

# 2000年鳥取県西部地震における 境港市の埋立地の地震応答

森伸一郎<sup>1</sup>・阿部雅弘<sup>2</sup>・服部加奈子<sup>3</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 工博, 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

<sup>2</sup>学生会員 愛媛大学大学院 理工学研究科環境建設工学専攻 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

<sup>3</sup>正会員 株式会社竹中土木 (〒106-0041 東京都中央区銀座8丁目21-1)

2000年10月6日の鳥取県西部地震で重度の液状化が生じた境港市の2つの埋立地の地震応答解析が実施された。埋立地の1つである昭和町にある境港港湾管理事務所では液状化の影響を受けた強震記録が観測された。もう一つの埋立地である竹内団地では、広範囲において全面的に液状化が発生した。昭和町の観測地点から約4.5 km離れた硬い地盤で観測された強震記録を入力地震動として、2地点において等価線形解析と有効応力解析が実施された。昭和町においては解析結果が観測結果と比較され、解析が概ね妥当であることが示された。さらに、竹内団地において地震応答がシミュレートされ、液状化の激しかったことが裏付けられた。

**Key Words:** liquefaction, seismic response analysis, 2000 Western Tottori earthquake, reclaimed land

## 1. はじめに

2000年10月6日に発生した鳥取県西部地震では、境港市において多くの家屋が重大な被害をうけるとともに、多くの埋立地で重度の液状化被害が生じた<sup>1)</sup>。また、家屋の被害分布や液状化地点の分布がアンケート震度調査による震度分布と調和することがわかった<sup>2)</sup>。さらに、境港市における12地点の等価線形地震応答解析によれば、地表の最大応答変位とアンケートによる震度とが正の相関にあることがわかった<sup>3)</sup>。

本研究では、上記の結果を踏まえ液状化地点の地震挙動を把握することを目的に、境港市内の震度が大きく液状化地点である2つの埋立地の地震応答解析を実施した。一つの埋立地では液状化の影響を受けた強震記録が観測された。もう一つの埋立地では、広範囲において全面的に液状化が発生した。近くの硬い地盤で観測された強震記録を入力地震動として、2地点において等価線形解析と有効応力解析を実施した。地震観測された埋立地において解析と観測を比較して妥当性を考察した後、他方の埋立地の地震応答を考察する。

## 2. 解析対象地盤

解析対象地盤は、地震後に強震記録と地盤資料の公開された港湾地震観測地点<sup>4)</sup> (SHWと略す)と、広範囲に

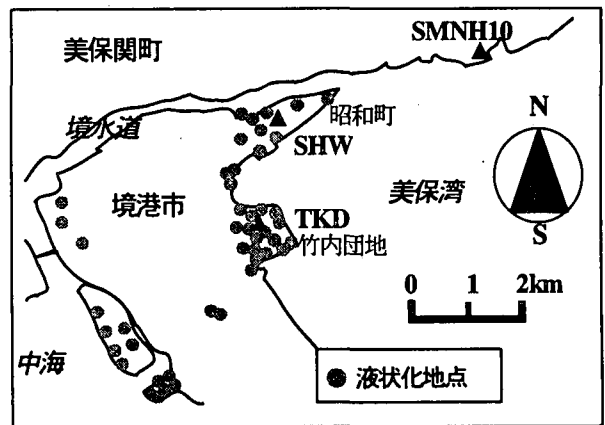


図-1 解析対象地点

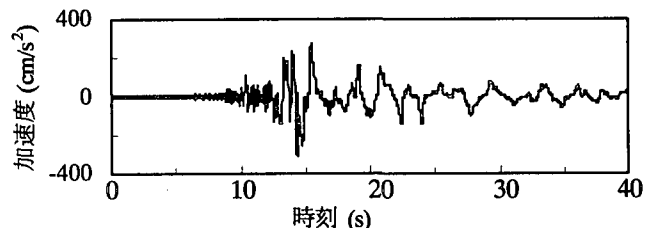


図-2 SHWにおける加速度時刻歴(EW成分)

