

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1 観測記録による検証—

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

液状化地盤の応答評価には有効応力解析が望ましい¹⁾。筆者らは社本ら²⁾が提案した1次元有効応力解析法に、全応力解析で多用されるものの有効応力解析で用いられることの少ないH-Dパラメータ³⁾による応力-歪モデルを2種導入した。1つは既提案³⁾のH-Dモデル、他は後述するようにH-Dモデルをやや弾塑性型になるよう筆者らが定式化したL+Hモデルである。本報は観測記録より解析結果を検証する。

2. 応力-歪モデルと過剰間隙水圧モデルの概要

H-Dパラメータによる土の応力-歪モデルとは、基準歪 $\gamma_{0.5}$ と最大減衰定数 h_{max} より次式で規定されるモデルである。

$$G/G_{max} = 1/(1 + \gamma/\gamma_{0.5}), \quad h = h_{max}(1 - G/G_{max}) \quad (1a,b)$$

γ はせん断歪、 G/G_{max} はせん断剛性比、 h は減衰定数である。

式(1)のH-Dパラメータを満たすモデルとして、履歴曲線を仮想骨格曲線の相似形³⁾としたH-Dモデル(やや紡錘型となる)と、除荷時瞬間剛性を G_{max} とし履歴曲線を線形と双曲線関数の和で表したL+Hモデル(やや弾塑性型となる)を有効応力解析に導入した。L+Hモデルは γ に依存する h と G 、および G_{max} などの既知条件から履歴曲線が決定できる。

過剰間隙水圧やサイクリックモビリティに関する構成則は社本ら²⁾の提案モデルに準じた。詳細は文献²⁾を参照されたい。ただし、社本らは液状化抵抗比に20回繰返し時の R_{20} を用いて定式化しているが、本提案法は建築基礎構造設計指針⁴⁾の液状化判定法に則り15回繰返し時の $R_{15}(= \tau_i/\sigma'_0)$ を用いることも可能とした。破壊線の勾配 M_f は $\tan\phi$ とした。また本提案法は非排水条件とする。

3. 観測記録による検証

検証には、神戸ポートアイランド⁵⁾(1995年兵庫県南部地震)と釧路⁶⁾(1993年釧路沖地震)の観測記録を用いた。前者は少ない繰返し振幅で液状化が、後者は比較的多数の繰返し後にサイクリックモビリティが生じた、象徴的な記録である。

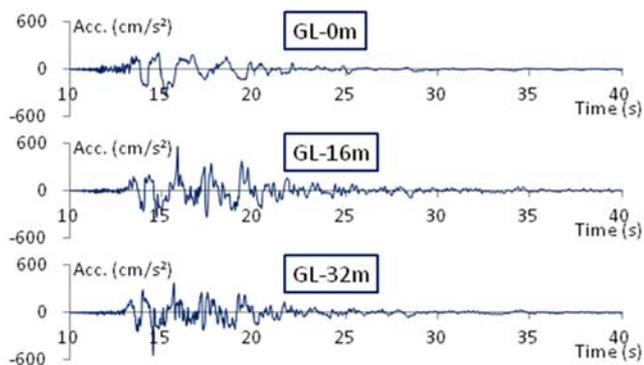


図1 KPI観測記録(NS方向)

3.1. 神戸ポートアイランド(KPI)

KPIでは、GL-32mでの観測記録(加速度)を入力し、GL-16mとGLでの解析結果と観測記録を比較する。図1に観測記録を、表1に地盤データ^{7~10)}を示す。

表1 KPI地盤データ^{7~10)}(σ'_z は地層下端での値)

Z (m)	ρ (t/m ³)	Nave	Fc (%)	ϕ (deg)	σ'_z (kN/m ²)	G_{max} (kN/m ²)	h_{max}	R ₁₅
2	2.0	5.2	8	25.2	39.2	$1e4 \times \sigma'_m{}^{0.5}$	0.24	
5	2.0	5.2	8	32.0	68.6	$1e4 \times \sigma'_m{}^{0.5}$	0.24	0.2
12.6	2.0	6.5	8	33.8	147.1	$1e4 \times \sigma'_m{}^{0.5}$	0.24	0.2
19	2.0	6.5	5	34.8	215.7	$1e4 \times \sigma'_m{}^{0.5}$	0.24	0.2
27	1.65	3.5		(粘性土)	266.3	$4480 \times \sigma'_m{}^{0.5}$	0.20	
32	1.75	13.5		31.43	303.1	$8310 \times \sigma'_m{}^{0.5}$	0.24	

