

H-D パラメータによる応力-歪モデルを用いた1次元有効応力解析

—その2 砂質土のせん断強度を規定した基準歪の適用性—

正会員 山崎 久雄*1
同 ○ 中川 佳久*2
同 宮本 裕司*3

表層地盤 地震応答解析 有効応力解析
液状化

1. はじめに

砂質土の基準歪 $\gamma_{0.5}$ には拘束圧の影響があるものの設計実務でそれが的確に評価されていることは多くないと思われる。本報では、前報の有効応力解析法(以下、提案法と記す)を用い、砂質土の $\gamma_{0.5}$ 設定による結果の差異を示し、せん断強度 τ_{max} を規定した $\gamma_{0.5}$ の設定法の適用性を検証する。

2. せん断強度を規定した基準歪の設定

H-D パラメータで表される骨格曲線において、 $\gamma_{0.5}$ 、 τ_{max} 、最大せん断剛性 G_{max} の関係は次式となる。一般には $\gamma_{0.5}$ と G_{max} を与えることが多い。

$$\gamma_{0.5} = \tau_{max} / G_{max} \quad (1)$$

G_{max} を $\rho \cdot V_s^2$ (ρ は密度、 V_s はS波速度)として式(1)で得る $\gamma_{0.5}$ を“ τ_{max} を規定した $\gamma_{0.5}$ ”とする。 τ_{max} は次式で推定できる。

$$\tau_{max} = \sigma'_z \cdot \tan\phi \quad \text{または} \quad \tau_{max} = \sigma'_z \cdot \sin\phi \quad (2a,b)$$

σ'_z は有効上載圧、 ϕ は内部摩擦角で、式(2a)は ϕ をクーロンの破壊基準に適用した場合、式(2b)は ϕ をモールの応力円の接線角度とした場合である。 ϕ は経験式¹⁴⁾¹⁵⁾から推定できる。

3. 基準歪の設定に着目した解析

$\gamma_{0.5}$ の設定に関し、Case1: $\gamma_{0.5}$ の拘束圧を無視しそのまま設定、Case2: 拘束圧を考慮した $\gamma_{0.5}(\sigma'_m)^{10}$ を設定、Case3: τ_{max} を規定した $\gamma_{0.5}$ を設定した3ケースを、前報のKPIとKushiroを対象に解析し観測記録と比較する。地盤データは、深度Z、 ρ 、 V_s 、 $\gamma_{0.5}$ 、最大減衰定数 h_{max} 、液状化パラメータ $R_{15} = \tau_1 / \sigma'_0$ を建築基礎構造設計指針⁴⁾の液状化判定で得るためのN値、細粒分含有率 F_c 、および τ_{max} を得るための ϕ である。

3.1. 神戸ポートアイランド(KPI)

KPIの検討用地盤データ¹⁰⁾を表1に示す。これ¹⁰⁾は前報と ρ が若干異なるがCase2で用いる $\gamma_{0.5}(\sigma'_m)$ が示されている。またN値、 F_c 、 ϕ は前報と同値⁷⁾で、 τ_{max} は式(2a)より求めた。

図1に、各ケースおよび前報の地盤モデルで解析した加速度、せん断歪、過剰間隙水圧比の最大応答値分布を示す。Case3は τ_{max} が共通な前報とほぼ一致した。他方、Case1およびCase2¹⁰⁾による結果は異なった傾向を示した。特に拘束圧を無視したCase1の場合、浅部への応答が減衰し加速度や水圧上昇が小さく求まった。これはGL-19mや-32mの地層境界上部近傍で τ_{max} が小さく評価され、せん断歪 γ が大きく生じたための剛性低下が原因と思われる。

図2~4に、各ケースで解析したGL-0mと-16mでの加速度波形と観測記録の比較を示す。Case3は良好に対応した。Case1およびCase2についてはGL-0mではほぼ対応できたが、GL-16mですでに振幅が小さかつ長周期化された結果となった。これも前述と同じ原因と思われる。

