

I-628

埋立地盤における地盤の加速度応答に及ぼす間隙水圧の影響

飛島建設(株) 正会員○三輪 滋
飛島建設(株) 正会員 森 伸一郎

1. はじめに 液状化が考えられる飽和砂層のある地盤では、液状化に至らない場合でも、間隙水圧の上昇による有効応力(拘束圧)の減少に伴って地盤のせん断剛性は低下し、その結果として地震動の増幅特性は変化する。すなわち、このような地盤では、地震応答に対する地盤の非線形性はひずみに依存する非線形性に加えて、間隙水圧の上昇、言い換えれば拘束圧に依存する非線形性も考慮することが重要となる¹⁾。

液状化が考えられる飽和砂地盤の非線形応答特性について、振幅が小さくなり、長周期化することを定性的に指摘したものは多いが(例えば文献2)3))、間隙水圧の上昇に伴う地震動増幅特性の変化については十分な検討がなされていないのが現状である。筆者らは、間隙水圧の上昇が増幅特性に及ぼす影響を検討する手始めとして、応答加速度の最大値に注目して検討した。緩い砂地盤に対する検討¹⁾に続いて、ここでは、東京湾臨海部の埋立地盤を想定した砂質土と粘性土の互層地盤モデルで行った同様の検討について報告する。なお、ここでは、過剰間隙水圧と初期有効上載圧との比(間隙水圧比)が1.0に達した状態を液状化と呼ぶ。

2. 検討方法 前述の目的のため、文献1)と同様、間隙水圧発生モデルに石原・東畑⁴⁾の有効応力径路モデルを組込んだ次元有効応力解析法を用いて全応力法と有効応力法による非線形地震応答解析を行い両者を比較検討した。地盤モデルを表-1に示す。入力地震動には1983年日本海中部地震の秋田港記録(NS成分)と1940年イハ・リマ・バレー地震のEl Centro記録(NS成分)を用いた。図-1に入力加速度時刻歴を最大加速度100cm/s²に調整して示す。なお、入力地震動は基盤入射波として取り扱っており、入力加速度とは入射波の加速度を意味する。

3. 解析結果の検討 図-2に入力最大加速度(以後入力加速度と呼ぶ)と地表面最大加速度(以後応答加速度と呼ぶ)との関係を線形解析と、非線形の全応力、有効応力解析について示す。図中には、はじめに液状化層が現れる入力加速度が示してある。この加速度を境にして有効応力解析の応答加速度の変化の仕方は不規則となり単調な非線形性を示さなくなる。

全応力解析では、入力加速度と応答加速度の間にはひずみ依存性の非線形効果で説明できる単調な関係が見られる。また、応答加速度は200cm/s²程度で頭打ちとなる。有効応力解析では、入力加速度が30cm/s²程度までは、間隙水圧の影響はほとんどなく、全応力解析とほぼ同じ応答加速度を示し、30~50cm/s²(修正秋田波)、30~60cm/s²(El Centro波)の範囲では間隙水圧の上昇に伴うせん断剛性の低下の影響が現れて、全応力解析よりも応答加速度が小さくなる。このように、液状化層が現れるレベルよりも小さい入力加速度の範囲では、いずれの入力

表-1 解析地盤モデル(仮想東京湾臨海埋立地盤)

