

◆ ダム分野における新技術特集 ◆

締め固めた土質材料の地震時強度特性

松尾 修* 田本修一**

1. はじめに

土質材料を堤体材料とするアースダムは近年建設省ではほとんど築造されていない。これは、土質材料はロック材に比べてせん断強度やバイピングなどに対する十分な抵抗を確保しがたいなどの理由によるものと考えられる。また、過去の地震において、アースダムの一種である古い時代に築造された灌漑用堰堤が致命的な被害を受けた例が国内外で見られる¹⁾。その代表的な例が、1971年米国サンフェルナンド地震におけるロワーサンフェルナンドダム (Lower San Fernando Dam) の崩壊である。堤高 43m のアースダムの堤頂を含む上流側のり面に非常に深いすべり崩壊が生じた。水締め工法で築造された砂質土の上流側堤体が液状化したことが崩壊原因とされている²⁾。この水締め工法は、土砂と混合物を連続的に送り、土粒子の自重による沈降、堆積を利用して締め固めるため、極めて密度の緩い状態が生じ得る。

他方、粗粒土に属する土質材料では、十分に締め固めを行えば、高い地震時せん断強度を得ることができることが近年の研究でわかってきていている。たとえば、砂質土を密に締め固めるとその非排水繰返し強度は排水せん断強度以上になり得ることが知られている³⁾。

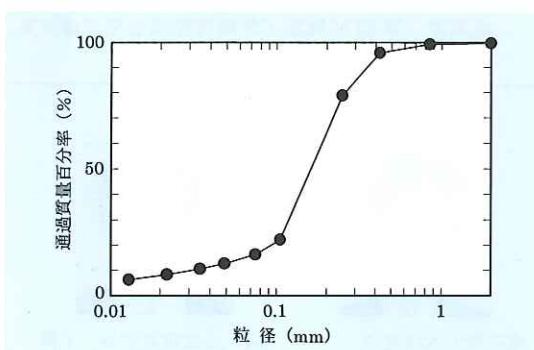


図-1 江戸崎砂の粒径加積曲線

したがって、アースダムであっても適当な材料を用いて十分な転圧により築造されておれば、十分な耐震性を確保できる可能性が高いと考えられる。また、アースダムの耐震性を含めた安全性が確認されれば、建設も可能となり、ダム建設のコスト縮減にも貢献しうると考えられる。

そこで、本研究では、アースダムの耐震性を検討するに当たっての基礎的研究として、土質材料の締め程度及び締め方法と動的強度特性の関係について実験的な検討を行った。

2. 実験の概要

本実験の目的は、転圧されて形成されたアースダム材料が浸透水により飽和した状態で地震動の作用を受けたときに発現する繰返し強度特性を把握しようとするものである。土質材料の繰返し強度特性は締め方法により大きな違いが生じ得ることが既往の研究により明らかにされている^{3),4)}。しかし、実機転圧と室内突固めとの差違については調べられていない。

そこで、ここでは実機転圧と室内突固めの違い、及び締め含水比が砂質土の非排水繰返し強度に及ぼす影響について実験的に調べた。

締固めは振動ローラ、タイヤローラによる転圧、及びランマーを用いた室内突固め法によった。締め固めて得られた試料を非排水繰返し三軸圧縮試験に供した。最後に、このようにして得られた繰返し強度を、締め方法、締め含水比等の観点から比較考察した。

