

# 平成 12 年鳥取県西部地震における境水道大橋周辺地盤の液状化の発生

鹿島技術研究所 ○引田智樹 大保直人 鈴木康嗣  
 日本道路公団試験研究所 稲垣太浩 緒方健治  
 東京電機大学 安田進

## 1. はじめに

2000 年 10 月 6 日の鳥取県西部地震では、米子市、境港市周辺の埋立地で多くの液状化被害が発生した。液状化が発生した境港市では、気象庁境港測候所や港湾空港技術研究所により加速度記録が得られており、それらの地震記録を用いた液状化発生地点の非線形挙動に関する検討が実施されている<sup>1)</sup>。

特に大きな液状化被害を受けた蟹埠頭の西側に位置する当時日本道路公団が管理していた境水道大橋では、地表と地中(GL-65m：工学的基盤相当)で地震記録が得られ、検討結果が報告されている<sup>2)4)</sup>。本報では、この記録を用いて軟弱地盤での地震応答特性を評価し、液状化発生程度を予測することを目的として検討を行った。はじめに観測記録の有効周波数帯域及び地中地震計の方位補正を実施した。次に、地中と地表の地震計が設置されている地点での詳細な地盤調査を実施し、得られた地盤モデルを用いて等価線形解析と有効応力解析を行った。これらの結果から既往の液状化判定、等価線形解析結果を用いた液状化判定を行い、本震時の液状化発生程度について検討した結果を報告する。

## 2. 地震観測の概要と境水道大橋周辺の地震被害

図-1 に、境水道大橋の地震計設置位置の概要を示す。地震計は P4 橋脚天端・下部、地中、地表の計 4 箇所所で圧電式加速度計による 3 成分 (NS 成分(橋軸方向)、EW 成分(橋軸直角方向)、UD 成分) の同時観測が行われていた。地震観測システムは 4 箇所所で独立しており、G1 (地中) で地震を検知すると他の 3 地点の観測システムに起動信号が送られ同時起動するシステムになっている。

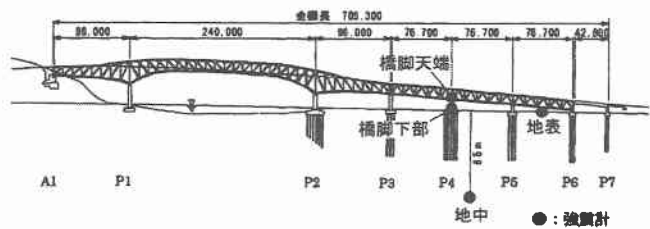


図-1 境水道大橋の地震計設置位置の概要

写真-1 は地中地震計が設置されている P4 橋脚付

近の、橋の横を流れる河川護岸の様子である。P4 橋脚から P3 橋脚にかけて護岸が川側にはらみ出しており、護岸の天端に水平方向のクラックが発生していた。また、橋梁からの排水溝と護岸との間に隙間が発生していた



写真-1 境水道大橋周辺の被害状況

## 3. 観測記録と記録の補正

観測された地震記録は、アナログのカセットテープに記録されているため、これをサンプリング周波数 100Hz でデジタル化した地表の加速度波形と加速度フーリエ振幅スペクトルを図-2、図-3 に示す。地表での最大加速度は  $300.5 \text{ cm/s}^2$  であった。通常、加速度フーリエ振幅スペクトルの低周波数側と高周波数側では振幅が減少していくが、地震動の信号がノイズレベルよりも小さくなると、スペクトルはノイズの振動数特性を表すようになり低周波数側では振動数に反比例する形状を示し、高周波数側ではほぼ平坦な形状に変化する<sup>5)</sup>。図-3 では低周波数側と高周波数側でスペクトルの傾きが平坦に近い性状を示し、この部分は S/N 比が低く地震動の特性を正

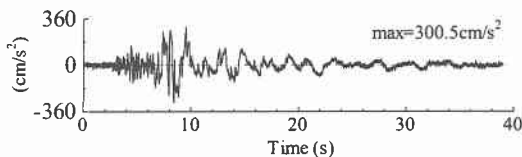


図-2 地表加速度波形(EW 成分)

