

地震動の再来による粘土地盤の動的挙動変化

奥村組 技術研究所 ○日下部 伸, 電算センタ 森尾 敏, 小田 恵之輔

1. まえがき

鋭敏な粘土層の厚さが厚くなるほど、地表での地震時被害が大きくなった事例が、岩崎ら¹⁾により示されている。液状化した砂層が免震的な役割を果たす場合もあれば、砂の液状化ほど剛性が低下・激変しない粘土層が、地震動の増幅を継続させることも予想される。砂地盤よりも危険な応答を示す可能性のある自然粘土の地震時挙動を、「繰返し載荷」ではなく「動的な実験手法」で定量的に検討した例は少ない様に思われる。本稿は、粘土地盤が地震動を繰返し受けた場合の挙動変化をオンライン地震応答実験手法²⁾で調べたものである。実験には、化学的結合作用が卓越した正規圧密エージド粘土に分類される自然粘土と工学的に等価な模擬自然粘土³⁾を用いた。

2. オンライン地震応答実験手法の概念

オンライン実験は、慣性力の作用による動的な地震時挙動を模擬するもので、文字どおり動的な地盤挙動を調べることが可能である。この手法では、図-1(a)に示す様にN層から成る解析対象地盤をN自由度の質点系にモデル化し、基盤から地震動を入力する。システムは、図-1(b)の左半分に示す地震応答計算部と右半分に示す要素試験の計測・制御部から成る。応答計算で得られた応答変位に相当するせん断ひずみを各層を代表する供試体にそれぞれひずみ制御方式で加え、復元力（せん断応力）を自動計測する。この値を次の解析ステップの応答計算部にオンラインで送り返す。この過程を繰返すことにより地震時挙動を模擬する。

3. 実験・解析条件

模擬対象の不攪乱有明粘土と模擬自然粘土の素材として使用した有明粘土の物理的性質を表-1に示す。素材の有明粘土を液性限界の3倍の含水比でスラリー化した試料1000cm³に対し、早強セメント10.00gを混合し、有効土被り圧まで圧密して供試体を作製した。地盤生成時の自重圧密による密度増加速度と化学的結合速度の比を制御する詳細は、文献3)を参照されたい。作製した供試体（材令38日）の定ひずみ速度圧密試験結果を図-2に、異方圧密・非排水三軸圧縮試験結果を図-3（破線）に示す。オンライン応答実験に用いた供試体（材令54日）の異方圧密・非排水三軸圧縮試験結果は図-3の実線である。非排水せん断挙動と圧縮挙動が極めて密接な関係にある⁴⁾事実を考慮すれば、応答実験で使用した模擬自然粘土が工学的に不攪乱有明粘土と大筋で類似であることが知れる。

表-2に解析条件を示す（地下水位は-0.7m）。基盤上の層厚18mの水平地盤を8層に分割し、解析対象とした。このうち、深度4~6mの第4層の復元力をオンライン実験により実測し、他の7層は線形弾性計算により復元力を算定し地盤全体の応答実験・解析を実施した。この解析条件は、必ずしも現実の地盤をそのまま再現するものではない。しかし、着目する特定層の動的挙動を簡便に抽出できる解析条件とも言える。入力波は、文献5)の委員会が設定した加速度波形とした（最大加速度=150 gal）。

応答実験には外径100、内径60、高さ100mmの中空円筒状の供試体を用いた。異方圧密（ $K=0.45$; $\sigma_1=0.25$, $\sigma_3=0.113\text{kgf/cm}^2$; この時の体積ひずみ ε_{v0} は0.84%）後、非排水ねじり単純せん断条件でオンライン実験を実施した。最初の実験（No. (1)）が終了後、初期の有効応力状態の下で再圧密し、同一条件でオンライン実験を実施する過程をさらに3回（No. (2), (3), (4)）繰返した。再圧密時の体積ひずみ $\varepsilon_{v1, 2, 3, 4}$ は、各々0.43, 0.33, 0.25, 0.20%であった。

4. 応答実験結果と考察

オンライン実験を実施した第4層（模擬自然粘土）のせん断応力～せん断ひずみ関係、有効応力経路を図-4, 5（各々No. (1), (2), (3), (4)）に示す。これらの図より、① 最初の地震時(1)にA点で明らかな降伏（やや軟化）を示すがそれ以降の地震時にはこの傾向は認められない② 最初の地震時(1)に比べ2回目の地震時(2)では、せん断ひずみ γ が1%未満でせん断剛性Gの低下が大きいが1%以上ではGの低下が小さい③地震動の繰返しと再圧密を受けることにより履歴曲線及び有効応力経路の形状が収束していく事が知れる。図-7に速度応答の時刻歴を示す。4回にわたる地震時の速度応答には、細部を除き顕著な差異が無い。この理由として、全ての地震時に γ が、1秒後に0.1%、4秒前後に1%以上に達し、復元力に大差の無い大きなひずみ領域での応答が大部分を占めていることがあげられる。物性の観点からは、年代効果で付加された物性のせん断変形による変化と、変形後の再圧密により形成された物性が結

