

東北地方太平洋沖地震の強震記録を用いた河川堤防の地震応答解析

松岡一成¹・片岡正次郎²・長屋和宏³・金子正洋⁴

¹国土交通省国土技術政策総合研究所 地震防災研究室（〒305-0804 茨城県つくば市旭1）

E-mail:matsuoka-k86mf@nilim.go.jp

²国土交通省国土技術政策総合研究所 地震防災研究室（〒305-0804 茨城県つくば市旭1）

E-mail:kataoka-s92rc@nilim.go.jp

³国土交通省国土技術政策総合研究所 地震防災研究室（〒305-0804 茨城県つくば市旭1）

E-mail:nagaya-k28p@nilim.go.jp

⁴国土交通省国土技術政策総合研究所 地震防災研究室長（〒305-0804 茨城県つくば市旭1）

E-mail:kaneko-m92pq@nilim.go.jp

河川堤防の耐震対策は、その使われている材料が土でありその基礎である地盤と連続的な構造物となっている。このため、液状化の検証は必要不可欠である。しかしながら、今までに液状化検討の重要な要素である過剰間隙水圧と加速度波形が同じ場所で同時に観測された事例は少ない。本論は、東北地方太平洋沖地震において強震記録（加速度波形）及び間隙水圧が観測された河川堤防の地震応答について等価線形解析及び有効応力解析を実施し、その再現性を確認することを目的とする。結果として、ある程度の再現性について確認できたが、精度の面で課題が残った。

Key Words : levee, equivalent linear analysis, effective stress analysis,
the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake

1. はじめに

河川堤防において地盤の液状化の検討は耐震設計上重要な要素であるが、いままです地震において加速度波形と間隙水圧が同箇所です同時にとれた記録は少なく、このため実地震を使った検討事例は少ない。このようななか、この度の東北地方太平洋沖地震において、鳴瀬川河口付近の河川堤防に設置した強震計及び間隙水圧計で記録が得られた。

本論では、この観測記録をもとに等価線形解析及び、有効応力解析を実施しその地震動及び間隙水圧の再現性について確認を行った。

2. 強震観測施設設置箇所

現地は、仙台市の北東（東松島市）に位置する鳴瀬川の河口より800mほど上流の右岸堤防である。

堤防の断面及び、設置センサ（強震計、間隙水圧計）位置を図1に示す。堤防の高さは約7m、天端幅は約8mであり、広い小段（幅約10m）が設けられた比較的幅広い堤防である。

地層については、堤防天端から深さ約6.5m～9.5mに、液状化すると考えられる砂質土が存在している。1995年兵庫県南部地震以降、全国的に河川堤防の耐震対策がおこなわれたが、この地点では、この砂質層が液状化して許容値を超える沈下が生じる可能性があると判断され、1996年に図-1に示す範囲に延長300mにわたって締固め改良（SCP工法）が実施された。

尚、この度の東北地方太平洋沖地震では、この地点でも津波の被害を受けて写真-1のような状態となった。

3. 観測記録

この度の東北地方太平洋沖地震の加速度波形記録及び間隙水圧記録を図-2に示す。

上段が堤防天端で記録された水平方向（NS成分：堤防縦断方向）の加速度波形、中段が液状化の懸念される砂層で記録された間隙水圧を過剰間隙水圧比に換算したもので、下段が基盤層に設置された、水平成分（NS成分：堤防縦断方向）の加速度波形