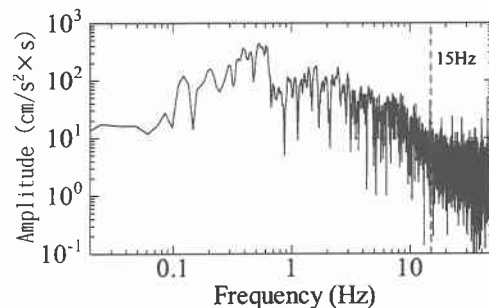


図-3 地表フーリエスペクトル(EW 成分)

キーワード：鳥取県西部地震、地震記録、地盤調査、動的変形特性、液状化強度、全応力、有効応力  
 連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 TEL. 0424-89-7114 FAX. 0424-89-7116

確に表していないと考えられる。

図4には、境水道大橋周辺で観測された最大加速度の大きさを示す。周辺の最大加速度は気象庁境港測候所を除いておよそ  $200\text{cm/s}^2 \sim 400\text{cm/s}^2$  の間に分布しており、ほぼ同程度の値であった。境水道大橋から 200m 程度の距離にある港湾技研境港地点（地表）における加速度波形とフーリエスペクトルを境水道大橋の地表観測記録と比較して図-5、図-6 に示す。加速度波形は波形後半部の長周期成分の特徴がよく一致していることがわかる。フーリエスペクトルを比較すると、水平成分では約 0.15Hz（橋軸方向成分では約 0.2Hz）付近まではほぼ一致しているが、それよりも低周波数では境水道大橋のスペクトルが大きい傾向があり、境水道大橋の記録のノイズレベルが高いためと考えられる。従って、低周波数側の有効帯域を 0.2Hz と設定した。一方、高周波数側については、スペクトルの傾きがほぼ平坦に変化する振動数を 15Hz 付近と判断し、高周波数側の有効帯域を 15Hz に設定することとした。

地中と地表のバンドパスフィルター波形 (0.3~0.4Hz) の水平動粒子軌跡を図-7(左側)に示す。地表観測点位置における 1次元地盤モデルから評価される地盤の 1次卓越振動数は約 0.73Hz であり、それよりも長周期成分では、GL-65m までの地盤の影響は小さいと考えられるので、両者の卓越方向の違いを地中地震計方位の誤差とみなして、地表地震計を基準として粒子軌跡の相関が最も高くなるように方位補正を行った。補正後の粒子軌跡を図-7(右側)に示す。この時の補正角  $\theta$  は約  $-28.7^\circ$  であった。補正後の地中加速度波形（バンドパスフィルター 0.2~15Hz）を図-8 に示す。

#### 4. 地盤調査

##### 4.1 調査概要

地盤調査は、地表および地中の地震計近傍で実施した。地表観測地点では標準貫入試験 (SPT)、サンプリング、PS 検層を行うと共に、3成分コーンにせん断波速度測定を併用したサイスミックコーン貫入試験 (SCPT) <sup>5)</sup> を行った。さらに、サンプリング試料を用いて動的単純せん断試験装置 <sup>7)</sup> により動的変形特性を、繰返し三軸試験装置により液化強度を求めた。地中観測地点では、SCPT のみを行った。

##### 4.2 調査結果

地表観測地点の地盤調査結果を図-9 に示す。図には SPT の N 値、細粒分含有率 FC と共に、SCPT の結果から換算 N 値と換算 FC <sup>8)</sup> を示した。また、ダウンホール法 (DH) による PS 検層から求めたせん断波速度 Vs 分布と共に、SCPT により 50cm 間隔で得られた Vs 分布を示した。なお、深度 48~50m の硬質層にはコーンが貫入できなかったため、MWD 検層 <sup>9)</sup> によって削孔して換算 N 値を求めた。SPT から得られた N 値および FC と

