

# (14) 液状化した地盤の地震時挙動に関する検討

飛島建設(株)  
同上  
同上

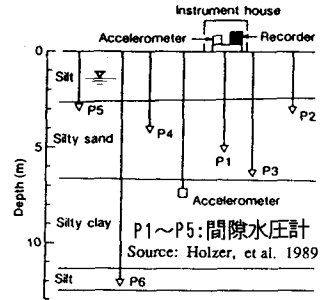
○森 伸一郎  
三輪 滋  
関 宝琪

## 1. はじめに

筆者らは、これまで液状化した地盤の地震時挙動に関する実験的研究<sup>1) 2)</sup>や表層地盤の地震時の非線形増幅特性に及ぼす過剰間隙水圧(液状化)の影響に関する解析的検討<sup>3) 4)</sup>を実施してきた。ここでは、実際に液状化した地盤の地震時の挙動を、特に地中と地表の相対変位や表層のせん断変形という観点から、地震観測記録の分析に基づいて検討した。

## 2. 実際に液状化した地盤と地震動観測記録

**2.1 地震観測地点と観測計器<sup>5) 6)</sup>** アメリカ・カリフォルニア州のワイルドライフ(Wildlife)では1982年から加速度計と間隙水圧計を設置して液状化アレー観測が実施されている。ワイルドライフは、インペリアル・バレー



Imperial Valley)内にあり、エルセントロの北36Kmに位置する。観測地点は 図-1 ワイルドライフ液状化アレー観測地の地層構成と計器の設置位置の地層構成は、上から粘土分の多いシルト層、シルト質細砂層、シルト質粘土層、硬質シルト層となり、これらはほぼ成層構造を成している。このサイトでは、1930、1950、1957年の地震の液状化の痕跡に加えて、1981年のWestmorland 地震(Mw=5.9)の際に亀裂と噴砂が発生していることから、液状化アレー観測地として選定された。その際の液状化層と考えられるGL-2.5mからGL-6.7mの比較的緩いシルト質細砂層に、間隙水圧計が5台設置されている。また、加速度計は地表と液状化層の下層内GL-7.5m に設置されている。地層構成と計器の設置位置を図-1に示す。

**2.2 地震観測記録と周辺地盤の被害状況** 1987年11月23日にMs=6.2の地震(Elmore Ranch地震:地震1と呼ぶ)、翌24日にMs=6.6の地震(Superstition Hills地震:地震2と呼ぶ)が発生し、ここで地震動記録が得られた。地表面最大加速度は、地震1では、 $125\text{cm/s}^2$ を記録したが、間隙水圧の上昇はなかった。一方、地震2では、 $201\text{cm/s}^2$ を記録し、間隙水圧が初期有効土被り圧に達した。<sup>5)</sup> また、周辺地盤ではいくつもの噴砂や亀裂が発生し、川の方に向かって北東〜北北東に最大23cmに達する地盤の側方移動が発生した。<sup>6)</sup> すなわち、計器観測記録と目視観察の両方から液状化したことが確認された貴重な事例である。

## 2.3 観測時刻歴の考察

図-2に地震2の地中と地表の加速度と過剰間隙水圧比(P5)の時刻歴を、図-3に地震1の加速度時刻歴を示す。地震2の地表の加速度は2成分とも13.6秒で最大値を記録し、NS成分では $201\text{cm/s}^2$ に達している。その時刻から間隙水圧が上昇し、初期有効土被り圧に達しており、液状化に到ったことが理解できる。加速度波形は長周期化するとともに、20秒〜50秒の間ではスパイク状の波形が見られる。この様なスパイク状の波形は、液状化に関する振動台実験の模型地盤上の加速度波形<sup>7)</sup>や1993

