
— 計算

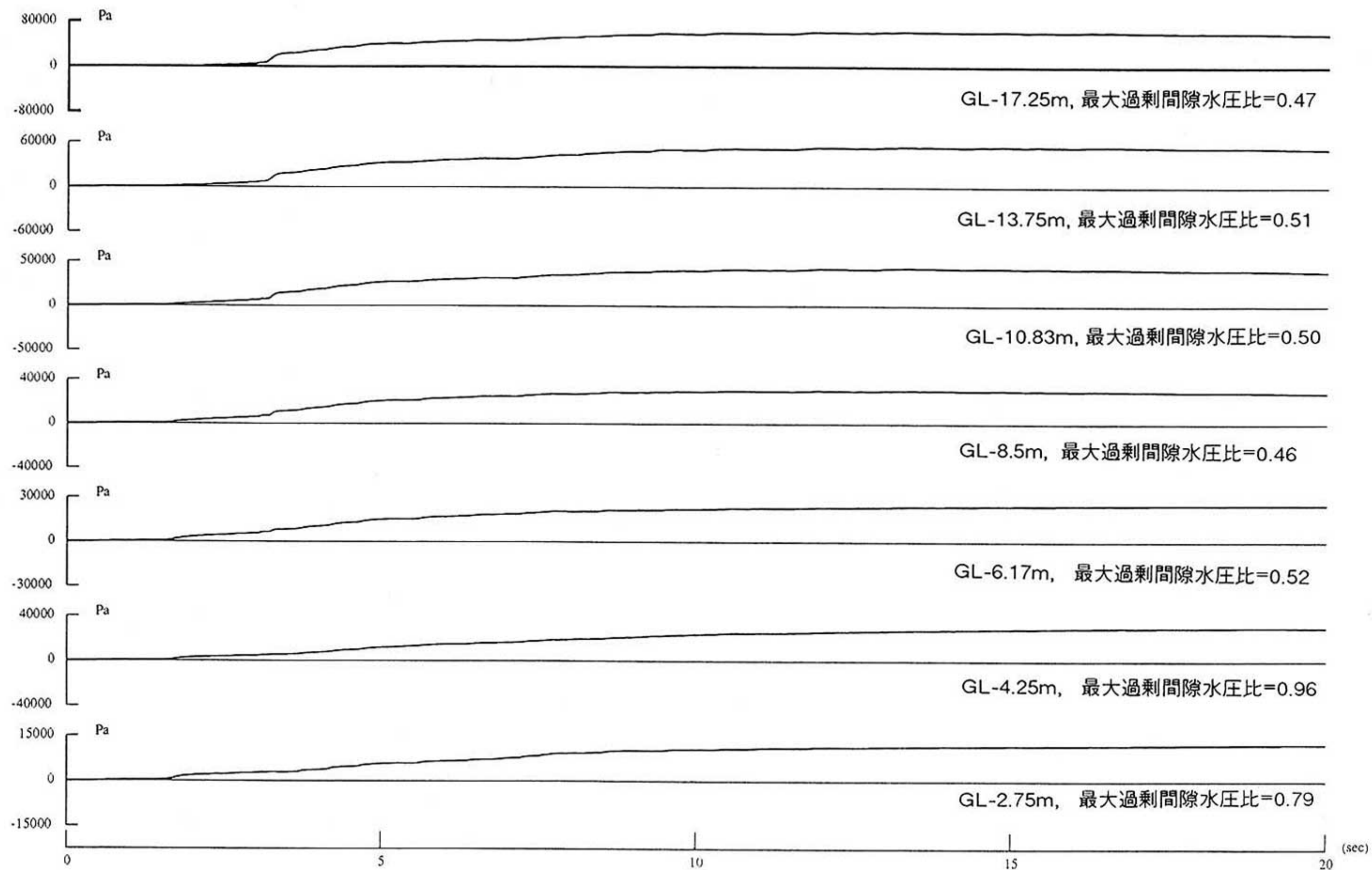


図2.2-4 過剰間隙水圧の時刻歴

## 2.3 振動台による地震動の再現

兵庫県南部地震の被害究明には地震動を忠実に再現することが要件と考え、当社技術研究所の大型振動台による地震動再現実験を行った。通常の住宅の1階にある家具類が配置された部屋を対象とし、神戸海洋気象台で記録された水平2方向、上下1方向の加速度波形を3方向同時に再現した。なお、家具類の固定・非固定による効果の比較実験も行った。

