

# 長期高密度観測記録に基づく改良地盤上に立地する免震建物の応答特性に関する研究

名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻  
環境・安全マネジメント講座 護研究室 後藤圭佑

## 1. 背景と目的

本研究は免震病院建物を対象とする。当敷地においては、液状化の可能性がある地盤で直接基礎を実現するために、詳細な地盤調査に基づいて地盤改良が行われた。これにより大幅なコストダウンが可能となった一方で、地盤改良の評価、建物特性の施工段階を含む長期的変化の確認および大地震時の健全性の評価が課題となった。

そこで、著者らは地盤改良前後において PS 検層や浅層レーリー波探査などの詳細な地盤調査に基づき、地盤改良の効果を確認した。施工段階においては、耐圧盤下や免震層における荷重分担性状の把握を目的とし、土圧計・変位計・光ファイバーセンサ(以下 SOFO)等により、2週間毎に観測を行った。また、竣工後においては 30 分もしくは 1 時間毎の高密度観測を行い、荷重分担性状の把握の他、温度変化や降雨が各計測値に与える影響を解明することに主眼を置き、分析を行った。また、地震動については、加速度計および土圧計により強震観測を行っている。

これほど多様かつ長期間に亘る高密度観測に基づき、免震建物の実挙動の把握と安全性の確認を試みた例は過去に少なく、今後の免震建物の研究において重要なデータとなり得る。

## 2. 建物及び敷地概要

対象建物は東西に約 100m、南北に約 50m の平面規模で地下 1 階、地上 4 階、一部 SRC 造の RC 造免震建物である。深度 GL-5m の耐圧盤及び擁壁で免震ピットが構成されている。また、対象敷地においては、深層混合処理工法により、敷地の約 4 分の 3 部分において耐圧盤底面から深さ 7 m 程度の深度まで地盤改良が行われた。改良地盤が L 字型であるため、地震時には偏心による地盤のねじれが生じる可能性が考えられる。

## 3. 高密度観測システム

図 1 に上部建物における加速度計の配置を示す。加速度計は中央部においては 5 階、1 階、基礎に 3 成分、擁壁の面外変形の把握を目的とし、西側の擁壁に ew 方向、ねじれ成分の抽出を目的として 5 階、1 階、基礎の東端に ns 方向、ロッキング成分の抽出を目的として 1 階、基礎の北端および東端に ud 方向設置している。地盤記録としては隣接する中央診療棟の強震観測システムのデータを扱う。

図 2 に免震層の平面図に併せ、地盤改良の施工範囲と土圧計・変位計・SOFO 等の配置を示す。図 3 により詳細な配置状況を示す。変位計は免震層において予想される直動転がり支承(以下 CLB)と積層ゴム支承(以下 LRB)のクリープ変形の不均一性による荷重分担性状への影響を把握するため、建物の北西部と中央部の免震装置において、LRB と CLB に鉛直方向 4 点(四隅)、水平方向 2 点(NS,EW)設

