

上部地盤の弾塑性応答解析に基づいた観測地震波からの入力地震動の推定

株式会社 竹中工務店 技術研究所 国際会員 ○金田一広  
 (公財) 地震予知総合研究振興会 国際会員 浅岡顕 澤田義博  
 名古屋大学 国際会員 野田利弘 中井健太郎

液状化、地震応答解析、SYS カムクレイモデル

1. はじめに

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では浦安地区では非常に広い範囲で液状化が発生した。地盤工学会震災委員会である「地盤変状メカニズム委員会」では浦安の地盤を弾塑性構成式 SYS カムクレイモデルによりパラメータを同定し、地震応答解析を実施して液状化について検討している。<sup>1),2)</sup>しかし、入力した波は品川観測点の地下-36m 観測波をそのまま 2E 入力して解析を実施した。地中の地震観測記録でも入力(E波)と反射波(F波)の影響を受けることはよく知られている。工学基盤や解放基盤位置をどこに設定するかにもよるが、地表面あるいは地中の観測波から等価線形解析などで入力波を推定することはよく行われている。しかし、地表面のひずみが大きくなると非線形の影響が強くなり入力波を推定することは難しくなる。さらに、地盤を弾塑性構成式とすると挙動は有効応力経路に依存するため入力地震波の周期特性や最大加速度にも依存する。本報告では弾塑性力学に基づき観測波と入力地震動の推定について検討した。

2. 解析条件

数値解析は地盤の構成モデルには SYS カムクレイモデルを搭載した水-土骨格連成有限変形解析コード GEOASIA<sup>3)</sup>を用いた。図1に解析で用いた実モデルの境界条件などを示す。3次元柱状モデルである。K-net 浦安、元町、中町付近の地質断面図を参考にしている。

浦安の地盤は基盤層が陸側から海側へ傾斜している特徴があり、海側に行くほど厚く粘土土が堆積している。中町付近は東北地方太平洋沖地震で大きな液状化が発生した付近である。なお、工学基盤は本研究では地下-72m と設定した。地震波は NS,EW の 2 方向で 2E 入力し、底面は粘性境界 ( $V_s=400\text{m/s}$ )とした。表1に入力パラメータと初期値を示す。D層は  $V_s=300\text{m/s}$  程度の硬質地盤で、AC1~3は粘性土地盤、As層は砂質地盤、B,F層は盛土地盤である。この弾塑性パラメータはサンプリングした地盤から同定している。詳細は参考文献1)を参照。

3. 入力波の推定

図2に2011.3.11の本震でK-net 浦安で観測された地表面観測波<sup>4)</sup>を示す。この地震波を模擬できるような入力地震波を推定する。地表面観測波の最大加速度を0.25倍し周波数領域で高周波数をカ

表1 弾塑性パラメータと初期値

<弾塑性パラメータ>	B	As	Ac1	Ac2	Ac3	D
圧縮指数 $\lambda$	0.09	0.07	0.28	0.28	0.12	0.08
膨潤指数 $\kappa$	0.01	0.00	0.02	0.02	0.01	0.00
限界状態数 M	1.40	1.43	1.40	1.40	1.40	1.50
NCL intercept N (at $p'=98\text{ kPa}$ )	2.45	2.01	2.82	2.82	2.00	2.05
ポアソン比 $\nu$	0.10	0.25	0.10	0.10	0.10	0.28
<発展則パラメータ>						
正規圧密粘土化指数 m	8.00	8.00	20.00	20.00	20.00	0.05
構造劣化指数 $a(b=c=1)$	0.10	8.00	0.65	0.65	0.65	1.00
Cs	0.80	1.00	0.40	0.40	0.40	0.50
回転硬化指数 $b_r$	0.50	3.00	0.20	0.20	0.20	0.20
回転硬化限界指数 $m_b$	0.70	0.50	1.00	1.00	1.00	0.70
<初期条件>						
初期異方性 $\zeta_0$	0.13	0.00	0.40	0.33	0.35	0.35
初期応力比 $\eta_0$	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
構造の程度 $1/R^*$	2.79	1.20	4.55	13.30	12.13	100.00
初期過圧密比 $1/R$	1.90	6.50	1.55	1.14	1.90	10000.00
土粒子密度 $\rho\text{ (g/cm}^3\text{)}$	2.68	2.79	2.69	2.96	2.96	2.65
透水係数 $k\text{ (m/sec)}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-8}$	$1.0 \times 10^{-9}$	$1.0 \times 10^{-6}$