3. 実験方法

(1) 試料

実験に用いた試料は茨城県江戸崎町の台地から採取した砂(以下江戸崎砂と呼ぶ)である。粒径加積曲線を図-1 に、主な物理特性を表-1 にそれぞれ示す。

(2) 締固め

室内突固めでは、地盤工学会基準「突固めによる

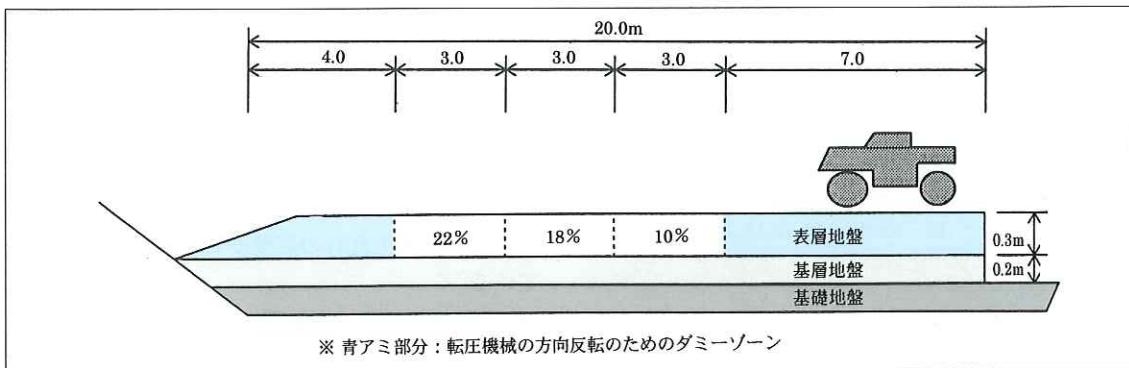


図-2 実機転圧の方法

表-1 主な物理特性

土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.759
平均粒径 D_{50} (mm)	0.16~0.17
均等係数 U_c	5.1~6.6
細粒分含有率 F_c (%)	15~17
最大乾燥密度 * $\rho_d \text{max}$ (g/cm ³)	1.328
最小乾燥密度 * $\rho_d \text{min}$ (g/cm ³)	0.986
日本統一土質分類	砂質土

* 「砂の最大密度・最小密度試験」⁵⁾による。

表-2 転圧機械の仕様

振動ローラ	総重量 (kN)	60.6
	ドラムの直径 × 幅 (mm)	1,050×1,420
	起振力 (kN)	100
	振動数 (Hz)	55
タイヤローラ	総重量 (kN)	83.4
	駆動	前輪3輪 後輪4輪
	タイヤ1輪当たり荷重	前輪 10.4kN 後輪 13.0kN

締固め試験 (A-b 法)⁵⁾によるもののほか、締固めエネルギーをその 2 倍、3 倍として締固め試料を準備した。これらの試料をそれぞれ $E_c = 100, 200, 300\%$ 試料と呼ぶ。締固め含水比は上記試験による最適含水比 18% を含む 5 種類の値を採用した。

実機転圧は振動ローラおよびタイヤローラを用いて行った。これらの主な仕様を表-2 に示す。図-2 に示す幅 4m、長さ 20m の室内ピットにおいて、まず上記試料を用いて十分に転圧した層厚 20cm の基層地盤を形成した。つぎに、その上に予め 3 種類の含水比に調整しておいた試料をゾーン毎に撒き出した。各々のゾーンは長手方向に 3m の幅をとり、さらにその前後には転圧機械の

進行を反転させるダミーゾーンを設けた。含水比は室内標準締固め試験における最適含水比 18%、及び乾燥側の 10%、湿潤側の 22% である。転圧回数は、 $w = 18\%$ のゾーンの締固め密度を RI 水分密度計でモニタリングしながら調整し、室内締固めにおける締固め密度にほぼ達したと判断した時点でのブロックサンプリングを行い、試料を採取した。

(3) 繰返し非排水三軸試験

繰返し三軸試験は、直径 5cm、高さ 10cm に成形した供試体を飽和させた後、背压 196kPa または 294kPa、有効拘束圧 98kPa で等方圧密し、0.1Hz の正弦波軸荷重を載荷することにより行った。供試体の飽和度を示す指標である B 値は 0.95 以上であった。それぞれの締固め条件により得られた試料につき 4 供試体を繰返し三軸試験に供し、繰返し回数 20 回で両振幅ひずみが 5% となる繰返せん断応力比 R を求め、これを動的強度比 R_f と定義した。

$$R = \sigma_{1d} / 2\sigma_{c'}$$

$R_f = R$ (繰返し回数 20 回で軸ひずみ両振幅が 5%)