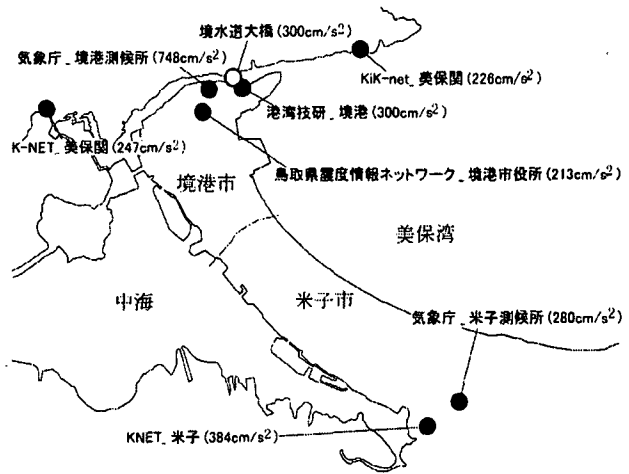


図-4 境水道大橋周辺の最大加速度値

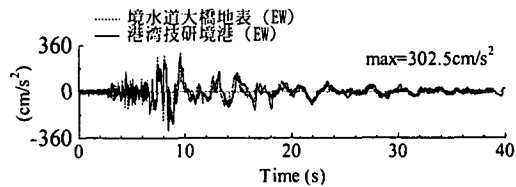


図-5 港湾技研加速度波形との比較(EW成分)

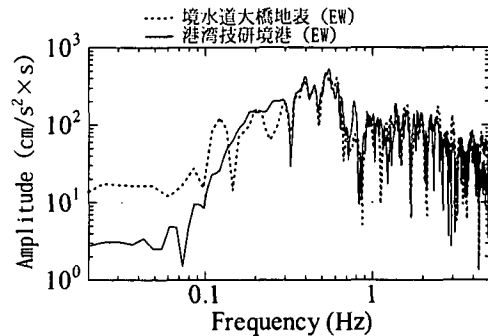


図-6 港湾技研フーリエスペクトル(EW成分)

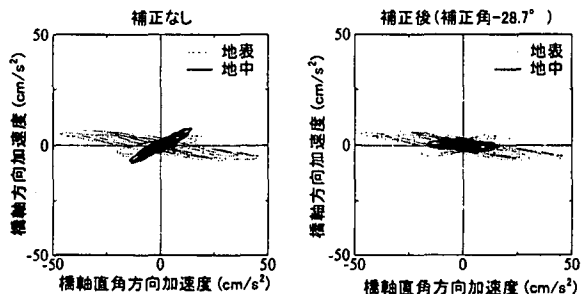


図-7 水平動粒子軌跡(0.3~0.4Hz)

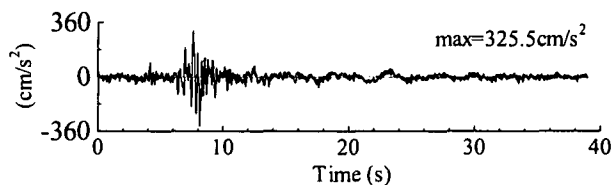


図-8 方位補正後の地中加速度波形(EW成分)

SCPT から求めた換算値は概ね一致しており、SCPT から通常のボーリング調査と同等の結果が得られた。SCPT の結果から両地点の土層構成、N 値および FC は概ね対応しており、ほぼ成層地盤であると判断できる。ダウンホール法および SCPT による地表観測地点の Vs 分布は概ね一致している。

両地点の深度 15mm までの SCPT の結果を拡大して図-10 に示す。深度は明瞭でないが両地点の表層は浚渫で埋め立てられた地盤である。地中観測地点の表層から深度 5~6m 付近までの細砂層の N 値と Vs は表層観測地点に比べ小さい。この N 値が異なっている細砂層が浚渫土の可能性が高い。この細砂層およびその下のシルト質細砂層が、鳥取県西部地震の際に一部軟化して液状化した地層と考えられる。

図-11 に動的変形試験結果を示す。試験番号 (G1~G8) は表-1 に示す非線形特性に対応している。G7 を除けば概ね変形特性は類似の傾向を示している。G7 は平均 N 値が 13.7 の硬質粘性土であり、その他に比べ剛性低下、減衰定数の上昇は小さい傾向が見られる。

図-12 には、液状化強度試験結果を示す。試験番号 (L1~L3) は表-1 に示す液状化特性に対応している。対象土層の FC は、一般的に液状化が発生する地盤の FC に対して比較的大きい値を示しており、繰り返し载荷回数 20 回で繰返し応力振幅比が 0.3~0.5 程度の液状化強度を有している。

### 5. 液状化発生に関する検討

#### 5.1 サイズミックコーン貫入試験結果を用いた液状化評価

地表、地中観測地点で実施したサイズミックコーン貫入試験から推定した換算 N 値と FC を用いて  $FC \leq 35\%$  の砂地盤を対象土層としてレベル 2、タイプ 2 地震動に対する各深度の  $F_L$  値を求めた結果を図-13 に示す。