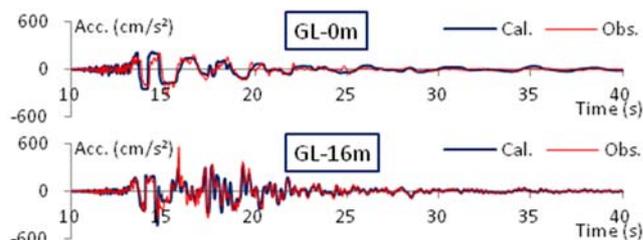


図2 H-Dモデル

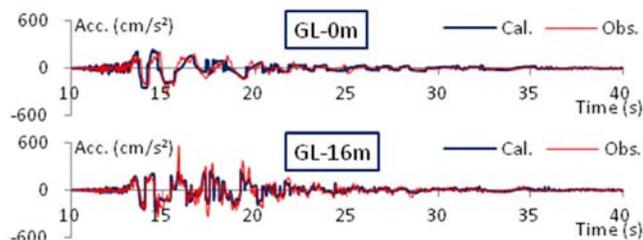


図3 L+Hモデル

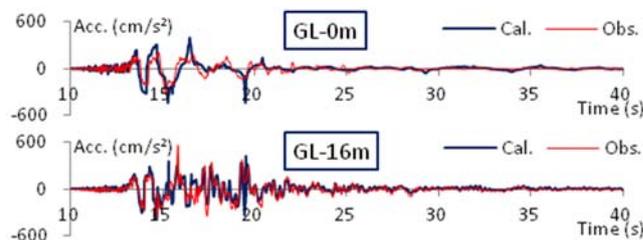


図4 R-Oモデル

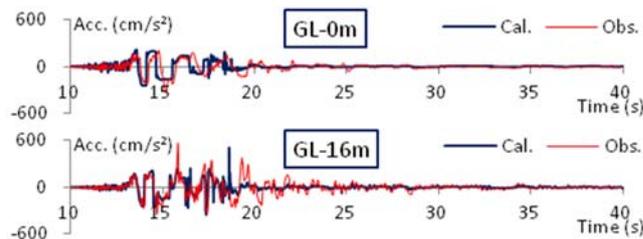


図5 双曲線モデル

表2 Kushiro 地盤データ⁶⁾

Z (m)	ρ (t/m ³)	N-value	V_s (m/s)		
5	1.80	4~17	146	砂 (水位=-2m)	液状化対象層 GL-2m ~24m
13	1.95	27~50	355	砂, 砂質土	
20	1.90	34~50	390	砂, 砂質土	
24	1.90	8~50	282	砂, シルト	
52	2.00	6~50	324	砂, 砂質土, シルト, 礫質土	
76	2.00	40~50	337	砂, 砂質土	

表1の物性値は既往の研究発表値^{7~10)}で、砂質土の初期せん断強度は $\tau_{max} = \sigma'_z \tan\phi$ とした。地下水位はGL-2m、液状化対象層は~GL-19mとした。ここでは既往の解析コード^{例えば¹¹⁾}で多用されている応力-歪モデルの双曲線モデル¹²⁾や R-Oモデル¹³⁾ ($M_f = 1/10^{-1.27+1.66Dr}$ とした²⁾)による解析も行った。

図2~5に各モデルでの加速度時刻歴を示す。H-D, L+Hモデルの対応は良好である。R-OモデルはGLで振幅が若干大きく、双曲線モデルは位相がやや異なった。図6に応答スペクトルを示す。GLではH-D, L+Hモデルの対応は良好であるが、GL-16mはいずれの解析値もやや下回る結果となった。図7にGL-16mでの有効応力経路と応力-歪関係を示す。

概してH-Dパラメータによる応力-歪モデルを用いた結果はKPI観測記録を良好に再現できている。

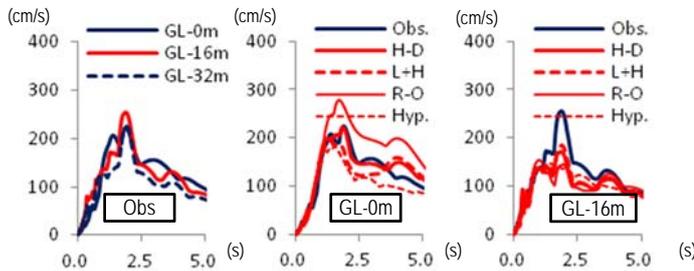


図6 擬似速度応答スペクトル ($h=5\%$)