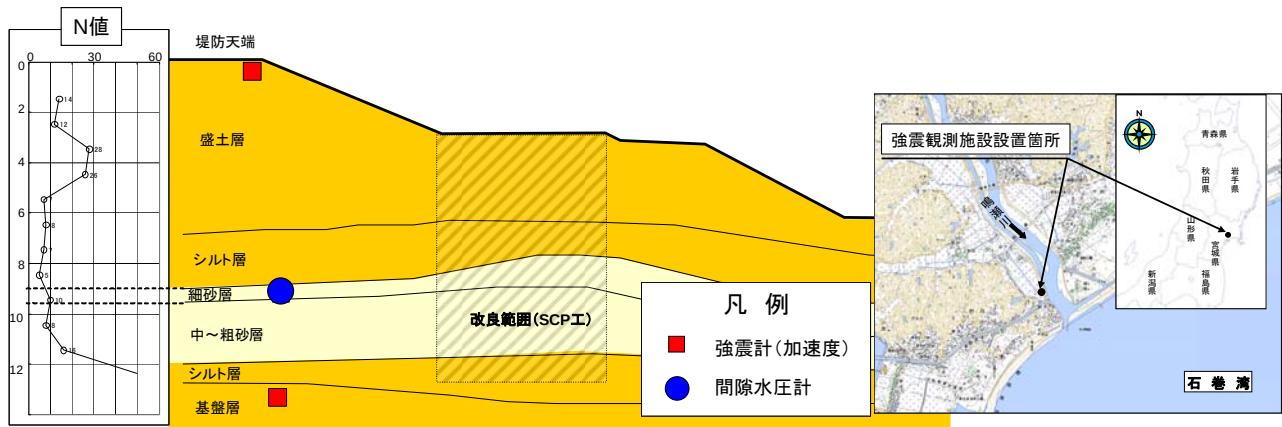


図-1 強震観測施設位置図及びセンサ配置図

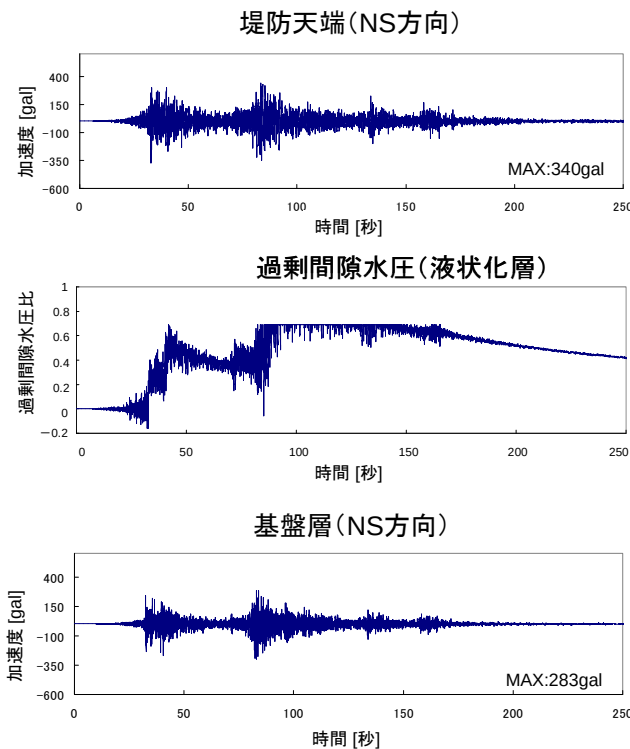


図-2 加速度波形記録および間隙水圧記録

である。
この図より、今回の地震は宮城県沖での大きな2つの破壊¹⁾に対応するピークが2回あり、それぞれの継続時間も長いという特徴がわかる。

加速度波形では、基盤層で最大加速度が440gal程度に対して天端では480gal程度と堤防天端の方が堤体を通すことにより大きくなっていることがわかる。

過剰間隙水圧比は加速度波形と見比べると、はじめのピークの時に加速度波形と同じく過剰間隙水圧もピークを迎え、その後緩やかに消散している。2回目のピークも同様に加速度波形及び過剰間隙水圧同じようにピークを迎えているが、過剰間隙水圧については1回目のピークで生じた水圧が完全に消散する前に、2回目のピークを迎えており、計測能力を超える領域まで数値が上昇しているのが解る。以上より、加速度波形と過剰間隙水圧には関連性が確認できる。

写真-1 観測施設状況



表-1 堤防天端部の地盤モデル

	上端深さ (m)	層厚 (m)	S波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	主な土質	有効上載圧 (kN/m ²)	動的変形 特性曲線
1	0.00	1.00	172	1.73	BK(上)	9	沖積 砂質土
2	1.00	1.10	172	1.73	BK(上)	26	
3	2.10	1.10	172	1.73	BK(上)	45	
4	3.20	1.00	172	1.73	BK(上)	63	
5	4.20	1.00	215	1.43	BK(下)	78	沖積 粘性土
6	5.20	1.10	215	1.43	BK(下)	93	
7	6.30	0.50	182	1.43	Ac1	102	
8	6.80	1.00	182	1.43	Ac1	105	
9	7.80	0.90	182	1.43	Ac1	109	沖積 砂質土
10	8.70	0.17	137	1.73	Acs	111	
11	8.87	0.13	137	1.73	Acs	112	
12	9.00	1.00	178	1.73	As1	116	
13	10.00	1.45	178	1.73	As1	125	沖積粘性土
14	11.45	0.75	252	1.43	Ac2	131	
15	12.20	—	368	2.04	To	—	