### (1) 振動台の概要

実験に用いた振動台は1991年に完成したもので、広さ5m角、6自由度加振（東西南北及び上下の3軸と各軸回りの回転）、および30tonfまでの試験体搭載容量など国内最高の性能を有するものである。詳しい性能については表2.3-1にまとめて示す。

### (2) 部屋の概要

通常の住宅の1階の居間を想定して、振動台の上に写真2.3-1に示すように、幅4.5m、奥行き3.5m、高さ2.5mほどの大きさの部屋を鉄骨骨組および木枠とベニヤ板の壁で作成した。室内にはTV、テーブル、食器棚、本棚、洋服ダンスなどの家具を配置した。これらの家具は市販されている家具固定用金物類を用いて壁に、あるいは天井に固定した。またこれらの金物の効果を確認するために、家具を固定しない場合の実験も行った。

### (3) 神戸海洋気象台で記録された加速度波形

神戸海洋気象台の地震記録は気象協会より購入した。原波形は87型強震計(JMA87S)により記録された水平2成分、上下1成分の計3成分の加速度波形で記録時間は3分間である。実験では、記録時間3分間の中で大きな加速度が生じている主要な20秒間を取り出して用いた。なお、加速度、速度の最大値をまとめて表2.3-2に示す。速度は原記録の加速度波形から数値積分により算出したものである。

### (4) 再現結果

振動台上の再現波形と神戸気象台の記録原波形との比較を図2.3-1に示す。また再現された加速度、速度の最大値をまとめて表2.3-3に示す。これらの図・表から実際の記録波形が、加速度、速度共に精度よく忠実に振動台上に再現されているのがわかる。

また家具を固定しない場合には写真2.3-2にみるように家具の多くが転倒し、食器類が散乱したが、金物で家具を固定した場合にはかなりの家具が転倒を免れ、これらの固定金物には一定の効果があることが確認された。

表2.3-1 振動台の性能

仕 様				
搭載重量	定 格	30tonf	最 大	50tonf
加振力	水 平	320kN/unit	上 下	672 kN/unit
最大加速度	水 平	2G	上 下	2G
最大速度	水 平	100 cm/sec	上 下	50 cm/sec
最大変位	水 平	±200 mm	上 下	±100 mm
加振振動数範囲	DC ~60Hz			

表2.3-2 記録波形の最大値一覧

方 向	加 速 度	速 度
南北成分	821 gal	91 cm/sec
東西成分	619 gal	74 cm/sec
上下成分	333 gal	40 cm/sec

表2.3-3 再現波形の最大値一覧

方 向	加 速 度	速 度
南北成分	836 gal	89 cm/sec
東西成分	627 gal	74 cm/sec
上下成分	385 gal	39 cm/sec