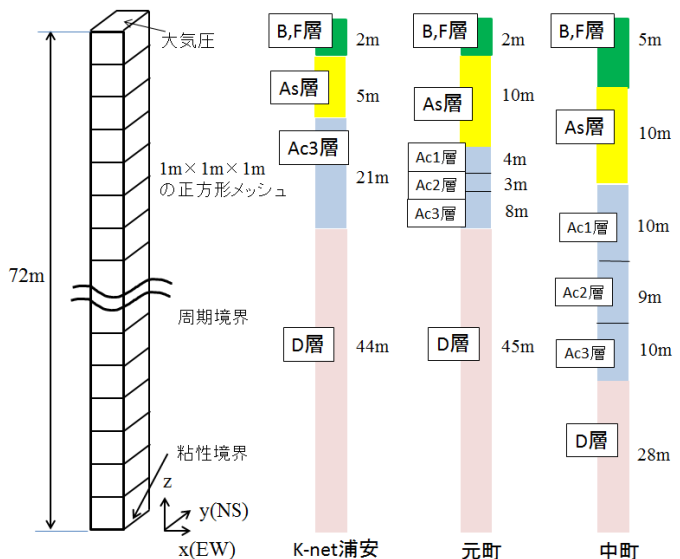


図1 地盤条件と境界条件

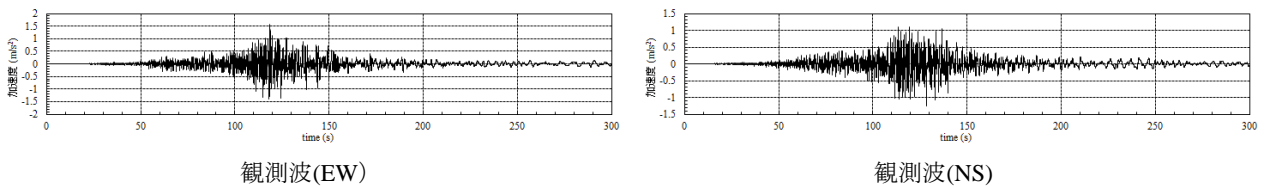


図 2.3.11 の本震で観測された K-net 浦安観測波

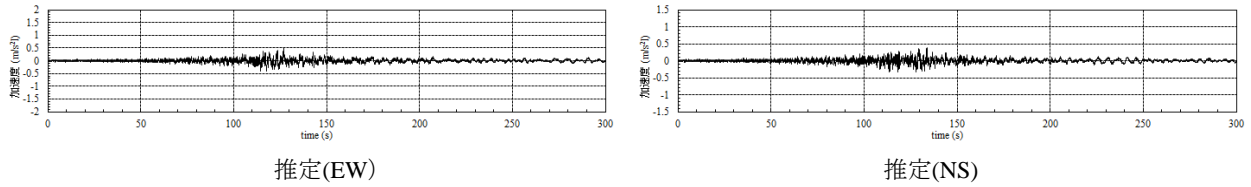


図 3 推定した入力地震動

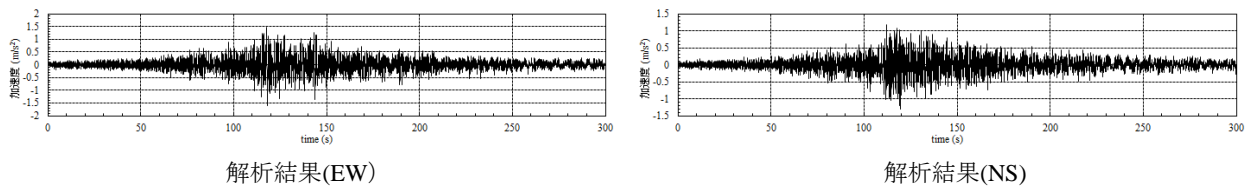


図 4 地表加速度履歴 (解析結果)