地中観測地点では、深度 6m~9m の範囲以外では  $F_L$  値が 1 を下回りほとんどの層で液状化発生の可能性がある。一方、地表観測地点では 2m、4m および 6m~9m 区間では  $F_L$  値が 1 を上回る部分がある。この結果から、地震計設置地点での液状化発生程度が異なっている可能性がある。これは、橋梁周辺地盤の地震被害状況からも地中に地震計が設置してある P4 橋脚近傍では被害が見られるが、P6 橋脚近傍では護岸を含め周辺地域に被害が認められないことに対応している可能性がある。

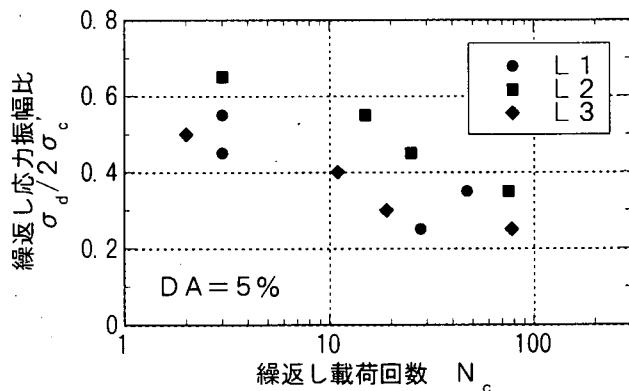


図-12 液状化強度試験

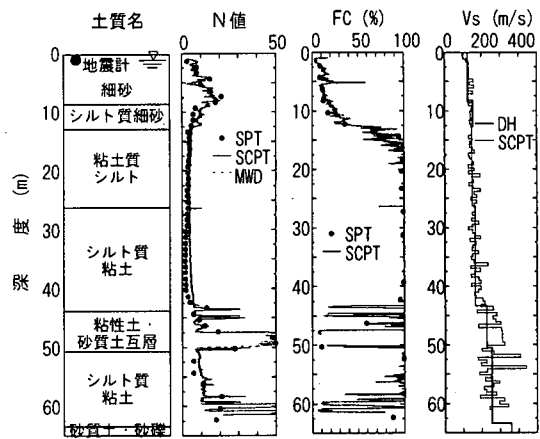


図-9 地表観測地点での地盤調査結果

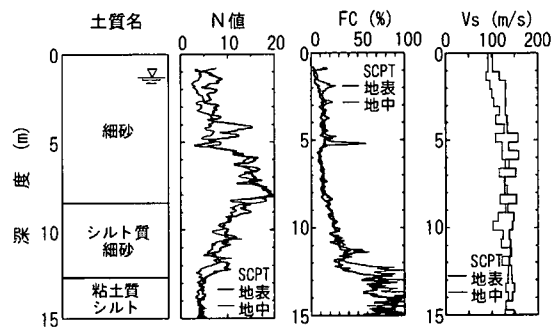


図-10 地表・地中観測地点の地盤調査結果

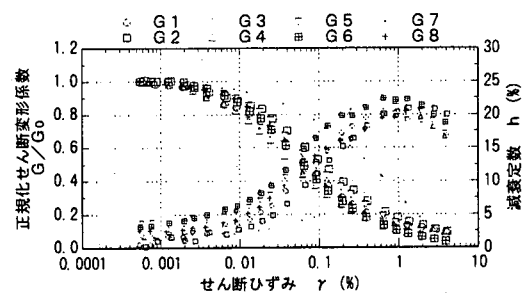


図-11 動的変形試験結果

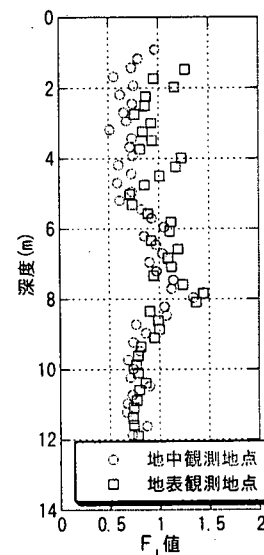


図-13 地表・地中観測地点の  $F_L$  値の比較

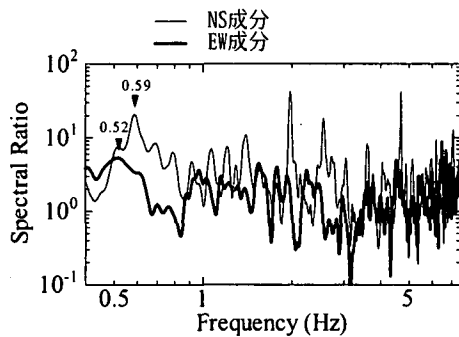


図-14 スペクトル比 (地表/地中)