ここに、

σ_{1d} : 繰返し軸差応力

$\sigma_{c'}$: 有効拘束圧

試験条件を表-3 にまとめて示す。

4. 実験結果

(1) 締固め特性

はじめに室内締固めおよび実機転圧により得られた試料の乾燥密度-含水比関係を図-3 に示す。同図には予め実施した締固め試験の結果を併記

表-3 繰返し非排水三軸試験条件

供試体作成方法	締固め程度*	締固め含水比(目標値)W(%)	供試体本数
室内突固め	$E_c=100\%$	10,14,18,22	16
	$E_c=200\%$	10,18,20,22	16
	$E_c=300\%$	10,16,18,20	16
振動ローラ	N=18	10,18,22	12
	N=40	10,18,22	12
タイヤローラ	N=14	10,18,22	12
	N=90	10,18,22	12

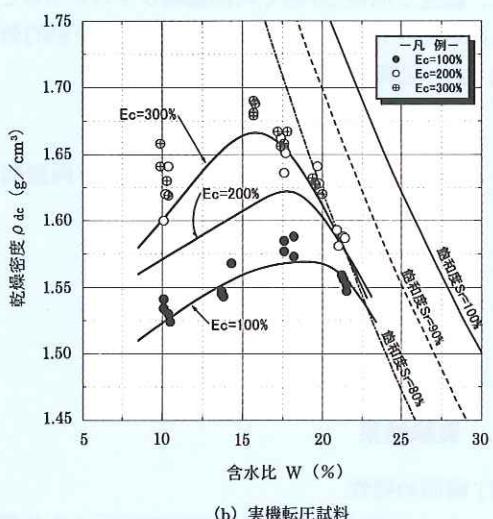
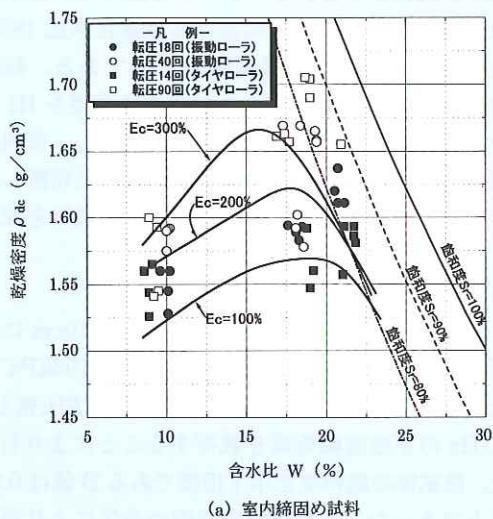
* E_c : 締固めエネルギー、N : 転圧回数

図-3 試料の乾燥密度と含水比の関係

している。室内締固め試料については全体的に締固め試験結果よりもやや高めの密度となっているが、全体の傾向はおおむね一致しているのがわかる。一方、実機転圧試料についてはややばらつきが大きい。このばらつきの原因については主な要因として転圧ピットの境界条件の影響、不搅乱試料採取時点での乱れの影響があったものと推測している。

(2) 非排水繰返し三軸試験結果

図-4に繰返し三軸試験結果の一例を示す。これは振動ローラで18回転圧して得られた供試体に有効拘束圧98kPaの下で片振幅62kPaの繰返し軸差応力を載荷したものである。繰返し回数7回目付近で過剰間隙水圧比が約80%に達し、軸ひずみ振幅が伸び始めているのがわかる。このような試験をそれぞれの締固め方法、締固め含水比条件の下で繰返し応力レベルを4段階に変えて1組の試験結果を得た。それぞれの試験結果から、軸ひずみ両振幅(ε_{DA})が5%に達する繰返し載荷回数を読みとり、繰返し応力比との関係にプロット