4. 観測記録と等価線形解析結果との比較

等価線形解析を実施して、それから得られる加速度波形と観測記録の加速度波形を比較することにより解析の再現性について確認する。等価線形解析は、0.75程度の過剰間隙水圧比が生じても飽和砂質土層の挙動を再現可能と報告²⁾されている。

強震計及び間隙水圧計を設置する際のボーリングで得られた土質柱状図及びPS検層で得られたデータに基づいて、堤防天端部（未改良部）の地盤モデルを表1のように作成した。変形特性（動的変形特性曲線G/G₀- γ ，h- γ 関係）は土木研究所の資料³⁾より設定した。図-1のとおり、基盤層には加速度計が設置されており、強震記録が得られていることから、これを堤防天端部の地盤モデルへの入力波形とした。基盤は剛基礎とし、地中基盤波（E+F）の合成波形として入力した。

表-2 有効応力解析に用いたパラメータ

土質名	上面 深さ (m)	層厚 (m)	単位体積 重量 (kN/m ³)	粘着力 c(kN/m ²)	終局せん断 強度 τ _v (kN/m ²)	内部 摩擦角 φ(°)	剛性率 G ₀ (kN/m ²)	間隙率 n	透水係数 k(m/s)	細粒分 含有率 F _C (%)	体積圧縮 係数 m _v (m ² /kN)	変相角 θ(°)	R _L	R ₂₀	B _v	B _c
1 BK(上)	0.00	1.00	17	0.0	30.00	—	5.132E+04	0.44	4.344E-05	—	—	—	—	—	—	—
2 BK(上)	1.00	1.10	17	0.0	30.00	—	5.132E+04	0.44	4.344E-05	—	—	—	—	—	—	—
3 BK(上)	2.10	1.10	17	0.0	30.00	—	5.132E+04	0.44	1.006E-05	—	—	—	—	—	—	—
4 BK(上)	3.20	1.00	17	0.0	30.00	—	5.132E+04	0.44	2.111E-05	—	—	—	—	—	—	—
5 BK(下)	4.20	1.00	14	83.4	—	0	6.604E+04	0.69	3.370E-06	—	—	—	—	—	—	—
6 BK(下)	5.20	1.10	14	83.4	—	0	6.604E+04	0.69	3.751E-10	—	—	—	—	—	—	—
7 Ac1	6.30	0.50	14	54.0	—	0	4.732E+04	0.69	3.751E-10	76.2	—	—	—	—	—	—
8 Ac1	6.80	1.00	14	54.0	—	0	4.732E+04	0.69	3.751E-10	76.2	—	—	—	—	—	—
9 Ac1	7.80	0.50	14	54.0	—	0	4.732E+04	0.69	1.630E-10	88.8	—	—	—	—	—	—
10 Acs	8.87	0.30	17	0.0	19.08	—	3.256E+04	0.44	2.916E-04	3.6	3.250E-05	22.2	0.138	0.085	9.2803	0.5947
11 As1	9.00	1.00	17	0.0	33.91	—	5.498E+04	0.44	2.916E-04	3.6	3.289E-05	26.6	0.200	0.140	3.9431	0.3001
12 As1	10.00	1.45	17	0.0	34.87	—	5.498E+04	0.44	3.778E-04	4.5	3.379E-05	26.6	0.195	0.137	3.9740	0.3879
13 Ac2	11.45	0.75	14	127.5	—	0	9.072E+04	0.69	4.000E-10	88.6	—	—	—	—	—	—
14 Ac2	12.20	—	20	—	—	—	2.764E+05	—	—	—	—	—	—	—	—	—