### 5.2 地中と地表のスペクトル比

境水道大橋近傍の地震時の応答特性を調べるために方位補正した記録の地中と地表のスペクトル比を図-14に示す。NS成分には約0.59Hzにピークが認められる。このピークは地盤モデルから評価される1次卓越振動数(約0.73Hz)と近く、地盤の1次卓越振動数に対応するものと考えられる。EW成分には明瞭なピークが見られないが、0.59Hzよりも若干低い0.52Hz付近に、レベルの小さいピークが見られる。EW成分では、振幅レベルが大きく、NS成分よりも非線形化の影響を強く受けている可能性が考えられる。次節以降で、地盤の応答特性について等価線形解析等を実施して検討を行う。

### 5.3 地盤のモデル化

地表観測地点の地盤構成を基に、地震応答解析(全応力の等価線形解析、有効応力解析)に用いる地盤モデルを表-1のように定めた。地下水位は深度1.2mに設定した。有効応力解析では深度1.2m~12.7mまでの砂質土層を2相系にモデル化した。

### 5.4 地盤応答解析

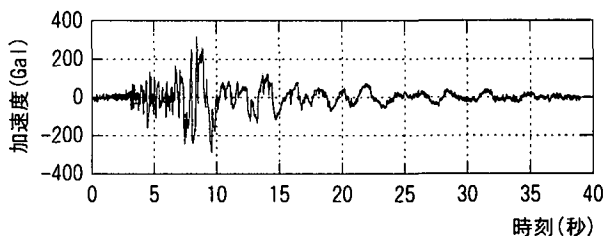
入力地震動は方位補正したEW成分の地中加速度波形を用い、等価線形解析(SHAKE)および有効応力解析(DYNAPLOW)ともにGL-65mの位置に固定条件で入力した。また、解析用地盤モデル、動的変形特性、および液状化強度は、図-11、-12の値をそれぞれ用いている。なお、有効応力解析においては透過振動数を考慮して、液状化対象土層であるGL-1.2m~GL-12.7mの各土層を3分割して解析を行った。

図-15には、地表での観測波形および等価線形解析、有効応力解析で得られた加速度波形を示す。図より、最大加速度値はほぼ一致しているが、等価線形解析結果ではピーク発生前の3~7秒で地盤の剛性低下が発生し、短周期成分が減衰するため比較的周期の長い成分が卓越した波形になっている。このため、ピーク発生前後で観測波形との一致度が悪いが、以降の波形形状は良く似ている。一方、有効応力解析結果

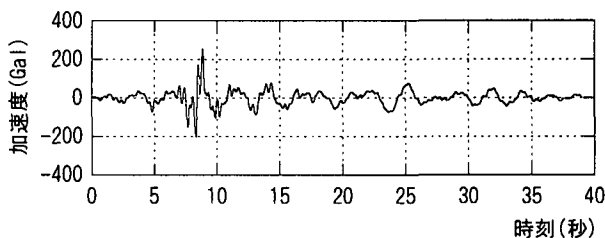
表-1 解析用地盤モデル

深度 (m)	層厚 (m)	土質区分	平均 N値	$\rho_t$	$V_s^*$ (m/s)	$V_p^*$ (m/s)	$\nu^*$	$\sigma_v'$ (kPa)	非線形特性	液状化特性	$FC^{*2}$ (%)
1.20	1.20	細砂	3.0	1.74	120	190	0.168	10.2	G1	—	—
4.50	3.30	細砂	13.6	1.74	120	1440	0.497	32.5	G1	L1	38.9
8.50	4.00	細砂	13.6	1.74	120	1440	0.497	59.0	G2	L2	33.6
12.70	4.20	シルト質細砂	6.0	1.77	150	1440	0.495	90.5	G3	L3	48.3
26.25	13.55	粘土質シルト	3.4	1.77	150	1440	0.495	158.6	G4	—	—
43.35	17.10	シルト質粘土	2.4	1.70	160	1200	0.491	268.5	G5	—	—
50.45	7.10	粘性土・砂質土互層	23.1	1.76	220	2060	0.494	353.7	G6	—	—
63.40	12.95	シルト質粘土	13.7	1.71	250	1560	0.487	425.3	G7	—	—
85.00	1.30	砂質土・砂礫	50.0	1.75	360	460	0.489	475.2	G8	—	—