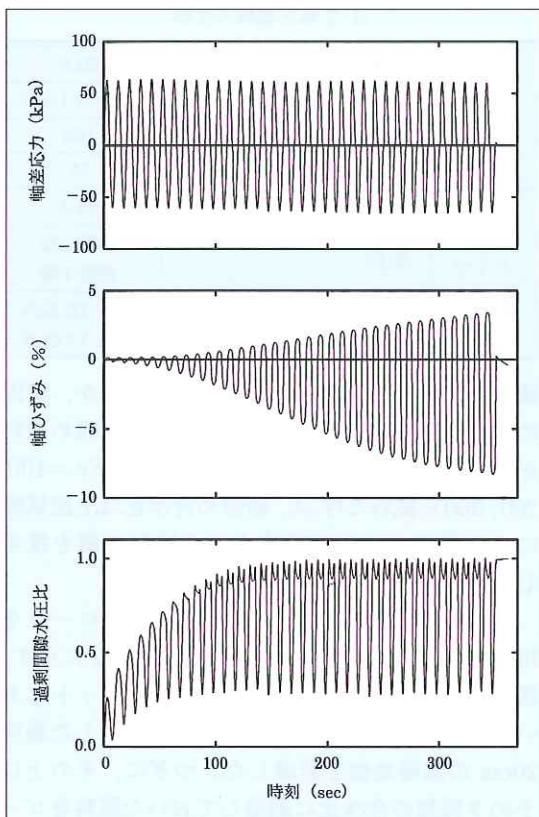


図-4 繰返し三軸試験結果の一例
(振動ローラ転圧回数18回、締固め含水比18%)

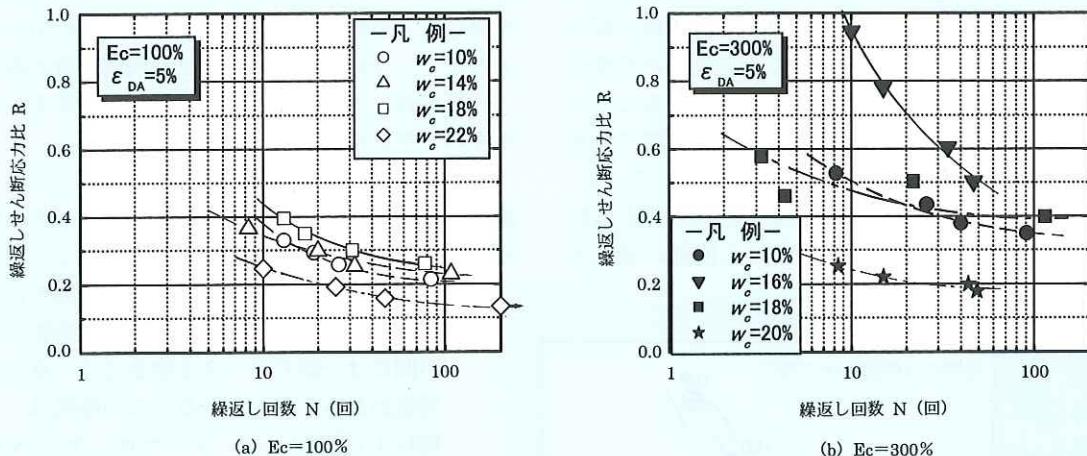


図-5 繰返しせん断応力比と繰返し回数の関係(室内締固め試料)