において液状化が発生した竹内工業団地内の某地点<sup>5)</sup> (TKDと略す)である。図-1に解析対象地点の位置を示す。液状化被害を受けたカニ棧橋の南200mに位置するSHW地点の観測地敷地内では噴砂は見られなかったが、最も近い噴砂は約100m離れた南西、南東、北西に見られた。図-2にSHWで観測された加速度記録(EW

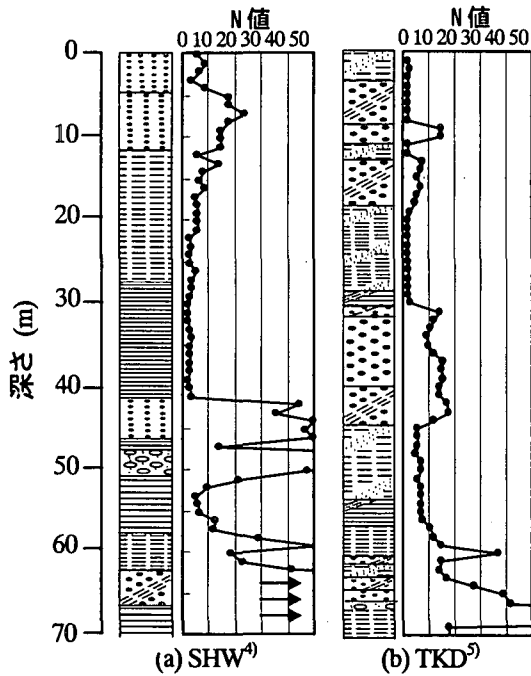


図-3 解析対象地点のボーリング柱状図

成分)を示すが、13秒付近の最大加速度を示した後、振幅の低下、長周期化、スパイク状の波形など液状化の特徴を有していることが指摘できる<sup>9)</sup>。

図-3にSHWとTKDの地点におけるボーリング柱状図を示す。SHW地点では表層4mに緩い砂層、その下にGL-12mまで比較的締まった砂層があり、その下にはN値2~10以下のシルト層およびN値1~4以下の粘土層がGL-41mまで続く。GL-63mでN値50以上が深く深さとなる。TKD地点はGL-9mまでは浚渫埋立土層、それ以深も約30mまでは緩いシルトの卓越した層が続く。GL-67mでN値50以上となる深さが現れる。地震応答解析において地震波を入力する工学的基盤は、SHW地点とTKD地点でそれぞれGL-72mとGL-66.5mとした。

### 3. 解析方法と入力地震動

地震応答解析は、等価線形解析と有効応力解析を実施した。等価線形解析には一次元重複反射理論によるプログラムSHAKE<sup>7)</sup>を用いた。有効応力解析には井合らによるプログラムFLIP<sup>8)</sup>を用いた。

解析で用いた地盤の物性は原則として土質名とN値に基づいて設定した。2つの解析で共通なのは地盤構成(土質、層厚、地下水位)と各層の密度である。解析に必要な土層分割は、10Hzの波長の1/5以下となるように1.4~2.7mとした。せん断剛性については、N値よりVsを求めて、SHAKEでは各層均一値、拘束圧依存のせん断剛性を設定する必要があるFLIPでは土層中央でVsが一致するようにした。せん断剛性と減衰のひずみ依存性は、SHAKEには今津・福武の式<sup>9)</sup>を用いたのに対して、FLIPでは双曲線モデルであるため厳密には同等ではない。双

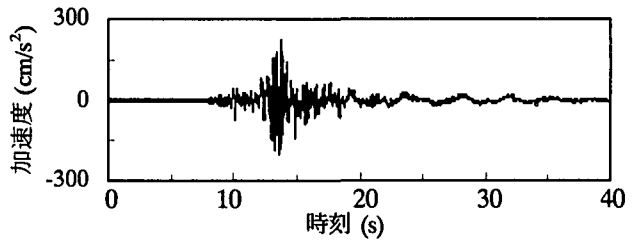


図-4 美保関における加速度時刻歴(地表EW成分)