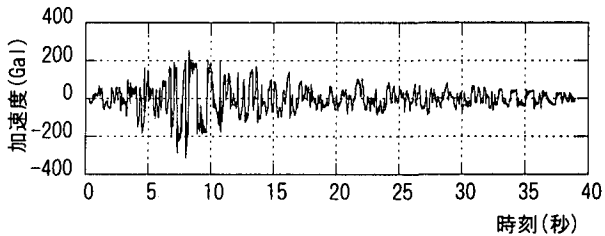
\*1:  $V_s, V_p, \nu$  はダウンホール法の値から設定  
\*2: 液状化強度試験供試体の細粒含有率



(a) 観測結果



(b) 等価線形解析結果



(c) 有効応力解析結果

図-15 応答解析で得られた地表の加速度波形の比較

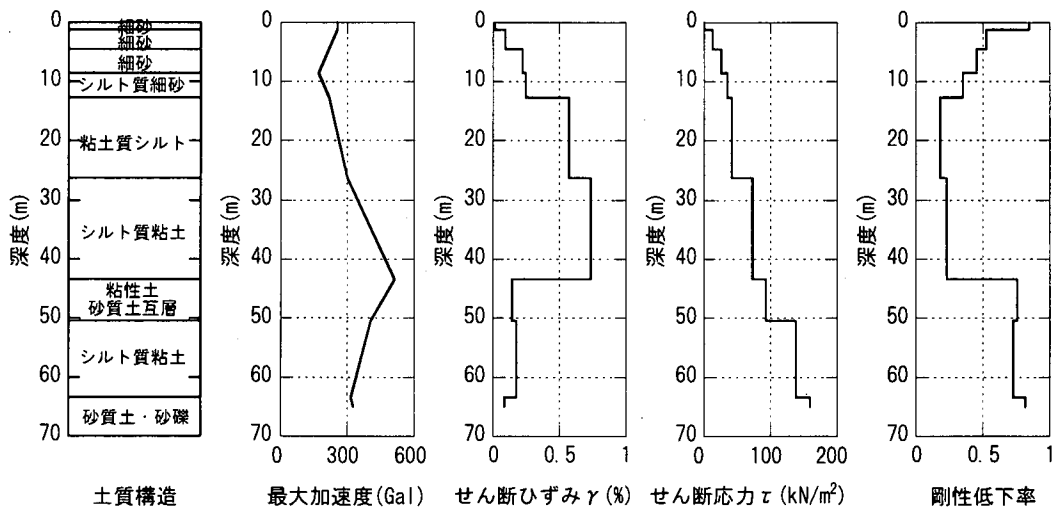


図-16 等価線形解析で得られた結果

は、全時刻歴領域において短周期成分が卓越しているが、後半部分でもその成分は多く残っている。両解析で、最大加速度はほぼ同様な値を示す結果となった。

5.5 動的解析による液状化発生評価

図-16には、土質構造・最大加速度・せん断ひずみ・せん断応力・剛性低下率の深度方向分布をそれぞれ示す。また、この図でGL-12.7~GL-43.5mの粘性土層でせん断ひずみは0.5~0.7%の値を示し、剛性低下率 $G/G_0$ は0.25以下の値になっており、この層で加速度応答が低下する傾向が見られる。

図-17には、液状化対象土層の3深度における過剰間隙水圧比の解析区間20秒までの時刻歴波形を示す。液状化対象土層の過剰間隙水圧比はいずれも概ね0.5以下であり、完全液状化には至っていない。

今回の地震において境水道大橋付近で多くの液状化の発生が認められている。ここでは、各種地盤調査、応答解析結果から地表地震計が設置されている地点での液状化発生について検討した。表-2には、道路橋示方書・同解説に従い、現位置における標準貫入試験のN値と、室内試験で得られた細粒分含有率FCを用いた液状化判定結果を示す。なお、地盤種別はII種、地震動タイプはII、地域別補正係数 $C_z$ は