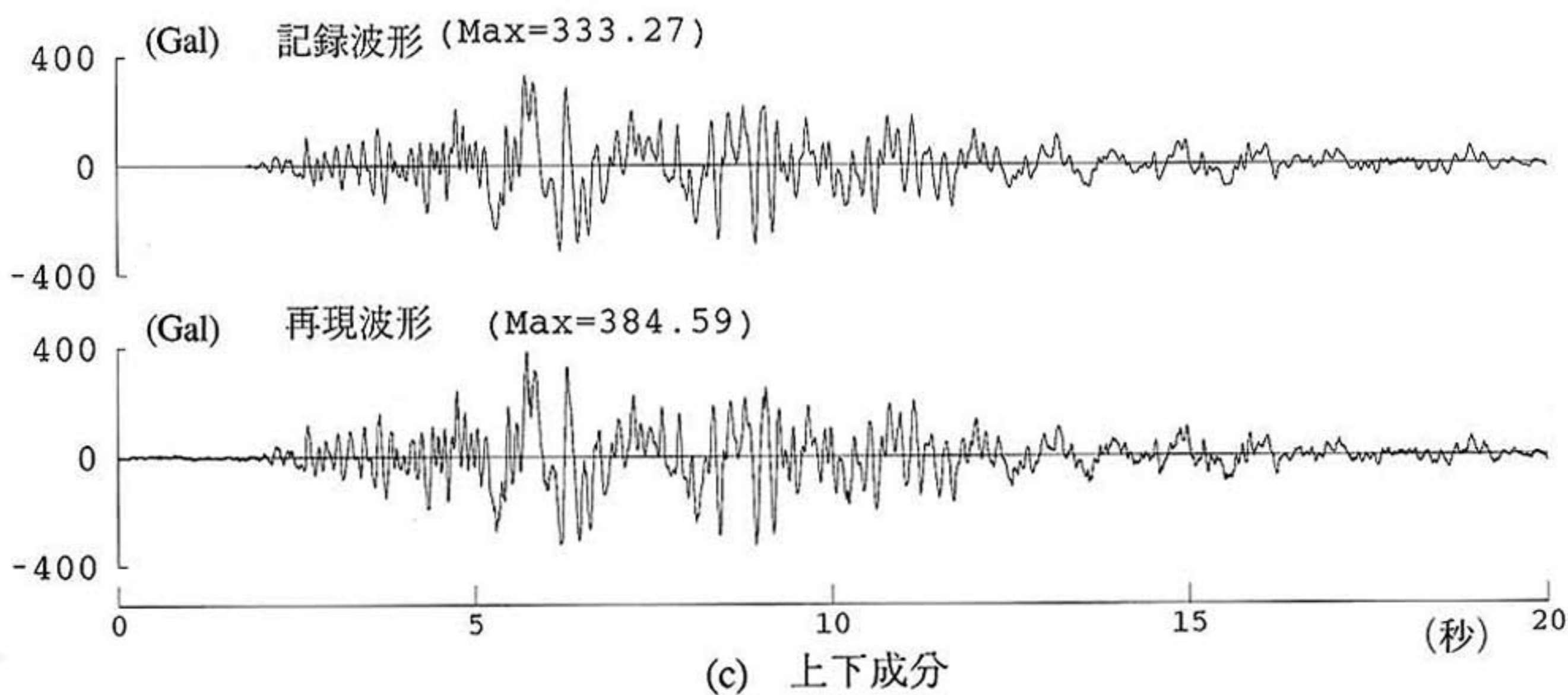
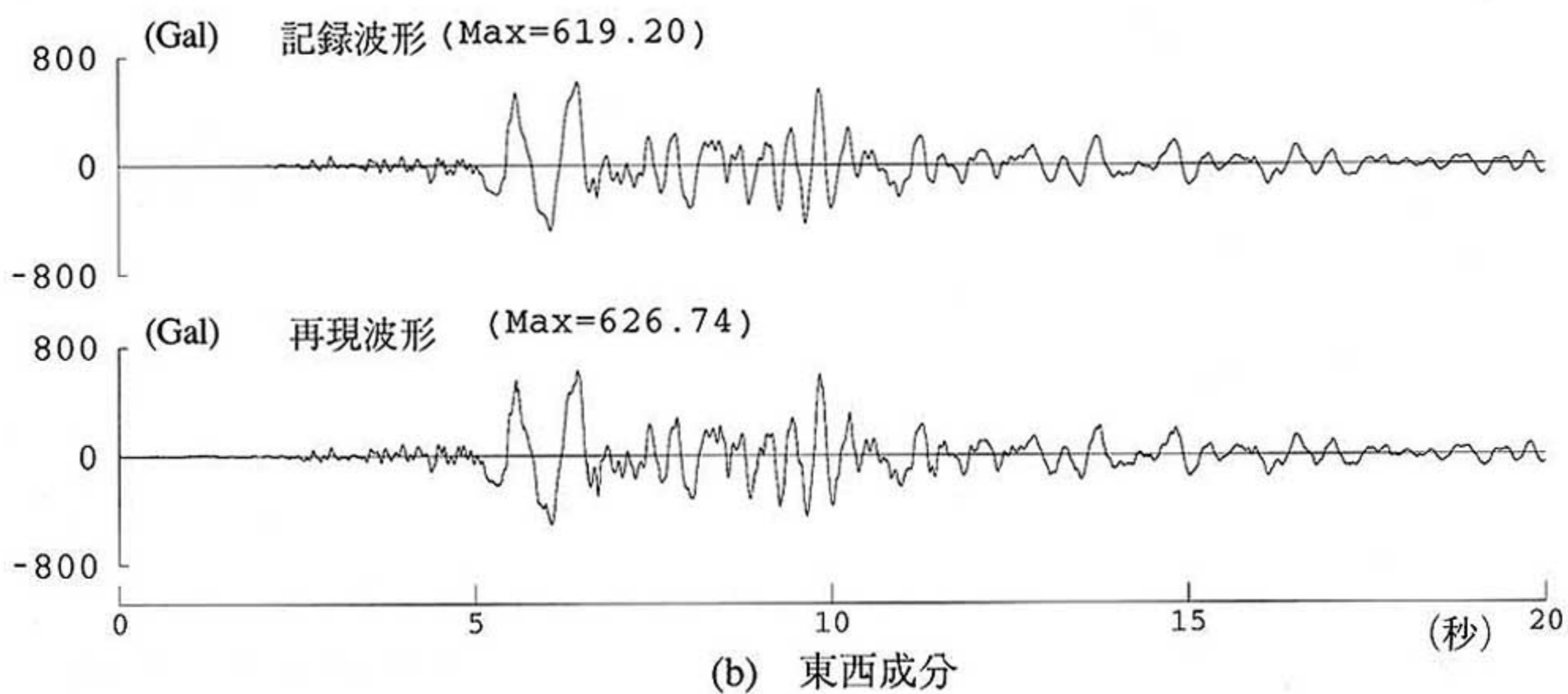