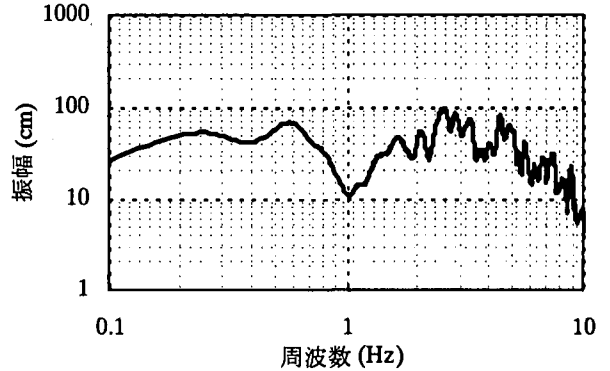


図-5 美保関における加速度フーリエスペクトル

曲線モデルに用いる内部摩擦角はN値に基づき設定した。さらに、FLIPでは液状化特性(過剰間隙水圧の発生特性)を規定するパラメータが6個必要であるが、N値、有効拘束圧、細粒分含有率を介して設定した。紙面の制約から、これらのモデルの詳細は省略する。

解析に用いた入力地震動は、防災科学技術研究所の基盤強震観測網(KiK-net)<sup>10)</sup>により美保関(SMNH10)の地表で観測された加速度記録である。この地点は、境水道を挟みSHW地点の北東約4.5kmに位置する。深さ4mまでVs=500m/sの中砂が堆積し、それ以深は約200mまでVs=960~1570m/sの凝灰岩などの岩の続く堅い地盤である。深さ200mの観測記録もあるが、工学的基盤相当層として最表層と考え、解析には地表での水平2成分のうち卓越したEW成分を使用した。図-4にその加速度時刻歴を示す。主要動部分は短いが、後続の表面波が長く続くのが特徴的である。図-5にフーリエスペクトルを示す。0.6Hz付近と3Hz付近の成分が卓越する波形である。解析には基盤層上面において入射波入力ではなく剛基盤入力として取り扱った。

### 4. 解析結果および考察

#### (1) 昭和町地震観測地点(SHW地点)の解析

図-6に地震観測の行われたSHW地点における最大応答値(加速度、相対変位、せん断ひずみ、過剰間隙水圧比)の深度分布を示す。加速度分布を見ると、等価線形解析ではGL-41~28mの粘土層で最大加速度が特に減少しているのに対して、有効応力解析ではGL-28~12m以浅のシルト層で急激に減少している。これらはせん断ひずみの卓越している深さと相対変位の増加する深さと対応している。等価線形解析での41~28mの粘土層で