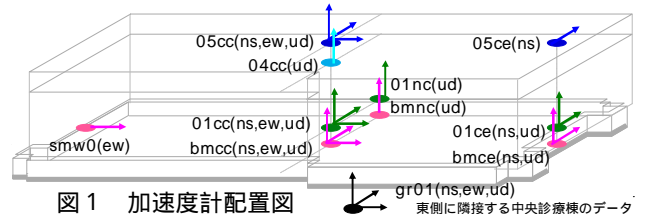


図 1 加速度計配置図

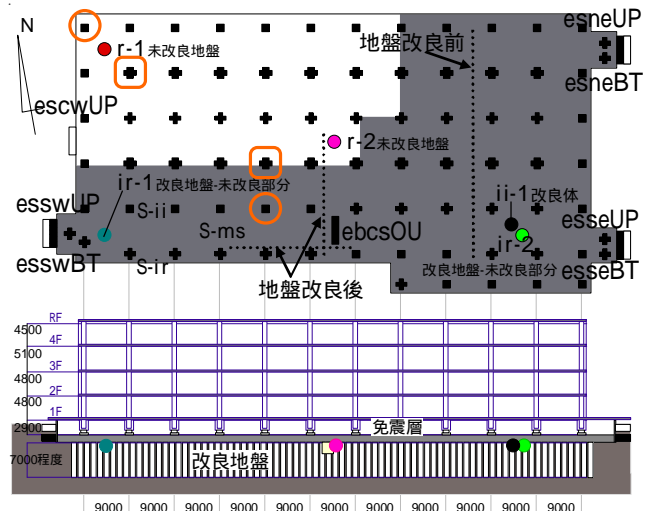


図 2 土圧計とSOFOおよび鉛直変位計の設置位置図

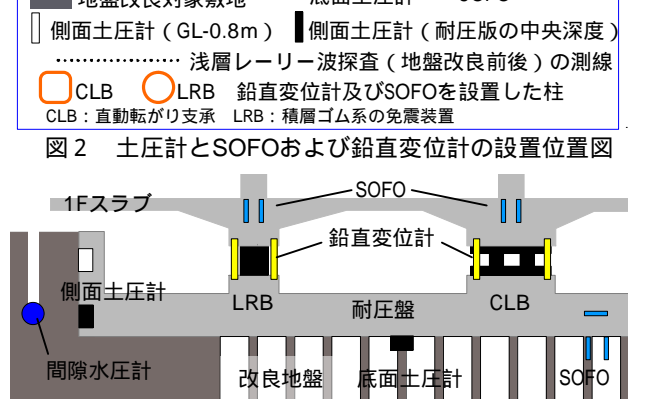


図 3 土圧計、SOFO及び鉛直変位計の詳細位置図

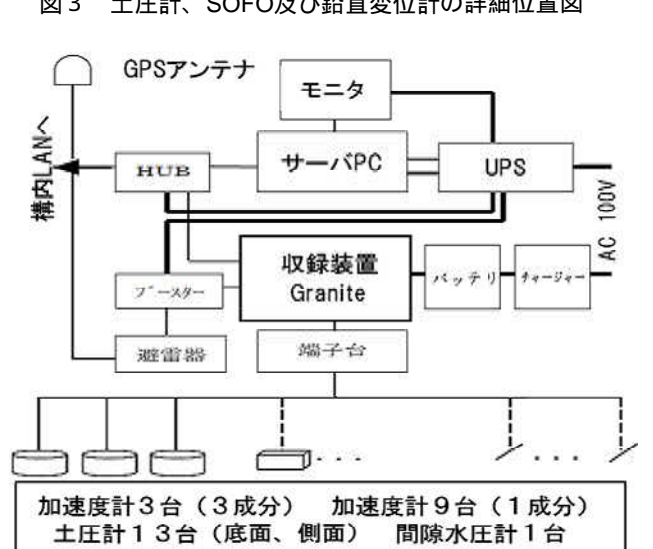


図 4 観測システムの概要

置し、免震装置における変位を測定している。SOFO に関しても変位計と同様の目的で、変位計を設置した免震装置の直上の1階スラブ内に2つずつ設置し、コンクリート内部の軸変形を測定している。また、SOFO センサーは温度による影響を大きく受けることから<sup>(1)</sup>、分析の際に線膨張係数を求め、補正できるように、同位置に熱電対を設置し、スラブ内の温度を計測している。

底面土圧は耐圧盤下における、平面的位置および地盤の種類による荷重分担性状への影響を把握することを目的とし、北西部と中央の未改良地盤に2点 (r-1,r-2) 南西部と南東部の改良地盤の未改良部分に2点 (ir-1,ir-2) および南東部の改良地盤の改良体内 (ii-1) に1点、計5点設置した。側面土圧は擁壁の面外変形を見ることを目的とし、西側の擁壁 GL-0.8m の深度(smw0)に設置し、将来的に地震時における免震ピットのねじれを把握することを目的として、南西、北東、南東の同深度 (esswUP、esneUP、esseUP) および耐圧盤の深度 (esswBT、esneBT、esseBT) に設置している。また、建物中央南の耐圧盤下にも、改良地盤内での側面土圧を計測するために設置している (ebcsOU)。

図4に観測システムの概要を示す。各種センサーのデータは同建物内に設置したデータサーバで一括管理され、免震基礎部の加速度計のトリガーに応じて、加速度計と土圧計で同時収録が可能である。これらのデータは学内 LAN を通じて遠隔操作が可能で、さらに現在の振動の様子や過去の地震記録のプレビュー、あるいは土圧や間隙水圧の経時変化を確認できる。