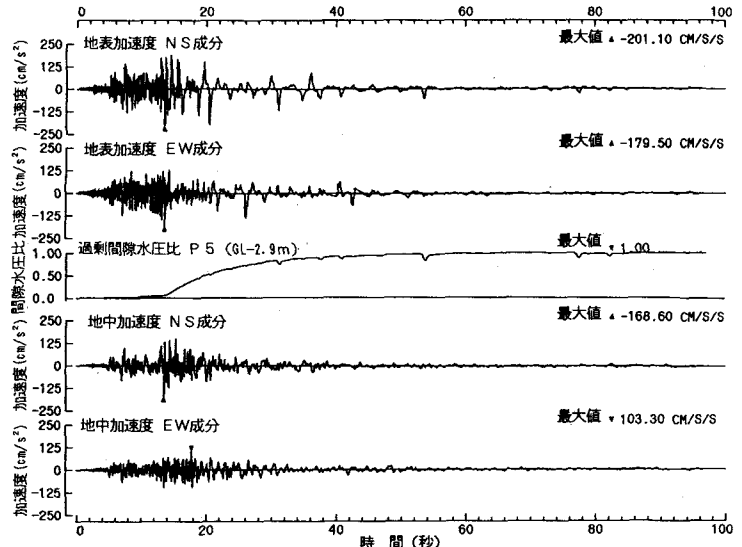


図-2 地震2の地中と地表の水平加速度と過剰間隙水圧比(P5)の時刻歴

年釧路沖地震の際に記録された釧路西港の地盤上の加速度波形<sup>9)</sup>にも見られ、密な砂や細粒分の多い砂のサイクリックモビリティ現象として理解されると考えられる。

### 3. 観測計器と記録の吟味と記録の検討方法

#### 3.1 間隙水圧記録の吟味

Hushmandら<sup>9)</sup>は、現場での低速度のキャリブレーション試験を行い、間隙水圧計の内P5 (GL-2.9m) の1台のみが正常に反応したことで間隙水圧計内の空気泡の存在による緩やかな応答の可能性を指摘している。筆者らも一次元有効応力解析により地震応答解析を行ったが<sup>10)</sup>、解析で得られた間隙水圧の応答に比べて、観測結果の応答は上昇の速度が緩やかであった。そこで間隙水圧記録に関しては議論しない。

**3.2 加速度記録の長周期成分の信頼性** Brady<sup>11)</sup>らは短周期成分については50Hzまで、長周期成分については、地震1では2秒まで、地震2では4秒までが確実に信頼できるとしている。ここでは、独自の検討の結果、地震1では3秒まで、地震2では5秒までを検討対象とした。

**3.3 地中の加速度計の埋設方位** 地中に埋設された地震計については、方位がずれている場合が多いことが佐藤ら<sup>12)</sup>によって指摘され、その後、同様な事例が多数報告されている。<sup>13) 14)</sup> 地表と地中の変位の軌跡の比較検討した結果、地中の水平方向の加速度計の向きが地表に比べて、約10度時計回りの方向にずれていると考えられる。しかし、ここではことわりのないかぎりずれは補正していない。

**3.4 変位の計算方法** ここでは残留(永久)変位を検討対象としていないため、変位の計算は、加速度記録の周波数領域での積分により行った。USGSから入手した未補正加速度記録の初めの部分には、ほとんどドリフトがないため、ドリフト補正は行わない。これに後続のゼロを追加した約328秒(65536個)の加速度時刻歴を基とし、FFTを施し、Ormsby型(台形)のバンドパスフィルター(BPF)を濾過させ、積分により絶対速度・絶対変位を求め、逆FFTにより得られたそれらの時刻歴から97秒間を抽出した。最終的に用いたBPFの周波数は、地震1には(0.25, 0.30, 25, 30)、地震2には(0.15, 0.20, 25, 30)である。ただし、地震2の液状化前の検討には(0.8, 1.0, 25, 30)も用いた。

### 4. 液状化した地盤の挙動に関する考察

#### 4.1 応答スペクトル

図-4に地震1および地震2の前半(0~13秒)と後半(13~97秒)の地表と地中のNS成分の減衰5%の応答スペクトルを示す。計算には未補正加速度記録を用いた。前半と後半は過剰間隙水圧上昇開始の前と後であり、