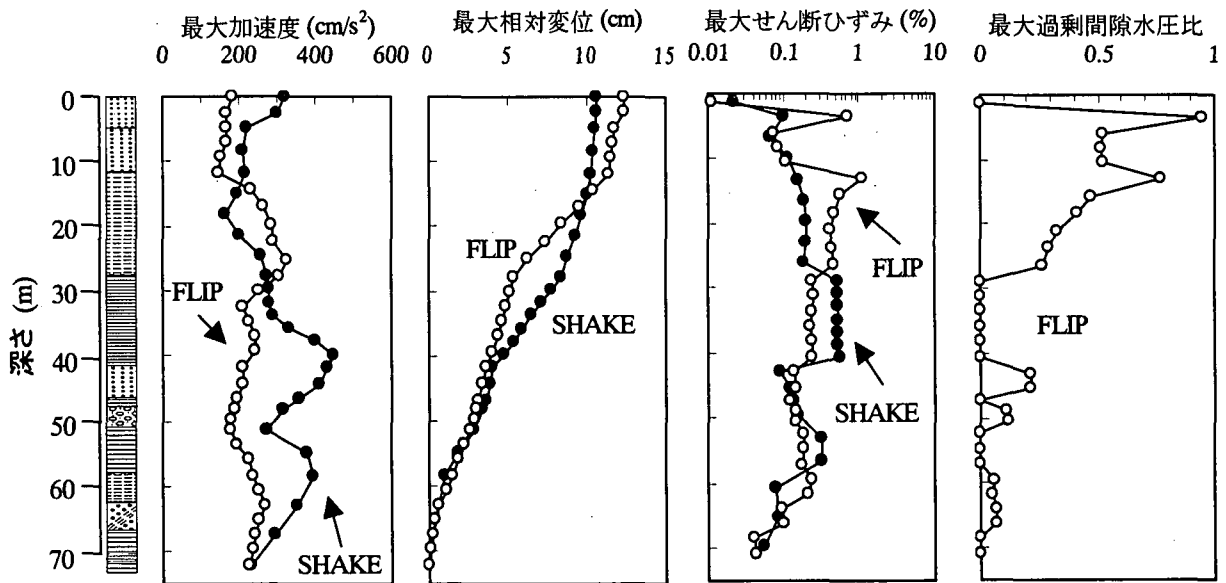


図-6 SHWにおける応答の深度分布

せん断ひずみが卓越するが、一方、有効応力解析では28～12mのシルト層でせん断ひずみが卓越し、それらの大きさはともに0.5～1%程度であり、両解析でメカニズムは異なるものの地表面の相対変位は同程度の大きさである。過剰間隙水圧比の分布から液状化状態であるのは-2m付近のみであるが、-28m以浅で過剰間隙水圧比が0.3以上であり、-12m付近で0.75に達していることがわかる。軽度の液状化状態であると捉えられ、このことがせん断ひずみの発生メカニズムの評価の違いに現れている。

さて、定量的に見ると、地表最大加速度は観測値の302cm/s<sup>2</sup>に比べてFLIPで約180cm/s<sup>2</sup>であり小さいが、SHAKEでは約320cm/s<sup>2</sup>となり同程度である。そこで、地表の応答について詳しく考察する。図-7にSHW地点の地表面の加速度時刻歴を解析と観測を比較して示す。(a)はSHAKEであり、(b)はFLIPである。主要動部分については両者ともに観測記録に比べて最大値が小さいものの全体的な振幅・位相という形状は似ている。SHAKEにおいては主要動部以降や初動部の振幅が観測結果より小さい。これは一定の剛性と減衰を用いる等価線形解析の正確が現れている。一方、有効応力解析では初動部分

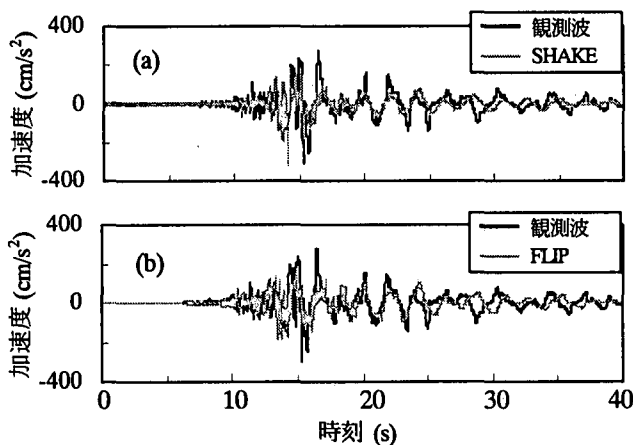


図-7 SHWにおける観測および応答加速度時刻歴

の振幅や主要動部以降の後続の部分の長周期化やスパイク状の応答が観測記録と類似しており、波形は概ね合致していると言える。図-8にこれら時刻歴のフーリエスペクトルを示す。観測波と解析の応答波との違いは、特に1Hzを中心とした0.7～3Hzの成分にあることがわかる。さらにSHAKEでは4Hz以上で振幅が他の2つに比べて小さいことがわかる。以上のことから、美保関の記録を用いた有効応力解析は観測記録を概ね説明できることがわかった。