#### 4. 地盤改良の評価

対象敷地においては地盤改良の前後にボーリング調査、標準貫入試験、PS 検層の他に凍結サンプリングや、筆者らによる浅層レーリー波探査<sup>(2)</sup>による表層地盤のせん断波速度の推定等詳細な調査が行われた。図5に地盤改良前後における浅層レーリー波探査の結果を比較する。改良前には地盤のせん断波速度  $V_s$  は 200m/s 程度であったが、改良後には地盤改良を行った深度まで 300~480m/s に向上している。次に、表1にその他 PS 検層結果や均質化法<sup>(3)-(4)</sup>により推定される  $V_s$  値を示す。同図より、いずれの場合においても改良後に  $V_s$  値が向上しており、地盤改良の効果が確認できる。

#### 5. 施工段階における静的観測結果の分析

図6に施工の進捗状況を2ヶ月毎に示す。2008年2月に地盤改良が完了し、3月下旬に耐圧盤、その後免震層、1階~4階の立上がり工事が一層事に6つの工区単位で順次行われ、10/17には躯体工事が完了した。計測初期には、観測システムは構築段階であり、著者らは当期間、2週間に1度現場で直接データ収集を行った。

図7に底面土圧計 ir-1 と r-2 の記録を示す。2つの記録

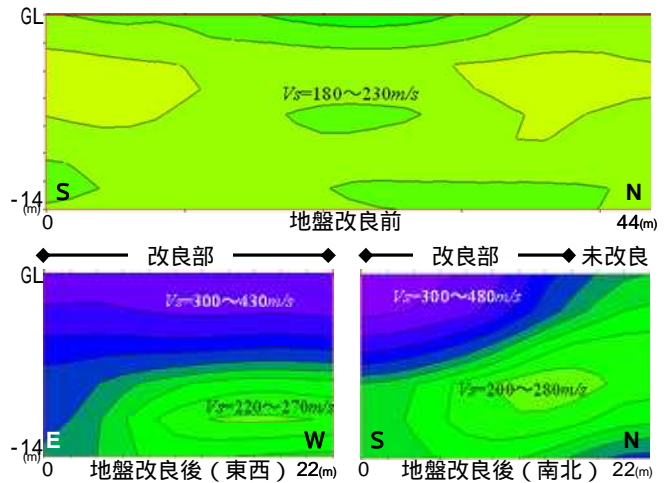


図5 地盤改良前後における浅層レーリー波探査結果

表1 地盤改良前後における地盤のせん断波速度(m/s)

	浅層レーリー波探査	PS検層		均質化法 <sup>(3)</sup>
改良前	180~230	160~210		-
改良後	300~480	改良体	改良地盤全体	338
		800	600	

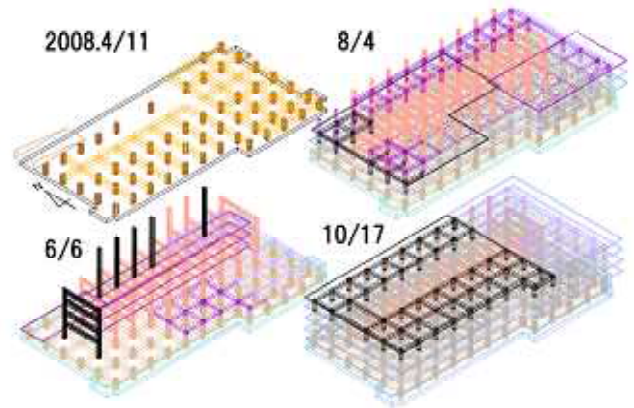


図6 2ヶ月毎の施工進捗段階 (計測は2週間毎)

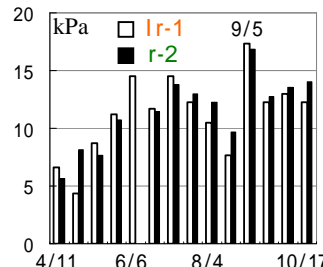


図7 底面土圧記録

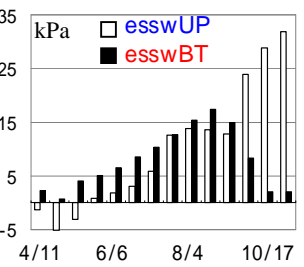


図8 側面土圧記録

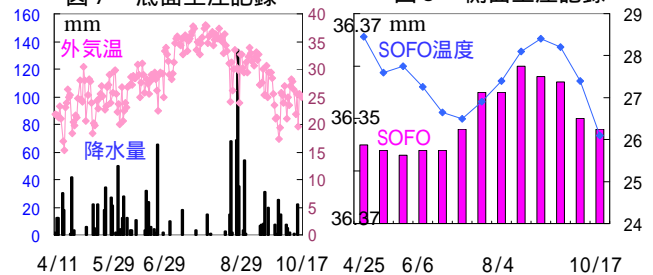


図9 外気温と降水量

図10 SOFO記録(耐圧盤)