地層構成	N 値	深度 (m)	層区分	単位体積重量 γ , (tf/m ³)	せん断波速度 V_s , (m/s)	繰返し応力比 R_z	内部摩擦角 ϕ (°)	静的強度 τ , (tf/m ²)
埋立土 (粘性土)	5	1	1	1.70	110	—	24	4.06
埋立土 (砂質土)	3	2	2	1.80	110	0.16	22	3.34
埋立土 (砂質土)	3	3	3	1.75	100	0.12	23	1.91
有楽町層 上部 粘性土層	4	4	4	—	—	—	—	—
有楽町層 中部 粘性土層	3	5	5	1.60	120	—	22	3.30
有楽町層 下部 粘性土層	5	6	6	1.80	160	0.16	24	5.02
有楽町層 下部 粘性土層	3	7	7	—	—	—	—	—
有楽町層 下部 粘性土層	3	8	8	—	—	—	—	—
有楽町層 下部 粘性土層	3	9	9	—	—	—	—	—
有楽町層 下部 粘性土層	3	10	10	—	—	—	—	—
有楽町層 下部 粘性土層	3	11	11	—	—	—	—	—
有楽町層 下部 粘性土層	3	12	12	—	—	—	—	—
有楽町層 下部 粘性土層	3	13	13	—	—	—	—	—
有楽町層 下部 粘性土層	3	14	14	—	—	—	—	—
有楽町層 下部 粘性土層	3	15	15	—	—	—	—	—
有楽町層 下部 粘性土層	3	16	16	—	—	—	—	—
有楽町層 下部 粘性土層	3	17	17	—	—	—	—	—
有楽町層 下部 粘性土層	3	18	18	—	—	—	—	—
有楽町層 下部 粘性土層	3	19	19	1.65	120	—	22	4.38
東京層 砂質土層	30	20	20	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	21	21	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	22	22	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	23	23	2.00	330	0.25	36	26.65
東京層 砂質土層	30	24	24	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	25	25	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	26	26	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	27	27	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	28	28	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	29	29	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	30	30	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	31	31	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	32	32	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	33	33	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	34	34	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	35	35	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	36	36	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	37	37	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	38	38	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	39	39	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	40	40	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	41	41	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	42	42	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	43	43	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	44	44	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	45	45	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	46	46	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	47	47	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	48	48	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	49	49	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	50	50	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	51	51	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	52	52	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	53	53	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	54	54	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	55	55	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	56	56	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	57	57	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	58	58	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	59	59	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	60	60	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	61	61	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	62	62	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	63	63	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	64	64	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	65	65	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	66	66	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	67	67	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	68	68	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	69	69	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	70	70	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	71	71	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	72	72	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	73	73	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	74	74	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	75	75	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	76	76	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	77	77	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	78	78	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	79	79	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	80	80	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	81	81	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	82	82	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	83	83	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	84	84	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	85	85	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	86	86	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	87	87	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	88	88	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	89	89	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	90	90	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	91	91	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	92	92	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	93	93	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	94	94	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	95	95	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	96	96	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	97	97	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	98	98	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	99	99	—	—	—	—	—
東京層 砂質土層	30	100	100	—	—	—	—	—

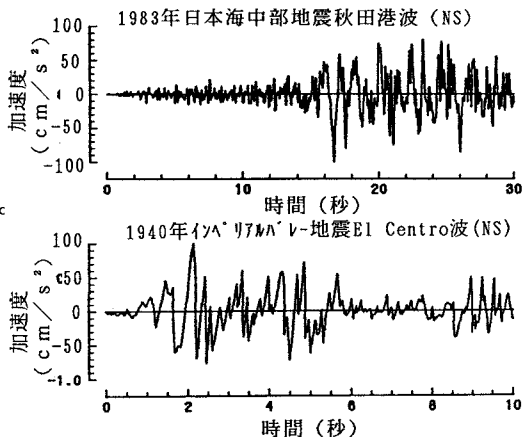


図-1 入力地震動加速度波形(100galに調整)