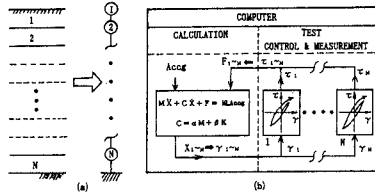


図-1 オンライン地震応答実験の概念

表-2 解析条件

深度 (m)	土層分割	湿潤密度 (t/m ³)	せん断剛性 G (kgf/cm ²)
0~1	(1) M1	1.36	30
1~2	(2) M2	1.36	30
2~4	(3) M3	1.36	40
4~6	(4) S2	1.36	オンライン
6~9	(5) M4	1.9	650
9~12	(6) M5	1.9	650
12~15	(7) M6	1.9	1111
15~18	(8) M7	1.9	1111

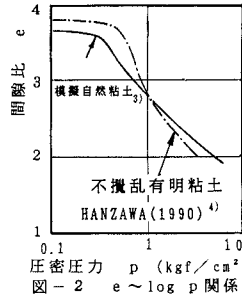


図-2 $e \sim \log p$ 関係

表-1 粘土の物理的性質

	素材の有明粘土	不攪乱有明粘土 ⁴⁾
採取深度 (m)	GL=0.5~2.0	GL=4.2~5.6
液性限界 (%)	105.0	90~100
塑性限界 (%)	44.7	40
塑性指数	60.3	50~60
自然含水比 (%)	118	106~118
液性指数	1.2*	1.3

*印は模擬自然粘土の値

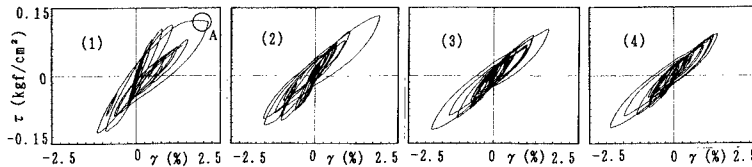


図-4 せん断応力～せん断ひずみ関係

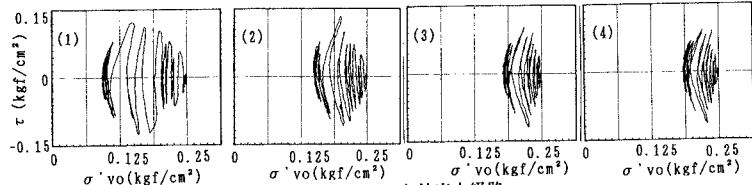


図-5 有効応力経路

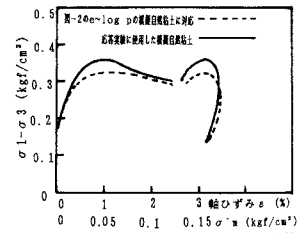


図-3 主応力差～軸ひずみ・有効応力経路

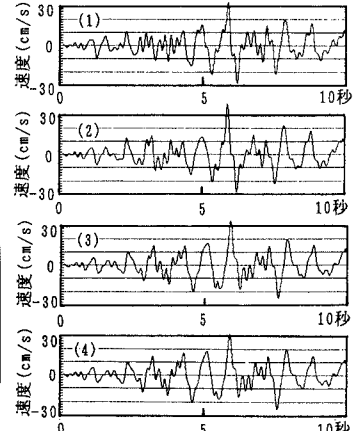


図-7 速度時刻歴

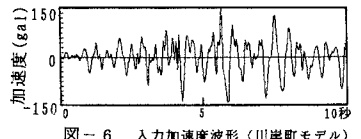


図-6 入力加速度波形（川岸町モデル）

抗したことが考えられる。この点は、大ひずみ領域に限定すれば各地震前後の復元力特性が比較的類似であることと整合している。従って、砂の液状化ほど剛性が低下・激変しない粘土層は、再来地震においても地震動の増幅を継続させることが予想される。

5. あとがき

化学的結合作用が卓越した正規圧密エージド粘土に分類される自然粘土と工学的に等価な模擬自然粘土を用い、粘土地盤が地震動を繰返し受けた場合の挙動変化をオンライン地震応答実験手法で調べた。自然粘土は復元力特性が砂の液状化ほど地震中、あるいは地震後に激変しないこと、そのため再来地震においても地震動の増幅を継続させることを示唆する応答実験結果が得られた。

参考文献

- 1) 岩崎好規, 諏訪靖二, 山本浩司(1991): 地盤データベースによる東大阪の歴史地震被害と鋭敏粘土の解析, 「土木学会第46回年次学術講演会」, III, pp. 18~19.
- 2) 日下部 伸, 森尾 敏, 有本 勝二(1990): オンライン地震応答実験による2層系砂地盤の液状化挙動, 「土質工学会論文報告集」, Vol. 30, No. 3, pp. 174~184.
- 3) 日下部 伸, 森尾 敏(1995): 模擬自然粘土の作製法とその圧縮・せん断挙動, 「土木学会論文集」, No. 511/III-30, pp. 145~154.
- 4) Hanzawa, H., Fukaya, T. and Suzuki, K. (1990): "Evaluation of engineering properties for an Ariake clay," Soils and Foundations, Vol. 30, No. 4, pp. 11~24.
- 5) (社) 土質工学会(1989): 地盤と土構造物の地震時の挙動に関する研究委員会, シンポジウム論文集, pp. 50~61.