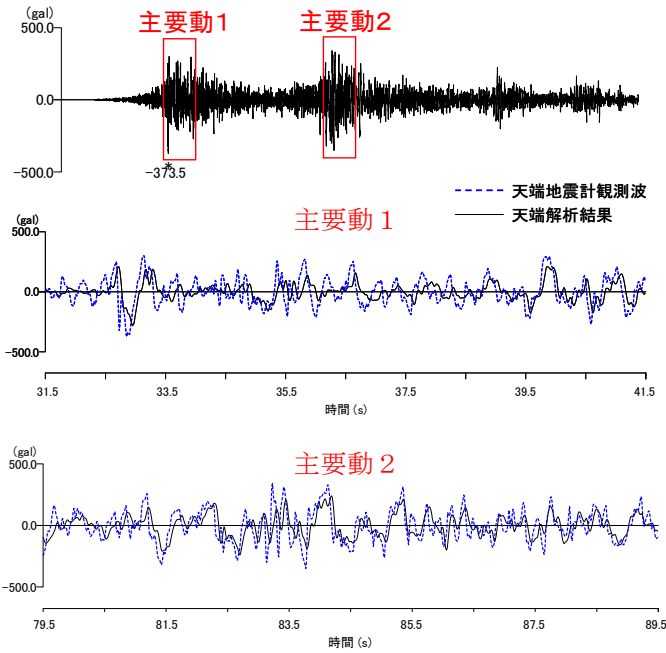


図-3 観測記録と等価線形解析結果の比較

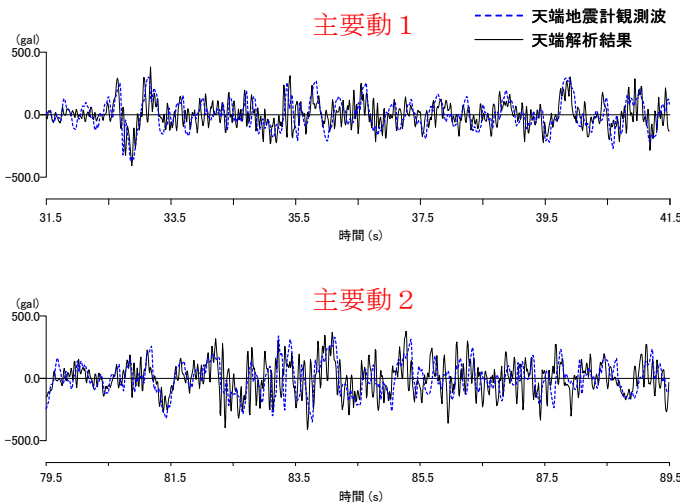


図-4 周波数依存性を考慮した等価線形解析

堤防天端の地表加速度計での加速度波形と等価線形解析で得られた加速度波形の比較を図-3に示す。

図より、位相等の振動特性は概ね一致しているが、短周期の応答が小さい傾向となっている。

5. 周波数依存性を考慮した等価線形解析

SHAKEによる解析において、最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}$ と有効せん断ひずみ γ_{eff} の関係式 (1) に示す係数 α で与えられる。係数 α は周波数により変化せず $\alpha = 0.65$ の一定値として計算している。