はほぼ同じ傾向を示していることから、未改良地盤と改良地盤の未改良部における荷重分担性状はほぼ等しいと考えられる。

また、本来なら、施工の進行に伴う荷重増加のため、底面土圧値は単調増加すると考えられるが、実際には計測値が一時減少もしくは長期間に亘って単調減少している。図9に気象庁HPより得た施工段階における外気温と降水量を示す。8/29に非常に多く雨が降っていることが分かるが、その直後の計測記録(9/5)が著しく土圧値が増えていることがわかる。このことにより、底面土圧記録には降雨が大きく影響している可能性が示唆された。次に、図8に側面土圧計 esswUP と esswBT の記録を示す。esswBT が後半増大しているものの、全体の傾向として8月下旬をピークに減少している。ここで、図10に熱電対による温度記録に併せて耐圧内部に設置した SOFO の記録を示す。側面土圧記録で見られた傾向は SOFO と対応しており、また、図10より SOFO は温度との相関も高いことと考え合わせると耐圧盤の熱膨張により側面土圧計に力が作用していることが考えられる。

#### 6. 高密度静的観測結果の分析

施工段階における結果より底面土圧には降雨の影響が現れる可能性が示唆されたため、竣工後においては、新たに間隙水圧計を設置し、土圧と合わせて1時間毎の高密度観測を行った。図11に2009/5/1~5/14において行った、間隙水圧計と底面土圧計(r-2,ir-1,ii-1)および側面土圧計(esneUP、esneBT、esswUP)の静的観測結果を気象庁HPより得た降水量と外気温と合わせて示す。この期間においては竣工後であるため、上部荷重の変動は無視できる程度と考えられる。

図11より降雨と間隙水圧計、底面土圧計および側面土圧計の相関は明らかである。降雨と共に底面土圧値は急激に上昇し、その後徐々に減少している。ここで前章の図7および図9を見ると、6/29に65mmの雨が降っており、その後底面土圧値が減少している点で図11の傾向に対応しており、降雨が影響していると言える。また、図11より、側面土圧について分析を行うと、esswUPには顕著な土圧増加が見られないことから、降雨の影響は建物の東側に限定され、影響を及ぼす期間も浅部(esneUP)では1日、深部(esneBT)では2日程度と底面土圧計に比べて限定されることが分かる。よって、静的観測結果を見る際には、計

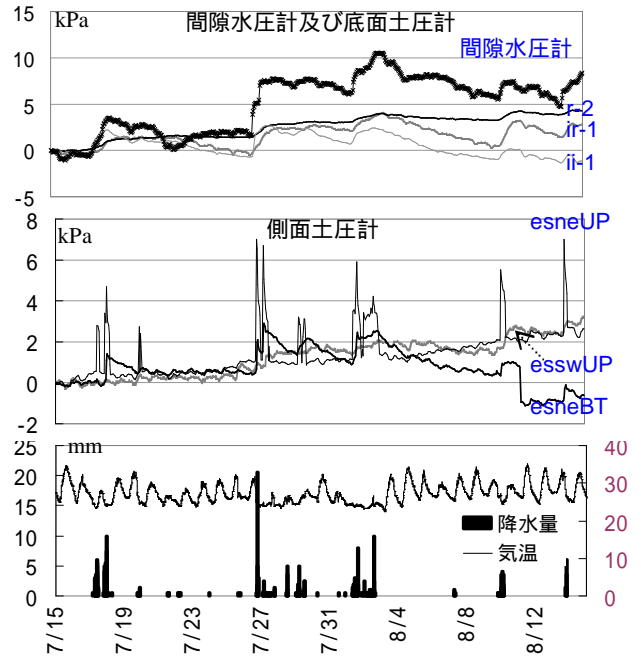


図11 降水量と間隙水圧計及び土圧計記録の関係

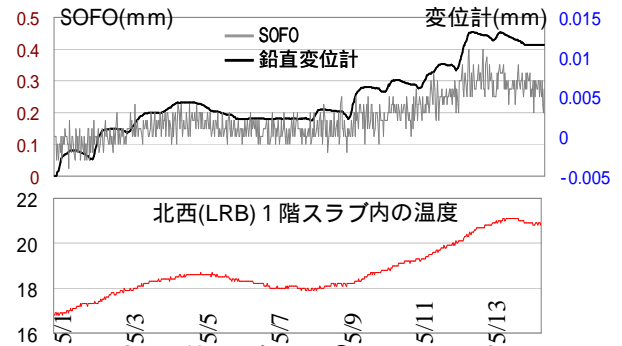


図12 SOFOおよび変位計の温度との相関関係

表2 各地震における免震層の相対変位(短辺方向)