表1 KPI地盤データ¹⁰⁾ (Case3の $\gamma_{0.5}$ は前報の τ_{max} より得た)

Z (m)	ρ (t/m ³)	V_s (m/s)	$\gamma_{0.5}$ (%)			h_{max}
			Case1	Case2	Case3	
2	1.80	170	0.04	9.8e-3~0.017	0.016~0.032	0.24
5	1.80	170	0.04	0.022~0.029	0.053~0.074	0.24
12.6	1.80	210	0.05	0.032~0.040	0.056~0.112	0.24
19	1.80	210	0.05	0.051~0.056	0.119~0.170	0.24
27	1.50	180	0.20			0.20
32	1.85	245	0.05	0.064~0.068	0.159~0.177	0.24

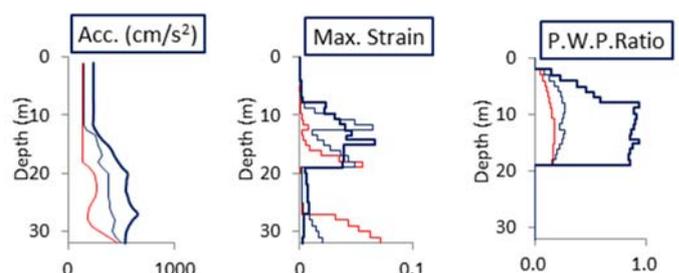


図1 最大応答値分布 (H-Dモデル)

— Case1 — Case2 — Case3

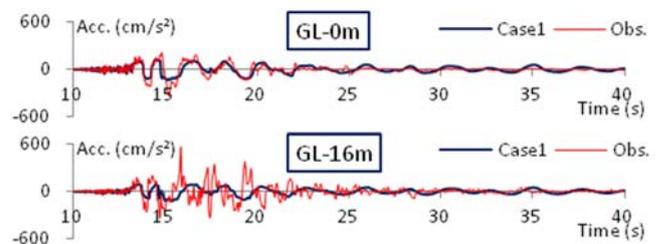


図2 Case1での加速度波形 (H-Dモデル)

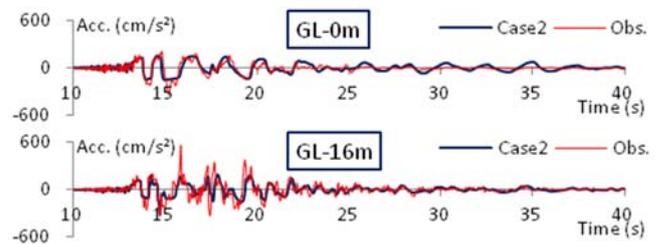


図3 Case2での加速度波形 (H-Dモデル)

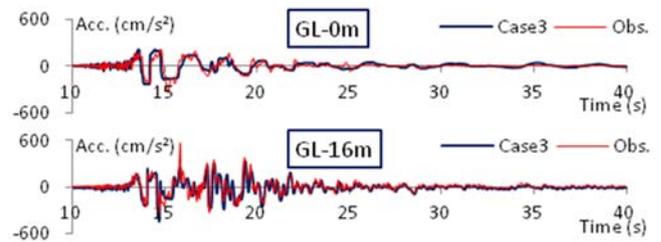


図4 Case3での加速度波形 (H-Dモデル)

3.2. 釧路(Kushiro)

Kushiro の検討用地盤データ⁶⁾を表2に示す。 $\gamma_{0.5}$ と h_{max} は古山田ら¹⁶⁾の提案値(砂質土の $\gamma_{0.5}$ は $\sigma'_m=195\text{kN/m}^2$ 時)である。 F_c と ϕ はN値から推定¹⁷⁾¹⁴⁾し、 τ_{max} は式(2a)で得た。前報のKushiroの解析結果はこのCase3での結果である。

図5に各ケースの最大応答値分布を示す。 $\gamma_{0.5}$ の設定法によりやや差異が生じ、Case1および2はCase3(前報の τ_{max} を規定した $\gamma_{0.5}$ での結果)に比べ、加速度と浅部の γ が小さく、水圧上昇が顕著に小さく求まった。