それぞれおおよそ液状化前と液状化中後と捉える。地震1と地震2の前半では、0.3秒の表層の卓越周期を中心とする短周期領域で増幅が見られ、2秒以上の長周期領域では増幅がほとんどなく、それ以下の周期帯では増幅のみならずスペクトルそのものも類似している。一方、地震2の後半では、0.3秒以下の周期領域では増幅が小さいのに対し、1秒~4秒の長周期領域にまで有意な増幅が見られるのが特徴的である。全時間の応答スペクトルは、1.4秒以下の周期帯では13秒から20秒までの間に、1.4秒から4.0秒までの周期帯では20秒以降に決まっている。なお、このような長周期領域での増幅は解析では再現が難しい。<sup>15)</sup>

**4.2 地表と地中の変位と相対変位** 図-5に地震1の、図-6に地震2の地表と地中の水平変位の時刻歴を重ねて示すとともに相対変位(地表-地中)の時刻歴を示す。地震1では、地表の変位は全時間帯にわたり地中の変位とはほぼ合致しており、表層7.5m間の相対変位は地表変位の約1/10であり、ほとんど地表の水平変位に寄

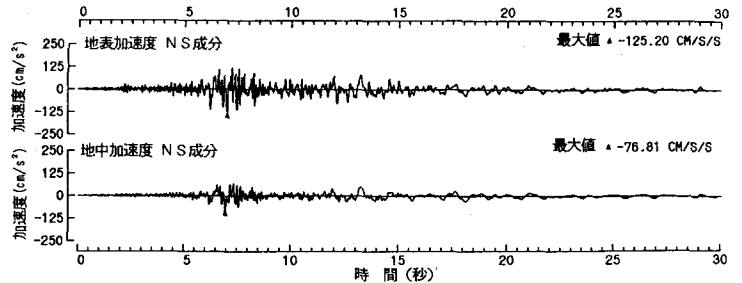


図-3 地震1の地中と地表の加速度時刻歴(NS成分)

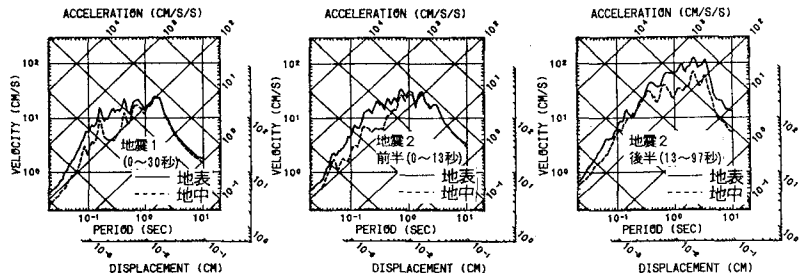


図-4 地表と地中のNS成分の加速度応答スペクトル

与していないことがわかる。地震2においては、地表加速度が最大となる13.6秒以前では、地表と地中の変位はほぼ一致しているが、それ以後は地表は地中と異なる変位挙動を示している。

(1) 液状化前 13.6秒以前では、1秒以上の周期に増幅が見られないので、前述の1秒以上の周期成分をBPFカットした変位波形を

図-7に示すが、4.5秒より直達S波と思われる変位が現れるが、13秒付近から離れ始めた地表の変位は、13.6秒を境として地中の変位から大きく離れているのが明瞭に認識できる。このことは、相対変位時刻歴でも明瞭であり、13.6秒から急激に生じ始めるのがわかる。図-7の相対変位を地震計間距離7.5mで除して求められる平均せん断ひずみは、13秒以前では7~8秒に現れる $4 \times 10^{-4}$ を最大とする $10^{-4}$ オーダーのひずみを繰返し受けているが、13.6秒の最大加速度の直後に $2.3 \times 10^{-3}$ という1オーダー大きいひずみを受ける。しかし、このひずみ振幅の変化に伴う剛性低下は1/2程度であり、急激なひずみ発生 の主要因とは考えにくい。図-2に示した過剰間隙水圧は地表加速度が最大値を示す13.6秒から有意な上昇をし始めているが、実際には記録以上に急激な上昇をしたと考えられる。その急激な間隙水圧の上昇のために、有効拘束圧が急激に低下し、急激な剛性低下が誘発されたことが、急激なひずみ発生 の主要因と考えられる。