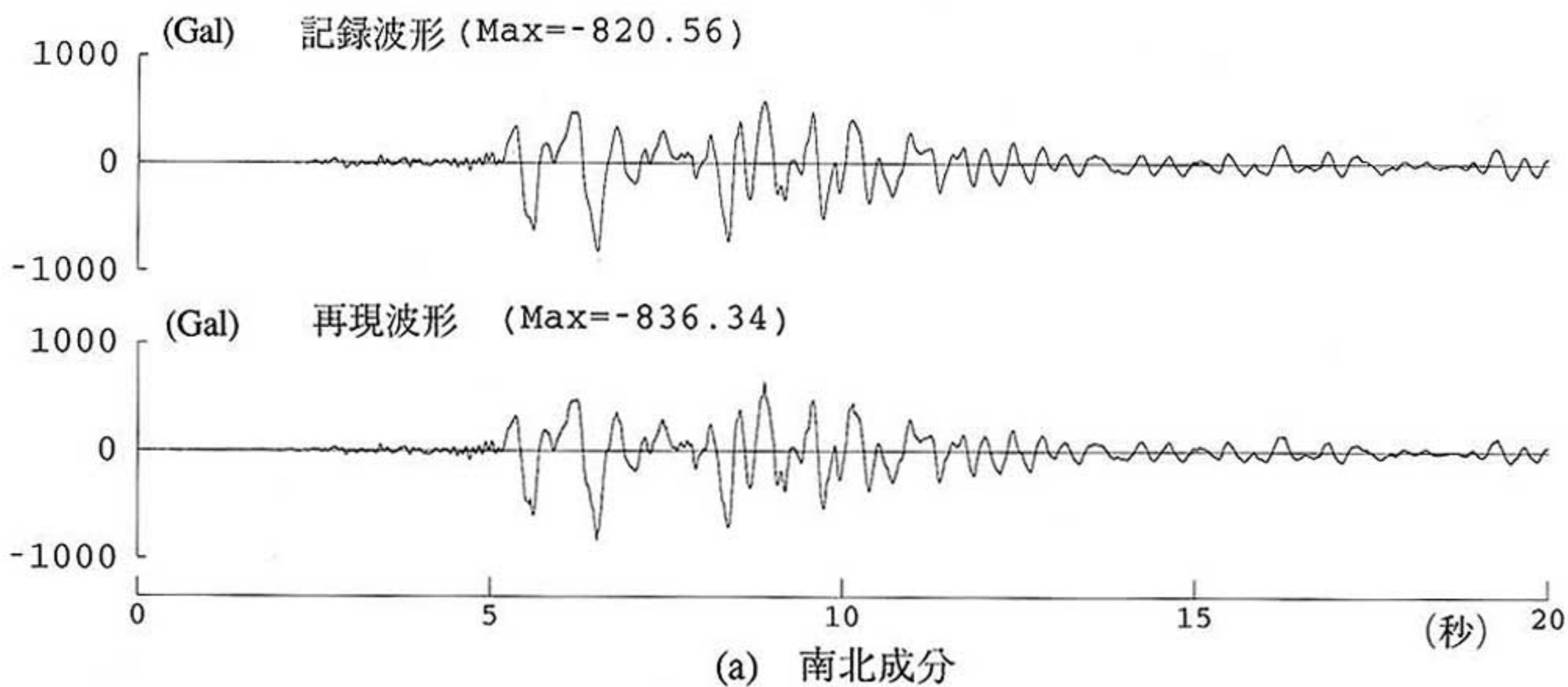


図2.3-1 記録波形と再現波形の比較



写真 2.3-1 試験前の部屋の状況（家具固定）



写真 2.3-2 試験後の部屋の状況（家具非固定）