ットし、周波数帯で観測記録と解析結果の比を算定しその比率を入力波に反映させて入力波を推定した。図3に入力地震動を、図4に計算された地表面観測波を示す。最大加速度に関してEWでは観測は1.58m/s、解析は1.59m/sとなり、NSでは、観測は1.25m/s、解析は1.3m/sとなった。完全には一致していないが、最大加速度に関してはよく類似している。時刻歴波形は50秒までと150秒以降は大きな振幅となった。これはFFTによって周波数領域で推定するときの誤差が生じて、その影響が時間領域で出ていると思われる。図5にEW方向の観測波、解析結果および推定した入力波のフーリエスペクトルを示す。2~6Hzではまだ観測波と一致していない部分があるが、推定入力波では見られなかった周波数領域で解析結果では卓越する部分も見られ非線形性が現れていると思われる。

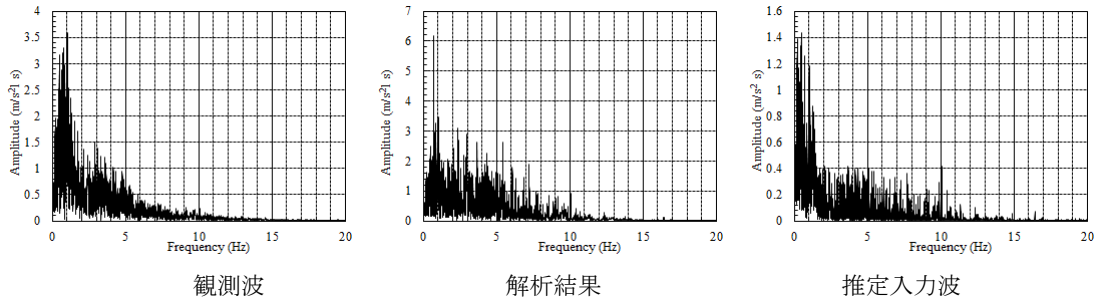


図 5 フーリエスペクトル

図3に入力地震動を、図4に計算された地表面観測波を示す。最大加速度に関してEWでは観測は1.58m/s、解析は1.59m/sとなり、NSでは、観測は1.25m/s、解析は1.3m/sとなった。完全には一致していないが、最大加速度に関してはよく類似している。時刻歴波形は50秒までと150秒以降は大きな振幅となった。これはFFTによって周波数領域で推定するときの誤差が生じて、その影響が時間領域で出ていると思われる。図5にEW方向の観測波、解析結果および推定した入力波のフーリエスペクトルを示す。2~6Hzではまだ観測波と一致していない部分があるが、推定入力波では見られなかった周波数領域で解析結果では卓越する部分も見られ非線形性が現れていると思われる。

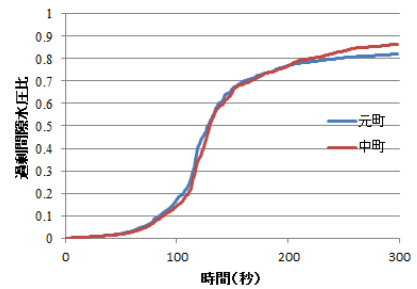


図 6 過剰間隙水圧比～時間関係

#### 4. 推定地震動による液状化解析

図6にAS層の中心位置における過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。元町では過剰間隙水圧比が0.82、中町では0.86となった。先にも述べているが東北地方太平洋沖地震では中町地区は甚大な液状化被害が発生した地区であるが、地盤構成を推定し、EW、NSの2方向加振を行っても液状化に達していないという結果になった。これは浅岡、中井<sup>1,2)</sup>らが指摘しているように浦安地区では粘土層の厚さなど地盤の不整形に起因した表面波が発生し、中町地区に液状化を発生させ被害を拡大させたことが大きいと思われる。

#### 5. おわりに

非線形地盤に対して、入力地震動を推定することによる地震応答解析を示した。今後はさらに精度の高い推定方法を検討するとともに、他のサイトでも検討することを考えている。

参考文献 1 中井健太郎, 野田利弘, 中野正樹, 村上孝弥, 浅岡顕.(2015).浦安市地盤の地盤構成・物理特性・力学特性の把握.地盤工学会特別シンポジウム-東日本大震災を乗り越えて-,3-10. 2) 浅岡顕, 中井健太郎, 野田利弘, 村瀬恒太郎.(2015): 不整形な境界から発生した表面波によって拡大した浦安市の液状化被害地盤工学会特別シンポジウム-東日本大震災を乗り越えて-,3-11. 3)Noda, Asaoka, A. and Nakano, M.(2008):Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model. *Soils and Foundations*, 48(6), pp.7717-790. 4)防災科学技術研究所: <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>.