図6~8に各ケースのGL-0mでの加速度波形と観測記録を示す。観測記録が長周期化する30秒程度まではいずれも良好に対応したが、それ以降、Case1は周期が異なりCase2はサイクリックモビリティが再現できなかった。

KPIおよびKushiroを対象に3ケースの検討を行い、いずれも τ_{max} を規定した $\gamma_{0.5}$ によるCase3がよい対応を示した。

表2 Kushiro 地盤データ⁶⁾¹⁶⁾
(下記の $\gamma_{0.5}$ は砂質土の値、粘性土は $\gamma_{0.5}=0.18\%$)

Z (m)	ρ (t/m ³)	V_s (m/s)	$\gamma_{0.5}$ (%)			h_{max}
			Case1	Case2	Case3	
5	1.80	146	0.10	0.026~0.048	0.034~0.129	砂質土 21%
13	1.95	355	0.10	0.051~0.072	0.023~0.046	
20	1.90	390	0.10	0.074~0.087	0.041~0.057	
24	1.90	282	0.10	0.089~0.092	0.113~0.123	粘性土 17%
52	2.00	324	0.10	0.098~0.139	0.082~0.198	
76	2.00	337	0.10	0.141~0.169	0.191~0.265	

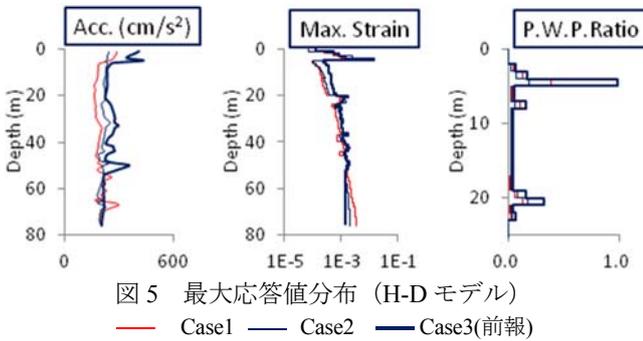


図5 最大応答値分布 (H-D モデル)
— Case1 — Case2 — Case3(前報)

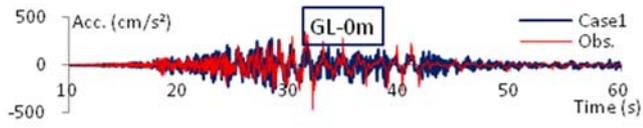


図6 Case1での加速度波形 (H-D モデル)

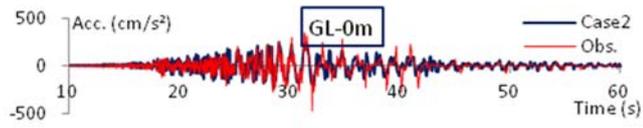


図7 Case2での加速度波形 (H-D モデル)

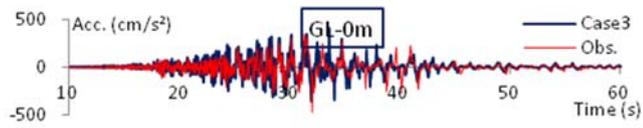


図8 Case3 (前報)での加速度波形 (H-D モデル)

4. 既往の有効応力解析コードとの比較

図9に、 τ_{max} を規定した $\gamma_{0.5}$ を設定した地盤データの既往の有効応力解析コード¹¹⁾との結果比較として、大阪市都島区¹⁸⁾での上町断層帯 A4 ゾーンレベル 3C 設計用地震動¹⁸⁾による最大応答値分布を示す。ただし応力-歪モデルは両者が設定可能な双曲線モデルとし、有効応力解析条件は、提案法では液状化判定による $R_{15} (= \tau_1/\sigma'_0)$ を、既往コードはそれに必要なパラメータを与えた。