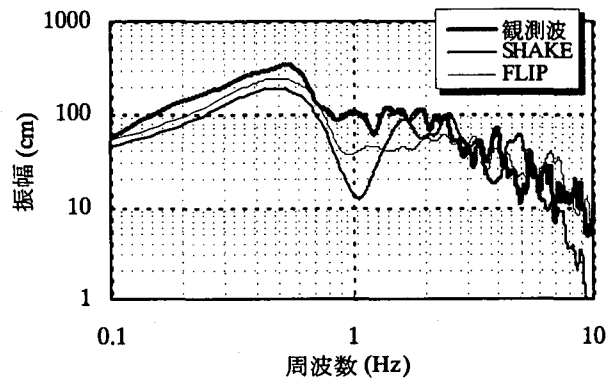


図-8 加速度フーリエスペクトル

## (2) 竹内工業団地地点 (TKD 地点) の解析

次に液状化の激しかった竹内工業団地における結果について考察する。図-9にTKD地点における最大応答値(加速度、相対変位、せん断ひずみ、過剰間隙水圧比)の深度分布を示す。最大加速度については、等価線形解析では35m以浅で急に小さくなるが、有効応力解析では、13m付近で急激に減少するのが特徴的である。最大相対変位は、等価線形解析がほぼ直線的に増加するのに対して、有効応力解析では-30、-18、-13m付近において階段状に増加していることが特徴的である。地表面では等価線形解析の約2.5倍である。階段状に相対変位の増加した深さでは、最大せん断ひずみはいずれも3%を越える

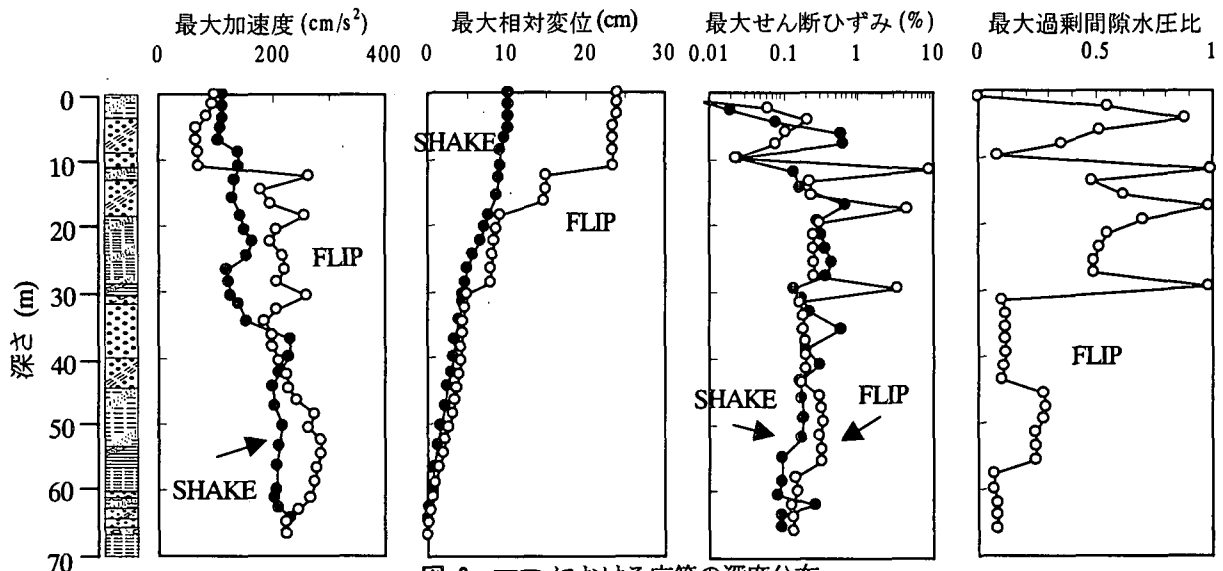


図-9 TKDにおける応答の深度分布

大きくなっており、過剰間隙水圧比が0.95以上の液状化した部分であることがわかる。GL-30m以浅は完全液状化状態の先の3深度を含めていずれも過剰間隙水圧比が0.5以上となっており、GL-30m以浅は液状化状態になったであろうことが推測できる。