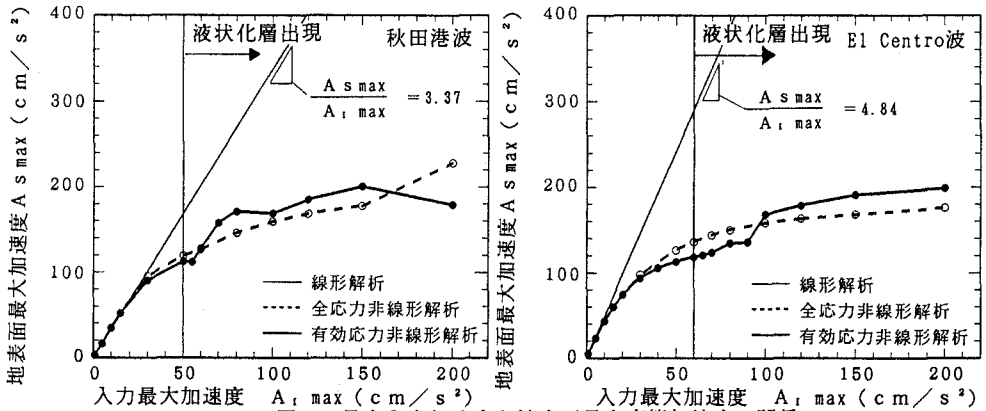


図-2 最大入力加速度と地表面最大応答加速度の関係

波形の場合でも、ひずみ依存と拘束圧依存の非線形効果により、入力加速度と応答加速度の間には、全応力解析同様、単調な関係が見られる。

しかし、地盤のいずれかの層に液状化層が現れはじめる 50 cm/s^2 （修正秋田波）または 60 cm/s^2 （El Centro波）を越える入力加速度では応答加速度が急増し、その変化の仕方が不規則となり、単調な（等価線形的な）非線形効果では説明できなくなる。秋田港波の 80 gal 入力の場合について応答加速度と間隙水圧比の時刻歴を、図-3に示す。液状化が発生する入力レベルでは応力が変相線に到達したときに有効応力が回復し、応答加速度は急激に大きくなる。そのため、従来は漠然と下回ると考えられていた全応力解析結果を上回る応答を示す場合も発生する。変相線に達した時刻の後、過剰間隙水圧が有効上載圧に等しくなる時点で、せん断力が伝達されなくなり加速度振幅は急激に減少し、波形は長周期化する。しかし、全応力解析では、最大値を示した後、波形はやや長周期化するものの、振幅は小さくならない。

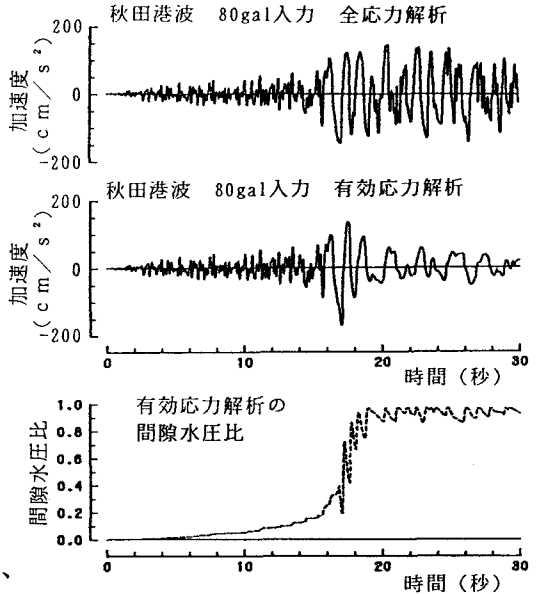


図-3 地表面加速度と過剰間隙水圧比の時刻歴（GL-6.5m）

4. まとめ 以上のように仮想の埋立地盤においても、文献1)での表層地盤が飽和砂層の新潟地盤の場合とほぼ同様に、つぎのようなことを確認した。

- ①入力に対する地表の最大加速度の関係は、液状化層が現れる入力加速度レベルの前後で変化する。
- ②液状化層が現れはじめるよりも小さな入力地震動の範囲では、地表面応答加速度は、入力が大きくなるにしたがい、ひずみ依存の非線形性と、間隙水圧の上昇による拘束圧依存の非線形性が単調に強くなる。
- ③液状化層が現れはじめるよりも大きな入力地震動に対しては、その関係は単調な（等価線形的な）非線形効果では説明できない不規則なものとなる。

5. 今後の課題 地盤の増幅特性に及ぼす間隙水圧の影響に関しては、①入力加速度の増加に伴う振動数領域での増幅特性、②異なる有効応力解析法③入力地震動特性、地盤条件の違い等について検討を進めたい。

謝辞：文献4)を通じて有効応力経路モデルを使用させて頂きました。最後になりましたが東京大学工学部の石原研而先生、東畑郁生先生に謝意を表します。

参考文献 1) 森伸一郎、三輪滋；地盤の加速度応答に及ぼす間隙水圧の影響、第26回土質工学研究発表会発表講演集、1991. 7

2) 森伸一郎、滝本幸夫、戸早孝幸、武藤正人、池田隆明；液状化地盤における杭基礎構造物の動的相互作用と液状化解析の適用性、構造物の基礎と地盤との動的相互作用に関するシンポジウム発表論文集、pp. 173～pp. 180, 1990. 7

3) 時松孝次；1964年新潟地震による川岸町アパートの被害と強震記録、地盤と土構造物の地震時挙動に関するシンポジウム発表論文集、pp44～pp49, 1989. 1

4) K. Ishihara, I. Towhata；One-Dimensional Soil Response Analysis during Earthquakes Based on Effective Stress Method, J. of Fac. Eng., Univ. of Tokyo, 1980