(2) 液状化後 13.6秒から35秒までは、地中の変位振幅はほぼ一定であり、35秒から60秒にかけて緩やかに減衰している。それに対して、地表の変位は13.6秒から20秒にかけて大きくなるが、20秒から28秒の間は小さくなり、28秒から35秒にかけて再び大きくなり、35秒から60秒にかけて概ね減衰している。13.6~20秒間は相対変位

は急激に成長しているが、地表は地中に比べて位相遅れが生じ、それが徐々に大きくなって20秒付近では約70度に達していることから、共振状態へ移行しようとしているためであることがわかる。また、20~28秒間についても、相対変位は成長しており、同じく共振状態への移行で説明できる。35~60秒間では、相対変位も減衰しているものの、地中に対する地表の位相遅れは70度以上であり、ほぼ共振状態であると考えられることから、これらの波形の減衰は入力に相当する地中の波形の減衰で説明できる。

#### 4.3 水平面内の2次元挙動

図-8に地震2の各時間帯の変位軌跡を示す。図には、地中の軌跡を時計回りに10度ずらしたものを示している。間隙水圧に反応がない0~6秒間と6~13秒間では、地中と地表の軌跡がおおむね一致することがわかる。13~20秒間はNS方向に振動が卓越しており、液状化による相対変位に起因する増幅された地表の軌跡も位相遅れを伴いながらNS方向に振動が卓越していることが明瞭である。20~30秒間では、地中の変位の方向転換が比較的滑らかであるのに対して、地表は大振幅のところでは方向転換が鋭いことがわかる。これは変位の小さいところでは速度が大きく、変位の大きいところでは反対向きに大きな加速度、言い換えれば大きな抵抗が作用していると推測される。即ち、サイクリックモビリティ現象の発現であると言える。

#### 4.4 液状化層の応力ひずみ関係

ここでは、縦軸に地表の加速度に負号を付けたもの、横軸に相対変位を採り、液状化層のせん断応力ひずみ関係を考察する。また、振幅の大きいNS成分に注目するが、地中の方位の

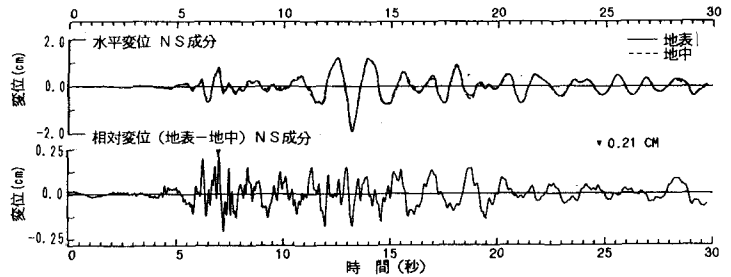


図-5 地震1の地表と地中の水平変位と相対変位(地表-地中)の時刻歴

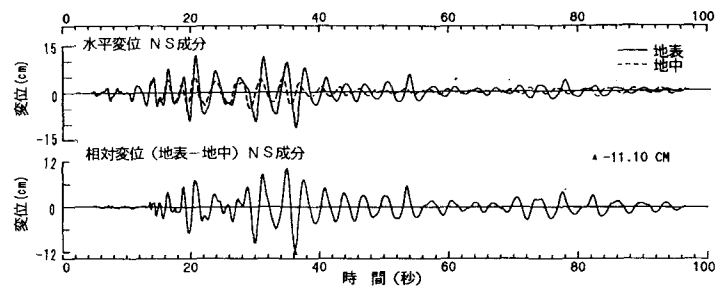


図-6 地震2の地表と地中の水平変位と相対変位(地表-地中)の時刻歴

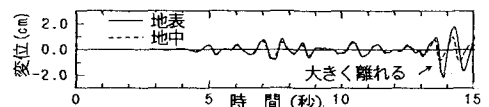


図-7 地震2の地表と地中の水平変位  
[(0.8, 1.0, 25, 30)のBPF濾過]