最大せん断ひずみ分布を比べると、液状化した部分を除けば2つの解析はほぼ同様であるが、液状化した層厚が厚いと等価線形解析の加速度や変位は、有効応力解析の結果と大きく離れることがわかる。

図-10にTKD地点における地表面の加速度時刻歴を2つの解析を比較して示す。有効応力解析では主要動の最大値部分が到来する前に液状化に達しており、主要動以降は振幅の低減と長周期化が著しく、重度な液状化状態になっている様子がわかる。等価線形解析では主要動に続く後続位相が長周期になっているように見えるが、有効応力解析の結果とは全く異なる。

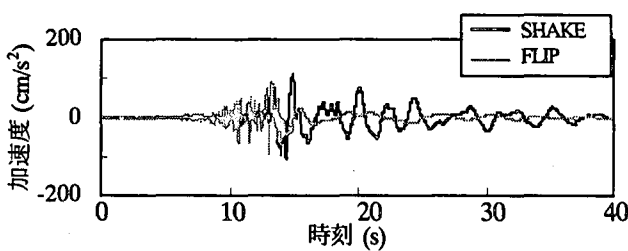


図-10 TKDにおける応答加速度時刻歴

## 5. 結論

境港市の液状化が生じた埋立地を対象に、近くの堅い地盤で観測された地震観測記録を用いて、等価線形解析と有効応力解析を実施して地震応答を考察した。得られた結果は以下の通りである。

- (1)地震観測の行われた昭和町地点については、有効応力解析の結果は観測結果と良く一致した。
- (2)有効応力解析によれば、昭和町地点は-12m以浅で過

- 剰間隙水圧が有意に上昇して、-2m付近で液状化した。
- (3)同じようにしてモデル化された竹内団地地点では、有効応力解析によれば主要動が到達するなり3深度で完全液状化に達し、-30m以浅で液状化状態になったであろうことが推測された。重度な液状化状態が観察された結果と調和した。
- (4)等価線形解析は、軽度の液状化状態であった昭和町では主要動部分は観測結果や有効応力解析と乖離は小さかったが、重度の液状化状態に到った竹内団地地点では乖離は大きく、地表の加速度波形や変位は全く合わなかった。

謝辞：本研究では、科学技術庁防災科学技術研究所 KiK-net のデータ、および港湾技術研究所のデータを使用させて頂きました。関係各位に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 森 伸一郎：X.液状化被害(その3),平成12年鳥取県西部地震災害緊急調査団報告,地盤工学会,pp.78-82,2000.12.
- 2) 森 伸一郎, 圓井 洋介, 盛川 仁：2000年鳥取県西部地震における境港および米子のアンケート震度,第36回地盤工学研究発表会講演集,2001.6.,掲載予定
- 3) 森 伸一郎, 阿部 雅弘, 服部 加奈子：2000年鳥取県西部地震における境港市の地震応答に関する検討,第36回地盤工学研究発表会講演集,2001.6.,掲載予定
- 4) 国土交通省港湾技術研究所：港湾地域強震観測ホームページ, <http://www.phri.go.jp/jishin/index.html>
- 5) (株)ジオトップ：平成12年(2000年)鳥取県西部地震-節杭を用いた建物の調査報告書,80p,2000.12.
- 6) 今津 雅紀,福武 毅芳：砂礫材料の動的変形特性,第21回土質工学研究発表会,pp.509-512,1986
- 7) 防災科学技術研究所：基盤強震観測網(KiK-net)ホームページ, <http://www.kik.bosai.go.jp/kik>
- 8) Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B. SHAKE A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites -, University of California Berkeley, Report NO.EERC 72-12, pp.1-54, 1972.
- 9) 井合 進, 松永 康男, 亀岡 知弘：Strain space plasticity model for cyclic mobility, 港湾技術研究所報告,第29巻,第4号,1990.12.