免震層上下の相対変位の最大値(mm)短辺方向		
微動	7/27愛知県西部の地震	8/11駿河湾の地震
0.027	0.12	3.347

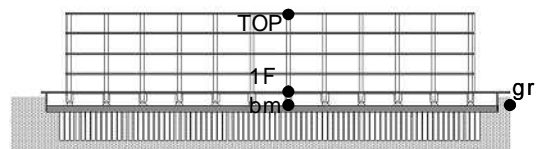


図13 伝達関数を求めるセンサー位置図

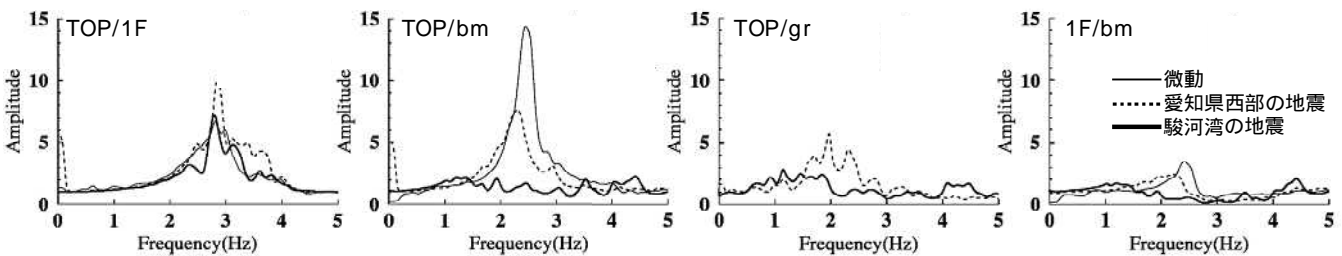


図14 各地震における伝達関数(短辺方向)

測日の前2日の降水量を把握した上で分析を行う必要がある。また、底面土圧、側面土圧ともに、外気温の変動と同様、日変動が見られることから温度変化の影響も受けると考えられるが、降雨と比較して影響は小さい。次に、図12に2009/5/1~5/14における、北西のLRBの位置に設置したSOFOおよび鉛直変位計の計測結果を、同位置の1階スラブ内の温度変動と併せて示す。この結果より、SOFOおよび変位計も温度変化の影響を大きく受けることが分かる。

### 7. 上部構造の振動特性の分析

対象建物においては幾つかの強震データが得られている。この章では、その中でも2009/8/11に発生した駿河湾の地震に着目して分析をする。併せて、2009/7/27に発生した愛知県西部の地震、2009/11/30に得られた微動記録についても分析を行い比較した。地盤の応答加速度は駿河湾の地震において22gal程度、愛知県西部の地震においては10gal程度、微動においては0.2gal程度であった。なお、微動に関しては地盤の記録が得られていない。表2に各地震における免震層上下間の相対変位(NS方向)を示す。また、図14に各地震における伝達関数(NS)を示す。免震層における相対変位が増大するほど免震装置が長周期化する<sup>例え</sup><sup>6)</sup>が、伝達関数を比較することでその影響を評価する。

図14のTOP/1Fを見ると、微動、愛知県西部の地震、駿河湾の地震に共通して、2.9Hz付近にピークが見られ、微動と駿河湾の地震は増幅率が7倍程度であるのに対し、愛知県西部の地震は10倍程度と地震の振幅レベルにより増幅特性に差があることが伺える。次に図の一番右側に示した1F/bmを見ると、微動、愛知県西部の地震、駿河湾の地震の順に卓越周波数が長周期化し、併せて減衰が大きくなり増幅率も大幅に低減されていることから、免震層が歪レベルが大きくなり軟らかくなるほど、そのアイソレータ機能を発現していることが分かる。TOP/bmを見ると、免震層の働きで免震層を含む上部建物の固有周期も長周期化し、増幅率が低減していることが確認できる。EW方向でも同様の傾向が見られた。