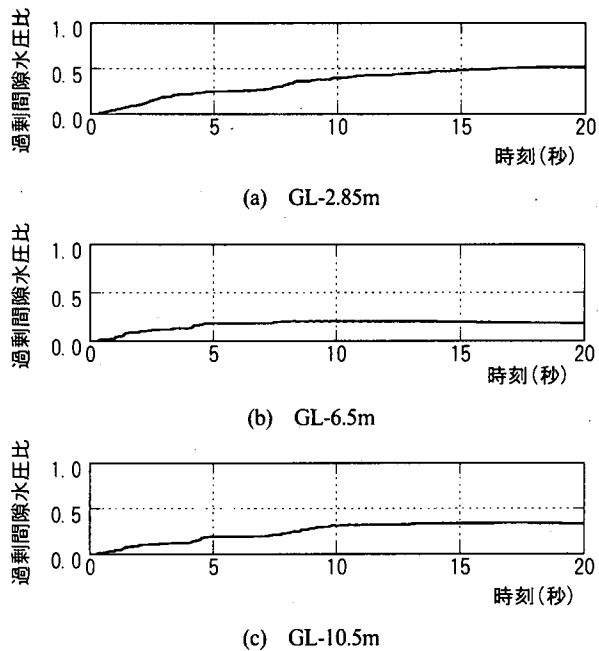


図-17 有効応力解析で求めた過剰間隙水圧比の時刻歴波形

表-3 等価線形解析結果を用いた液状化判定

深度 GL-m	液状化強度 R1 (kN/m <sup>2</sup> )	最大せん断応力 $\tau_{max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	有効せん断応力 $\tau_{eff}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$F_L$ R1/ $\tau_{eff}$
2.85	25.48	12.45	8.72	2.92
6.50	47.04	25.58	17.93	2.62
10.50	28.42	34.40	24.11	1.18

表-2 道路橋示方書・同解説に従った液状化判定

土質名	深度 GL-m	N値	細粒分含有率 Fc(%)	塑性指数 Ip	10%粒径 D10(mm)	平均粒径 D50(mm)	上載圧(kN/m <sup>2</sup> )		yd	R	L	$F_L$ R/L
							$\sigma_v$	$\sigma'_v$				
砂質土	2.35	8	38.9	-	0.0234	0.1243	40.1	28.3	-	-	-	-
砂質土	6.55	15	33.6	-	0.0305	0.1414	111.8	58.8	0.90	1.63	1.02	1.60
砂質土	12.20	5	48.3	-	0.0200	0.0795	209.3	100.9	-	-	-	-

0.85 として判定した。表より、判定対象土層である深度 GL-6.55m における  $F_L$  値は 1.60 であり、液状化発生の可能性が低い結果となった。これは、細粒分含有率が大きいのが一因である。次に、等価線形解で得られた最大せん断応力  $\tau_{max}$  と、室内試験で得られた液状化強度  $R_I$  を用いた液状化判定結果を表-3 に示す。なお、表中の有効せん断応力  $\tau_{eff}$  は、入力波が