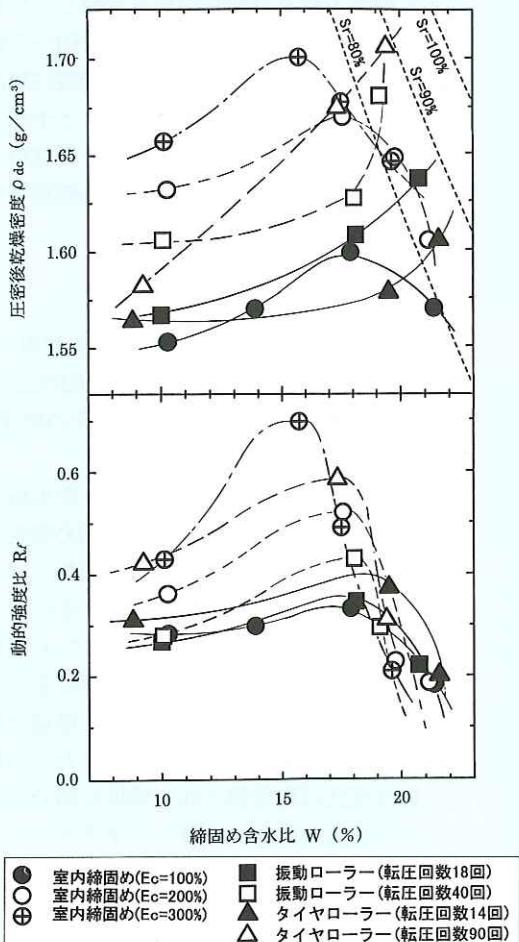


図-6 締固め含水比と乾燥密度、動的強度比の関係

して疲労曲線を得た。一例として、室内突固めによる試料についての結果を図-5に示す。同図より、ここで、図中の凡例 W_C とは、目標締固め含水比を表している。締固めエネルギーが高いほど繰返し応力比が大きくなることがわかる。これは、密度が高くなることによっている。一方、締固め含水比の影響について見ると、いずれの締固めエネルギーの下でも、最適含水比に近い $w=16$ ないし 18% 付近で繰返し応力比が最も大きくなっていることがわかる。

つぎに、締固め含水比と乾燥密度、動的強度比の関係を観察するために図-6を作成した。この図で、締固め含水比及び乾燥密度は4供試体の平均値をとり、動的強度比は図-5に例示した疲労曲線から、定義に従い繰返し回数20回に相当する応力比を読み取ったものである。同図より、締固め曲線は室内締固め試料については含水比16ないし18%でピークを持っているが、実機転圧試料については右上がりの傾向を持ち、締固め曲線としてはやや不自然な結果である。この点は、上記(1)に述べたことが原因していると推測されるが、原因を明確にできなかった。一方、動的強度比についてみると、おおむね最適含水比付近でピークを示していること、最適含水比よりも湿潤側では動的強度比が著しく低下していることがわかる。

つぎに、図-6の結果を締固め密度と動的強度比の関係に再整理して図-7を得た。図中の線は、同じ締固めエネルギーの点を結んでいる。同図中

よりいずれの締固め方法においても、最適含水比より乾燥側で締め固められた試料と湿潤側で締め固められた試料を比べると、たとえ締固め密度が同じでも動的強度には著しい差が生じることがわかる。今回用いた試料については湿潤側で締め固めて得た試料の強度が著しく低くなっている。以上のこととは、筆者らが以前に他の砂質土試料について行った同様の試験⁶⁾でも同様の結果を

得ている。一般に砂質土においては、締固め方法が異なると土粒子構造に差が生じることが知られており⁷⁾、今回用いた試料では湿潤側で締め固められた場合により不安定な土粒子構造が形成されたものと考えられる。

最後に、室内締固めと実機転圧の違いについて調べてみる。図-8は、図-7に示したデータの中から、同一の締固め含水比のものを抽出して整理したものである。この図から、締固め含水比が同じであれば締固め密度と動的強度比の間には一部のデータを除きほぼ一意的な関係があることがわかる。この結果は、実機転圧(振動ローラ、タイヤローラ)と室内締固めの締固めメカニズムが類似していたものと推測される。言い換えれば、土質材料を実機転圧により盛り立てて堤体を築造する際に予めその動的強度を評価したい場合には、室内突固めにより現場と同一の締固め含水比の下で所定の締固め密度に締め固めた試料を試験に供すればよいと予想される。なお、このことが多様な土質材料について成り立つかどうかは、別途確認試験が必要であろう。