### 8. 土圧記録の分析

駿河湾の地震においては動的土圧記録も得られた。図15に側面土圧の記録を示す。地震後に地震前とは異なる土圧値で一定になるという現象が見られたため、その傾向を見やすくするために、応答振幅の小さい波形については

大表示している。図15より、擁壁上部及び南西部のGL-0.8mの深度は地震後に土圧値が地震前より増加した後一定となるが、他の点においては地震前よりも減少した後一定となっており、場所によって傾向が異なり、地盤が複雑な動きをしていることが考えられる。土圧値が大きくなるということは地盤が地震によって締め固まったか、擁壁にもたれかかるようになった状態になったと考えられ、また土圧値が小さくなるということは地盤が地震動によって緩んでいる可能性が考えられる。

### 9. まとめ

本論では、中層免震建物を研究対象として、地盤改良の評価、施工に伴う静的観測、竣工後の長期静的観測、強震観測を行ってきた。このように、これほど多種類の計測手法や計測機器を用い、長期間に亘る観測を行っている例はほとんどない。故に、既往の研究には見られない現象を示す記録が数多く得られ、その現象を引き起こすメカニズムについて仮説をたて、それを立証するために、他の計測機器の結果と比較・分析を行ったり、さらに新しい計測機器を追加したり、計測手法を変えたりと、トライアルアンドエラーを繰り返しながら分析を進めてきた。

一見、不可解な現象も別の計測手法・計測機器を用いることで、もしくは新しい計測手法・計測機器を考え、導入することで解明できる可能性があると言える。本高密度観測システムは、その機能をさらに拡張させていくことで、より詳細な分析が可能であるという点が大きな強みである。

まだ未解明の現象は数多いが、まずはデータの蓄積が大切であると考えられる。本研究においては、高密度観測を通して、改良地盤上に立地する免震建物の振動特性を把握する上で貴重な基礎データを数多く得ることができた。

### 参考文献

- (1) 飛田潤,福和伸夫,西澤崇雄:光ファイバーセンサーによる鋼構造試験体の静的・動的柱軸変形の計測,日本建築学会構造工学論文集,Vol.55B,2009.3
- (2) 林宏一,鈴木晴彦,斉藤秀樹:人工振源を用いた表面波探査の開発とその土木地質調査への適用 地質技術年報(21),9-39,2001
- (3) 石川明,浅香美治,社本康広:均質化法を用いた部分改良地盤の等価S波速度の簡易評価法 日本建築学会構造系論文集 第613号,67-72,2007.3
- (4) 寺田賢二郎,菊池昇:均質化入門,丸善出版,2003
- (5) 岡田敬一,斉藤知生:構造モニタリングシステムを導入した免震建物の長期観測による振動特性の評価 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州),75-76,2007.8

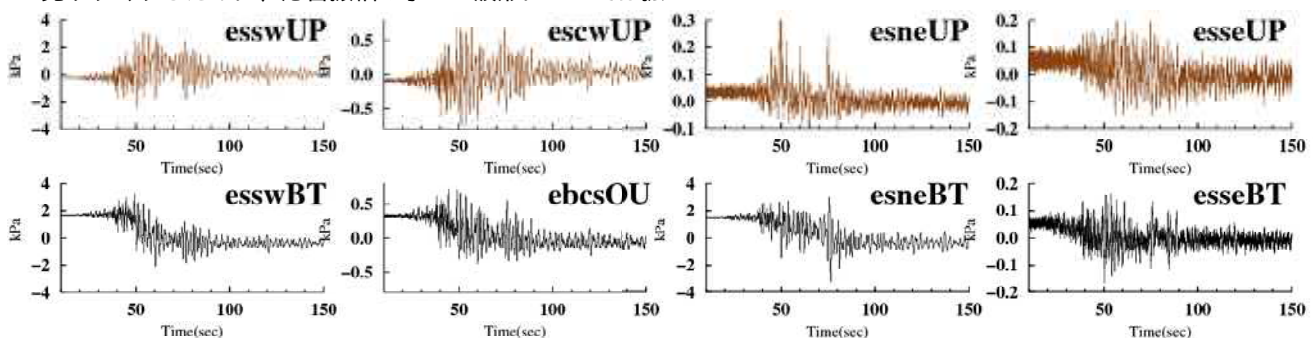


図15 駿河湾の地震における側面土圧記録