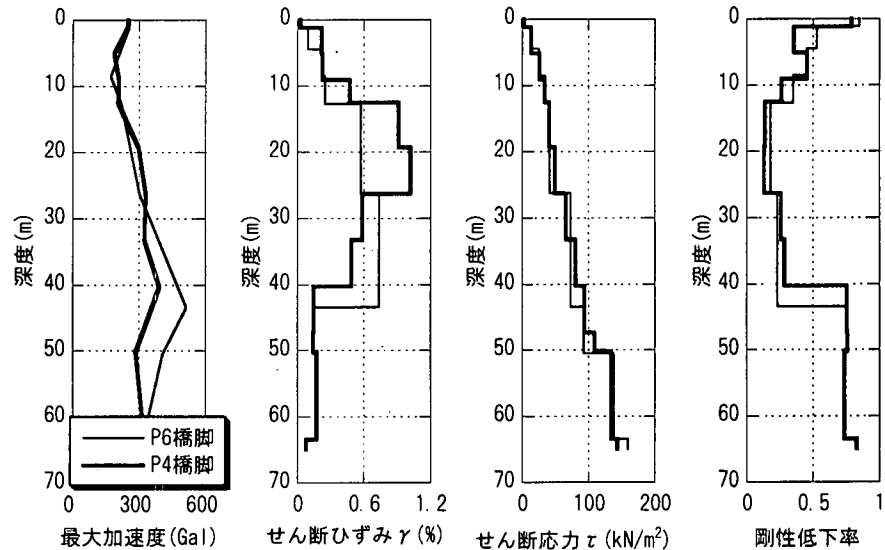


図-18 地中 (P4 橋脚) と地表 (P6 橋脚) 地点での応答結果の比較

タイプⅡの地震動であるため最大せん断応力  $\tau_{max}$  に 0.7 を乗じた値で定義した。また、液状化強度  $R_I$  は繰返し回数  $N_c=20$  における応力振幅比である。表-3 より、液状化判定の対象となる 3 土層とも  $F_L$  が 1.0 より大きく、液状化の可能性が低い結果となった。

図-18 には、地中観測地点 (P4 橋脚) と地表観測地点 (P6 橋脚) での最大加速度・せん断ひずみ・せん断応力・剛性低下率の深度方向分布の重ね書きを示す。この図は、地中観測地点では、サイスミックコーン貫入試験で S 波速度構造が得られているため、この地点での各土層の地盤物性値を地表観測地点と同じと仮定して等価線形解析を実施して求めた。GL-5m でのせん断ひずみは P4 橋脚地盤近傍が大きくなっており、地盤の剛性低下の現象が強い結果を示している。また、GL-20m 付近でも P4 橋脚地盤近傍でせん断ひずみが大きくなっており、近傍地盤でも地盤応答特性に大きな違いが見られる。

## 6. まとめ

境水道大橋で観測された地中地震観測記録を用いて地表観測記録の再現解析および液状化評価を実施するために、観測記録を分析し、地中地震計の方位補正を行い基盤入力地震動の作成、地盤調査を行った。等価線形解析と有効応力解析による再現解析から、等価線形解析・有効応力解析とも最大加速度は一致しているが、等価線形解析ではピーク加速度前の波形の一致度が良く、一方、有効応力解析では短周期成分が多く含まれる結果となった。また、既往の液状化判定と等価線形解析結果を用いた液状化判定および有効応力解析結果を用いて液状化可能性を判定した結果、液状化対象土層は細粒分含有率が大きいため、いずれの判定法でも完全液状化には至らない結果となった。しかし、地中観測地点周辺では、液状化に伴う被害が見られたため、地中観測地点での地盤モデルを作成し応答評価を行った結果、地中観測地点付近では、せん断ひずみが地表地震計地点より大きくなっており、液状化発生の可能性が高いことが分かった。

本論では、等価線形解析では当研究所清田芳治氏の協力を頂いた。また、港湾地域強震観測の記録を使用させて頂いた。記して感謝いたします。

## <参考文献>

- 1) 森、他：2000 年鳥取県西部地震における液状化地点の地震時非線形挙動、第 37 回地盤工学研究発表会、PP. 1951-1952、2002 年 7 月、2) 稲垣 他：境水道大橋で観測された鳥取県西部地震記録の分析 (その 1) 観測記録の分析、土木学会第 57 回年次学術講演会、1-869、pp. 1737-1738、平成 14 年 9 月、3) 稲垣 他：境水道大橋で観測された鳥取県西部地震記録の分析 (その 2) 地盤の評価、土木学会第 57 回年次学術講演会、1-870、pp. 1739-1740、平成 14 年 9 月、4) 稲垣、他：境水道大橋で観測された鳥取県西部地震記録の分析 (その 3) 地震応答解析、土木学会第 57 回年次学術講演会、1-871、pp. 1741-1742、平成 14 年 9 月、5) 太田、他：加速度計で観測される地震波の精度についての検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和 57 年 10 月、6) 鈴木、他：サイスミックコーンとロータリーパーカッションドリルを併用した地盤調査システム、日本建築学会技術報告集、第 1 号、pp. 180-184、1995 年、7) 原、他：土の動的変形試験法とデータ処理システムの一提案、日本建築学会関東支部研究報告集、pp. 13-16、1984 年、8) 鈴木、他：コーン貫入試験の先端抵抗と標準貫入試験の N 値およびせん断波速度の関係、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 489-490、2001 年、9) 西、他：回転式打撃式ドリルを用いた新しい地盤調査法、日本建築学会技術報告集、第 5 号、pp. 69-73、1997 年