5. まとめ

本研究では、ある特定の砂質土を対象に、締固め方法、締固め含水比が動的強度比に及ぼす影響を実験的に調べた。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 締め固められた土の飽和非排水繰返し強度比(動的強度比)は、締固め密度のみとの間に必ずしも一意的な関係ではなく、締固め含水比の影響を強く受ける。
- (2) 最適含水比で締め固められた土の動的強度比が最も高く、締固め度に応じて高い応力比が得られた。また、最適含水比よりも湿潤側で締め固められた土の動的強度比は乾燥側で同一密度に締め固められたものに比べて著しく小さかった。
- (3) 同一の含水比条件で締め固められた土の動的強度比は、ここで用いた締固め方法、エネルギーによらず、締固め密度との間にはほぼ一意的な関係があるようである。

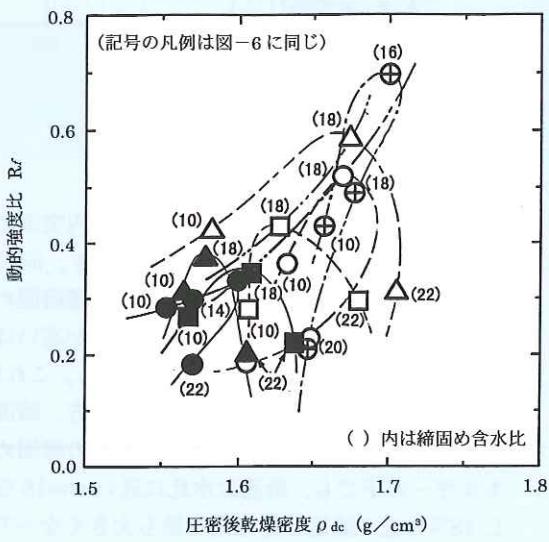


図-7 締固め密度と動的強度比の関係(全試料)

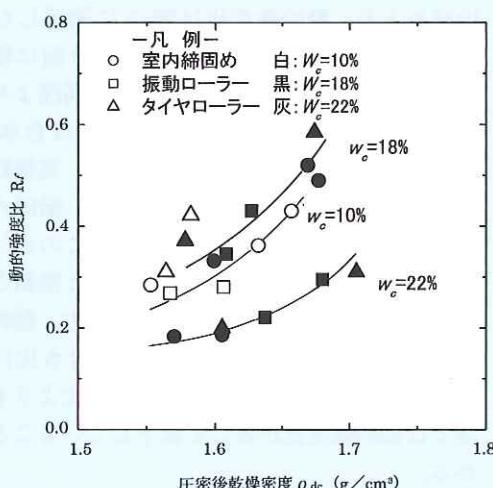


図-8 締固め密度と動的強度比の関係(締固め含水比別)

今後、アースダムの模型振動実験を行うことにより、堤体の締固め密度と耐震安定性の関係を調べ、さらには耐震性評価法の確立をめざす予定である。

参考文献

- 1) 谷茂、堀俊和：日本におけるため池を含めた農業用フィルダムの地震災害に関する研究、農業工学研究所報告、第37号、pp.51-90、1998。
- 2) Seed,H.B., K.L.Lee, I.M.Idriss and F.I.Makdisi: The slides in the San Fernando Dams during the earthquake of February 9, 1971, J.GED, ASCE, Vol.101, No.GT7, pp.651-688, 1975.
- 3) Tatsuoka, F., K.Ochi and S.Fujii: Effect of sample preparation method on cyclic undrained strength of sand in triaxial and torsional shear tests, Bulletin of ERS, No.17, 1984.
- 4) Mulilis, J.P., H.B.Seed and C.K.Chan : Effects of sample preparation on sand liquefaction, J.GED, ASCE, Vol.103, No.GT2, pp.91-108, 1977.
- 5) (社)地盤工学会：土質試験の方法と解説、1990。
- 6) 古賀泰之、松尾修、島津多賀夫、唐沢安秋：フィルダム材料の動的強度に関する実験報告書、土木研究所資料第2755号、1989。
- 7) Oda, M. : Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular material, Soils and Foundations, Vol.12, No.1, pp.17-36, 1972.

松尾 修*



建設省土木研究所
耐震技術研究センター
動土質研究室長
Osamu MATSUO

田本修一**



同 動土質研究室研究員
Shuichi TAMOTO