$$\gamma_{\text{eff}} = \alpha \gamma_{\max} \quad (1)$$

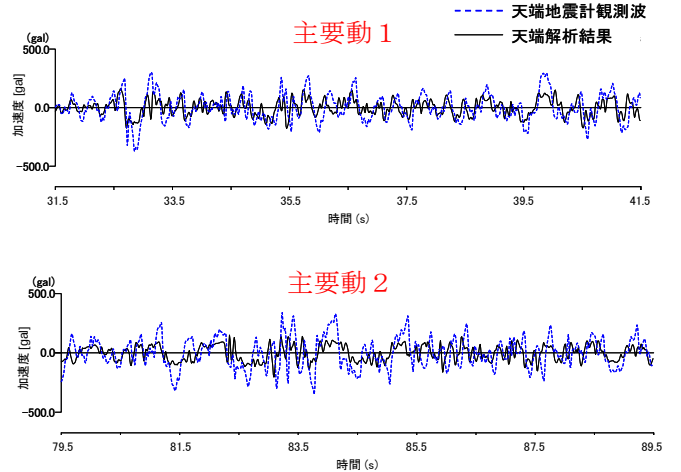


図-5 有効応力解析結果（加速度波形）との比較

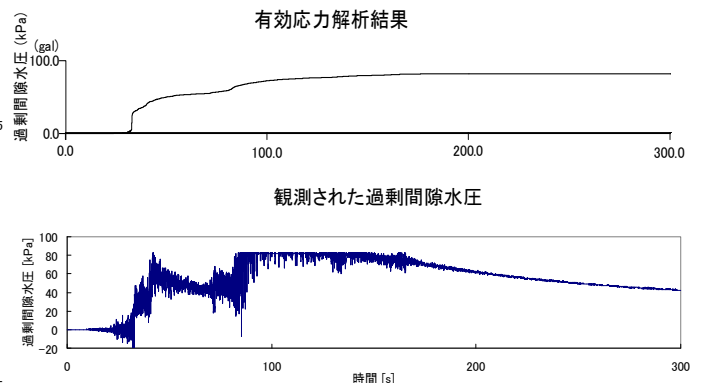


図-6 有効応力解析結果（過剰間隙水圧）との比較

ここで、 α を変化させて周波数依存性を考慮したSHAKEの改良手法⁴⁾を取り入れた場合の、等価線形解析によって得られた加速度波形の結果と、堤防天端において記録された加速度波形を比較したものを図-4に示す。

図より、改良手法を取り入れることによって、主要動1及び2どちらにおいても位相が一致し短周期成分において精度に改善が見られた。

6. 有効応力解析による間隙水圧の観測記録との比較

繰返しせん断を受けることによる過剰間隙水圧の発生を考慮することができる、非線形逐次積分法のプログラムである YUSAYUSA-2 を採用し有効応力解

析を実施した。この計算に用いたパラメータを表-2に示す。

この解析結果の加速度波形と堤防天端における観測加速度波形との比較を図-5に、解析結果の過剰間隙水圧と観測された過剰間隙水圧を比較したものを図-6に示す。またこの計算に用いたパラメータを表-2に示す。

図より、加速度波形においては、位相等の振動特性は概ね一致しているが、短周期の応答が小さい傾向となっている。過剰間隙水圧については全体的な傾向は概ね推定できているが、水圧の消散特性等については十分な再現ができていない。

7. まとめ

等価応答解析では、位相等の振動特性が概ね再現が出来た。しかし短周期成分の再現については解析の改良により一定改善がみられたが精度の点で課題がのこる結果となった。

有効応力解析においては、加速度波形においては位相等の振動特性が概ね再現できているが、短周期成分の再現に課題があり、過剰間隙水圧については、その消散の再現性においてさらなる検討が必要と考える。

今後、現地においては土の微子構造を乱さずに採取できる凍結サンプリングを実施し、地盤モデルの補正及び二次元動的解析を実施する予定である。

なお、今回の記録が得られた観測施設については、

この度の東北地方太平洋沖地震による津波で、被災しており観測継続が出来ない状況となっているが、継続的な観測が重要であるため、観測施設の管理者と協力し早急な復旧を行い、施設の維持及び観測を継続していく予定である。

謝辞：本研究では、国土交通省東北地方整備局 北上川下流事務所の所有する強震観測施設で観測された記録を使用させていただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 気象庁：「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震」について（第 28 報），2011
- 2) 林宏親、西川純一、谷口啓二郎、池田隆明、三輪滋、森伸一郎：液状化アレー観測記録を用いた地盤の地震時挙動の検討、第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集、1 分冊、pp. 1217-1222、1998
- 3) 建設省土木研究所地震防災部振動研究室：地盤の地震時応答特性の数値委解析法—SHAKE:DESRE—、土木研究所資料、第 1778 号、1982
- 4) 山本明夫、笹谷努：2003 年十勝沖地震における地盤の非線形応答：KiK-net 鉛直アレー記録の活用、日本地震工学会論文集、第 7 巻、第 2 号（特集号）、2007

EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSES OF A LEVEE USING STRONG MOTION RECORD DURING THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE

MATSUOKA Kazunari, KATAOKA Shojiro,
NAGAYA Kazuhiro and KANEKO Masahiro

Time history records of ground acceleration and pore water pressure were obtained at a levee during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. The earthquake response of the levee is simulated by 1-D equivalent linear analysis and 1-D effective stress analysis using the ground motion recorded in the base layer as input motion. Frequency dependence of effective shear strain is taken into account to reproduce short period component of the response by the 1-D equivalent linear analysis. Hydrodynamic pressure and dissipation of pore water pressure are not reproduced by the 1-D effective stress analysis; freezing soil sampling and 2-D simulation may be required for improving the analytical results.