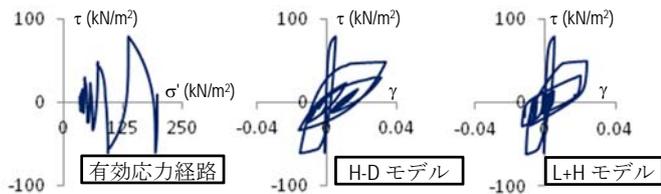


図7 GL-16mの有効力経路と応力-歪関係

3.2. 釧路(Kushiro)

Kushiroでは、GL-77mでの観測記録(加速度)を入力し、GLでの解析結果と観測記録を比較する。図8に観測記録を、表2に地盤データ⁶⁾を示す。ここでも砂質土の初期せん断強度は $\tau_{max} = \sigma'_z \tan\phi$ とし (ϕ は畑中ら¹⁴⁾の式より)、液状化抵抗比 R_{15} は液状化判定結果を用いた(詳細は次報)。

図9はH-DとL+Hモデルでの地表加速度と観測記録との比較で、両モデルとも振幅に僅かな差異はあるが、サイクリックモビリティを含め概ね再現できた。図10は両モデルでの応答スペクトルであり、ともに観測記録にほぼ対応した。図11はGL-5mでの応力-歪、過剰間隙水圧比、有効応力経路、また図12は加速度、せん断歪、過剰間隙水圧比の最大値分布で、いずれもL+Hモデルでの結果である。

H-D, L+Hモデルとも、サイクリックモビリティが特徴的なKushiro観測記録についても良好な結果を得た。

4. まとめ

社本らが提案した1次元有効応力解析法に、H-Dパラメータによる応力-歪モデル(H-DおよびL+Hモデル)を導入した。またそれらの解析結果をKPIおよびKushiroの観測記録で検証し、いずれも妥当であることを示した。

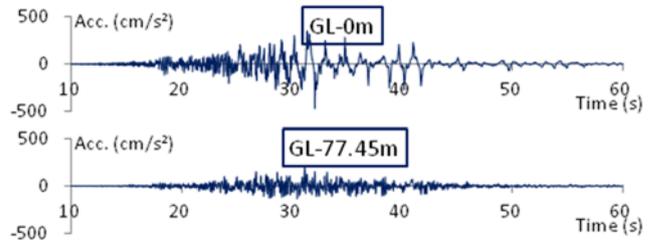


図8 Kushiro 観測記録 (NS方向)

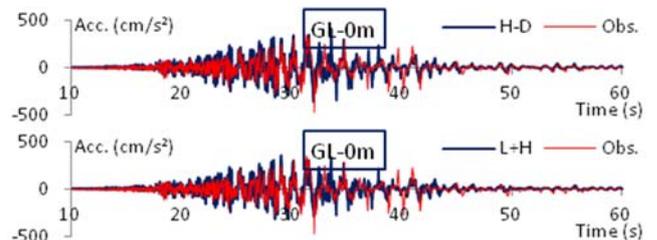


図9 解析結果 (NS方向)

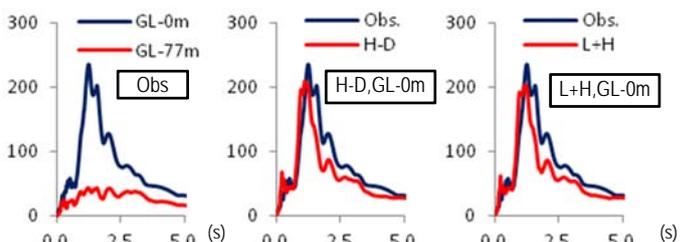


図10 擬似速度応答スペクトル ($h=5\%$)

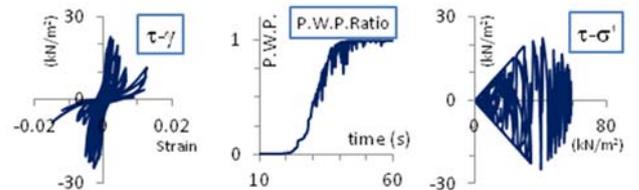


図11 GL-5mでの応答 (L+Hモデル)

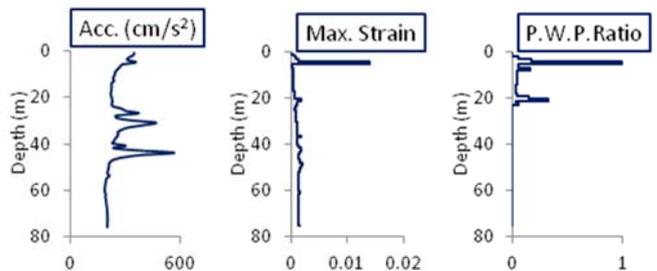


図12 最大応答値分布(L+Hモデル)

参考文献は次報にまとめて記す

*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