両者の結果はよく対応しており、提案法の妥当性を示せた。

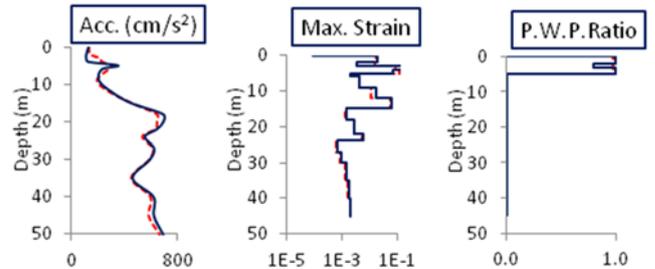


図9 最大応答値分布の比較 (ともに双曲線モデル)
--- 既往のコード — 提案法

5. まとめ

砂質土の $\gamma_{0.5}$ を τ_{max} で規定した解析結果の妥当性を、H-Dパラメータによる応力-歪モデルを用いた有効応力解析および既往の解析コードとの比較で示した。

提案の有効応力解析法や地盤データの設定法は、実務的に簡便であり、応答予測の合理化に向け有効であると考えられる。

謝辞: 東北学院大学の吉田望教授から貴重なご意見やご指摘をいただきました。また応用地質株式会社の須崎敦史氏には解析にご協力いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計, 丸善, 2006.2
- 2) 社本康広ほか: 一次元有効応力解析の実地盤に対する適用性, 日本建築学会構造系論文報告集 第433号, 1992.3
- 3) Ishihara, K. et al.: Modeling of Stress-strain relations of soils in cyclic loading, Fifth International Conference on Numerical Methods in Geomechanics Nagoya, 1985
- 4) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 丸善, 2001
- 5) 神戸市開発局: 兵庫県南部地震による埋立地地盤変状調査報告書 (ポートアイランド, 六甲アイランド), 1995
- 6) 港湾空港技術研究所: 港湾地域強震観測, <http://www.eq.pari.go.jp/>
- 7) 塩見忠彦ほか: 兵庫県南部地震で液状化したポートアイランドの地震応答解析, 日本建築学会学術講演梗概集, 1996.9
- 8) 吉田望: 1995年兵庫県南部地震におけるポートアイランドの地震応答解析, 土と基礎 43-10, 1995.10
- 9) 鈴木善雄ほか: 神戸ポートアイランドの埋立マサ土地盤の静的及び動的強度特性, 日本建築学会構造系論文報告集 第498号, 1997.8
- 10) 日本建築学会: ワークショップ「建物と地盤の動的相互作用の簡易計算法」, 基礎構造系振動小委員会, 2011.1
- 11) 吉田望ほか: YUSAYUSA-2 SIMMDL-2 理論と使用法, 2005.7
- 12) 国生剛治ほか: Modified Hardin-Drnevich モデルについて, 土木学会学術講演会講演梗概集III部, 1978
- 13) Jennings, P.C.: Periodic Response of General Yielding Structure, J. Eng. Mech. Div., ASCE, EM2, 1964
- 14) 畑中宗憲ほか: 砂質地盤の内部摩擦角 ϕ_d と標準貫入試験のN値の関係についての考察, 日本建築学会構造系論文集 第506号, 1998.4
- 15) 大崎順彦: 建築基礎構造, 技報堂出版, 1991.1
- 16) 古山田耕司ほか: 多地点での原位置採取試料から評価した表層地盤の非線形特性, 第38回地盤工学会研究発表会, 2003
- 17) 亀井祐聡ほか: 東京低地における沖積砂質土の粒度特性と細粒分が液状化強度に及ぼす影響, 地盤工学会論文報告集, Vol42, 2002.8
- 18) 日本建築構造技術者協会関西支部: 大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および設計法に関する研究会

*1 ユニオンシステム(株) 振動解析総合推進室
*2 ユニオンシステム(株) 開発部
*3 大阪大学 大学院工学研究科

*1 UNION SYSTEM INC. Dynamic Analysis Research Complex
*2 UNION SYSTEM INC. Development Division
*3 Osaka University Department of Architectural Engineering