補正は考えていない。図-9に(-地表加速度)と相対変位の関係を示す。地震2の0~40秒間と20~30秒間に加えて、地震1の0~30秒間についても示した。地震2の13秒以前は、地震1と同様に傾き(剛性)に顕著な変化はなくほぼ線形挙動しているが、13秒以降傾きが小さくなり、13.6秒では初期の数10分の1にまで、20秒以降は数100分の1にまで割線勾配が低下している。最も傾きが小さい部分はほぼ傾きはゼロであり、20秒以降は、完全に液化化した状態にあると言える。20~30秒間に注目すると、図-8で20~21秒で生じる北側への最大の変位や相対変位に相当する時点では、図-9では急激に剛性が回復するサイクリックモビリティ現象として現れている。液化化した地盤の挙動と土の応力ひずみ関係の両面で、この現象が確認されたのは初めてのことである。

### 5. 結論

野外観察と計器観測の両方から液化化したことが確認された、ワイルドライフの液化化アレーの加速度の観測記録の解析を行い、次の結論を得た。

- (1) 液化化した地盤の地表の応答スペクトルは、1.4秒以下の短周期領域では、最大加速度を示す液化化開始時から完全液化化に至る過程で、1.4~4.0秒までのやや長周期領域では、完全液化化状態の過程で決定される。
- (2) 地表の加速度が $201\text{cm/s}^2$ に達した13.6秒の直後に、急激な相対変位が発生する。また、その急激な相対変位は、急激な間隙水圧上昇に起因する有効拘束圧の低下による剛性低下が主要因である。
- (3) 液化化した表層地盤は共振状態にあり、液化化した地盤の地表の変位や相対変位の成長と減衰は入力される地震動と液化化した地盤の残留せん断剛性が支配している。
- (4) 液化化した地盤の挙動と土の応力ひずみ関係の両面で、実地盤におけるサイクリックモビリティ現象が初めて確認された。

液化化した地盤の挙動を考える際には、間隙水圧の上昇による剛性低下とサイクリックモビリティ現象の評価が重要であることが、アレー観測記録の解析に基づき、実現象の面から指摘できた。今後は、埋設方位の詳細検討を行い、応力ひずみの正確な挙動や相対変位軌跡の検討による主応力軸の回転等を検討したい。

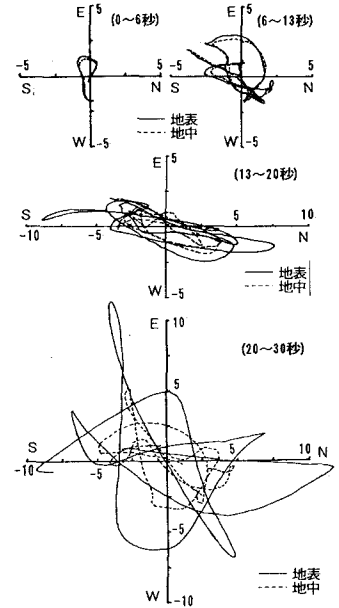
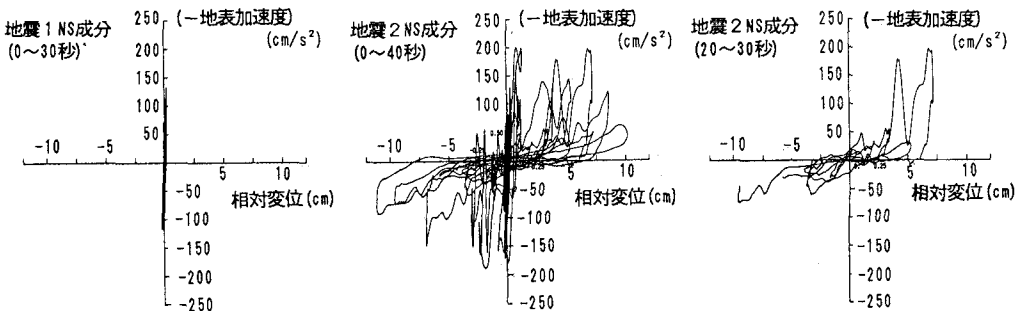


図-8 地震2の地表と地中の水平面内の変位軌跡



参考文献 図-9 (-地表加速度)と相対変位の関係 (せん断応力・せん断ひずみ関係に相当)

- 1) 森伸一郎, 池田隆明: 緩い飽和砂地盤における過剰間隙水圧の応答に対する実験と解析の比較(その2), 第26回土質工学研究発表会講演集, 1991.7., pp. 957-960
- 2) S. Mori, T. Ikeda, Y. Takimoto, M. Muto, T. Takayuki: Influence of Soil Liquefaction on Dynamic Response of Structure on Pile Foundation, Proc. 10WCCE, 1992.7., 1777-1780
- 3) 森伸一郎, 三輪滋: 地盤の非線形挙動特性に及ぼす間隙水圧の影響, 第21回地震工学研究発表会講演集, 1991.7., pp. 93-96
- 4) 三輪滋, 森伸一郎: 地盤の地震動増幅特性に及ぼす間隙水圧の影響(その1)~(その4), 日本建築学会大会学術講演集, 1991.7., pp. 473-478, 1992.8., pp. 483-484
- 5) T. H. Bolzer, T. L. Youd, T. C. Hanks: Dynamics of Liquefaction During the 1987 Superstition Hills, California, Earthquake, Science, Vol. 244, 1989.4., pp. 1987-1991
- 6) R. Dobry, M. H. Baziar, T. D. O'Rourke, B. L. Both, T. L. Youd: Liquefaction and Ground Failure in the Imperial Valley, Southern California During the 1979, 1981 and 1987 Earthquakes, Case Studies of Liquefaction and Lifeline Performance During Past Earthquakes, Vol. 2, Tech. Rep. NCEER-92-0002, 1992.2.17, pp. 4-1-pp. 4-85
- 7) 森伸一郎, 滝本幸夫, 武藤正人, 戸早孝幸, 池田隆明: 地盤一構造物連成系に対する有効応力液化化解析の適用性, 第8回日本地震工学シンポジウム論文集, 1990.12., pp. 801-806
- 8) 井合達: 1993年南海沖地震-港湾地盤液状化観測結果-, JSEEP NEWS, No. 128, 1993.1. pp. 48-51
- 9) B. Hushmand, E. F. Scott, C. B. Crouse: In-place calibration of USGS pore pressure transducers at Wildlife Liquefaction Site, California, USA, Proc. 10WCCE, pp. 1263-1268, 1992.7.
- 10) 三輪滋, 森伸一郎: ワイルドライフの地震動記録の有効応力解析法による検討, 第22回地震工学研究発表会講演集, 1993.7., (投稿中)
- 11) A. G. Brady, P. N. Mork, L. C. Seekins, J. C. Switzer: Processed Strong-Motion Records from The Imperial Wildlife Liquefaction Array, Imperial County, California, Recorded during The Superstition Hills Earthquakes, November 24, 1987, USGS Open File Report 89-87, 1989.1.
- 12) 佐藤暢彦, 片山恒雄: 地中地震計の埋設方位の推定, 第1回地震工学研究発表会講演集, 1989.7., pp. 115-118
- 13) 植竹富一, 真下寛, 天池文男: やや長周期地震動を用いた地中埋設地震計の方位推定, 地震, 第44巻, 第2号, 1991.6., pp. 151-154
- 14) 林雅弘, 山本昌士, 中野裕公, 森伸一郎: 地中埋設地震計の方位推定, 日本建築学会大会学術講演集, 1992.8., pp. -
- 15) 三輪滋, 森伸一郎: ワイルドライフの地震動記録を用いた地盤の増幅特性に及ぼす間隙水圧の影響の検討, 第28回土質工学研究発表会講演集, 1993.6., (投稿中)

連絡先: 森伸一郎/飛鳥建設技術本部研究開発部/270-02千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬5472/TEL 0471-98-7553