

豪雨・地震の複合災害に備えた盛土強靱化技術

足立有史・西尾竜文

近年、豪雨や地震等の自然災害の大規模化、頻発化による河川堤防やため池など既設盛土構造物における被害が増加している。豪雨と地震が同時期に発生すれば被害はさらに甚大なものとなることも予想される。このような背景から豪雨、地震の複合的な災害に対する合理的な対策工法として「止水性および透水性改良を組み合わせた盛土強靱化技術」（以下「本技術」という）を開発した。本稿では、本技術の対策効果の検証のための遠心模型実験と数値解析とともに、施工の高速化や経済性の向上等を目的とした中層混合処理工法の改良について報告する。

キーワード：盛土、基礎、堤体、浸透、地震、液状化、地盤改良

1. はじめに

近年、豪雨や地震等の自然災害の大規模化、頻発化による河川堤防やため池など既設盛土構造物における被害が増加している。豪雨と地震が同時期に発生すれば被害はさらに甚大なものとなることも予想される。国土交通省「総力戦で挑む防災・減災プロジェクト」¹⁾の主要施策の一つでもある流域治水への転換を推進する上で、河川施設の強化対策をはじめ確実かつ合理的な対策技術の開発が求められている。このような背景から既設の堤体盛土を対象に豪雨、地震の複合的な災害に対する合理的な対策工法として「本技術」を開発した。本稿では、本技術の対策効果の検証のための遠心模型実験と数値解析とともに、施工の高速化や経済性の向上等を目的とした中層混合処理工法の改良について報告する。

2. 本技術の概要

図-1、写真-1に新たに開発した本技術の概要図と透水性改良体を示す。本技術は河川堤防などの堤体盛土を対象に川表側の法尻付近に止水性改良体を、また川裏側に透水性改良体を構築するものである。止水性改良体は、原地盤とセメントスラリーを混合して造る一般的なセメント固化改良体である。一方、透水性改良体は、碎石や礫等に少量のセメントスラリーと水中不分離材を添加し、空隙を確保した状態で固化した改良体であり、高い透水性とせん断強度を有して

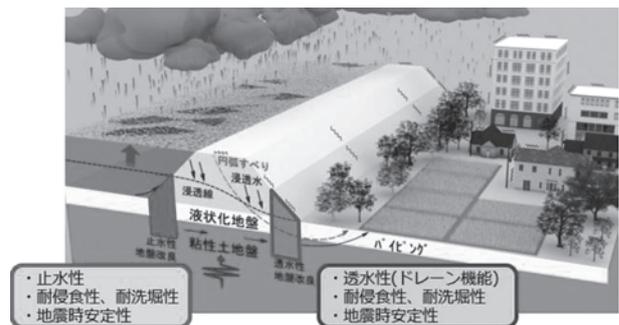


図-1 本技術概要図



写真-1 透水性改良体

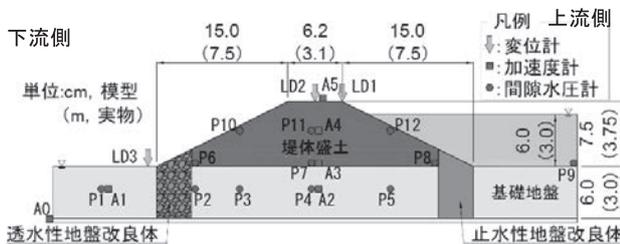
いる。豪雨による河川水位が上昇した際、川表側の止水性改良体は、堤体内への河川水の浸入や流水による法尻部の侵食を抑制する。一方、川裏側の透水性改良体は、堤体内の浸透水を速やかに排水することで、堤体内の水位上昇を抑制する効果がある。また、水位上

昇に伴う法尻部のパイピングや越水時の法尻洗堀を防止する効果も期待できる。地震時には、両側の改良体により基礎地盤および堤体盛土の変形を抑制する。本技術は、これらの効果により豪雨・地震の複合的な災害による堤体盛土の不安定化を防止するものである。

3. 遠心模型実験による効果検証

(1) 実験概要

図一2に模型概要図を、表一1に模型材料一覧を示す。基礎地盤は、東北硅砂6号を用いて水中落下法により作製した。堤体盛土は実際の河川堤防を想定し細粒分を含み、締固め度も $D_c = 85\%$ と比較的低い状態とした。対策工として用いた改良体は事前に作製したものを土槽底部に設置した後に基礎盛土地盤を構築した。間隙水は、遠心力場 (50 G 場) の相似則に基づき、メトロズ水溶液 (粘性係数 $\eta = 50 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) を使用した。実験ケースを表一2に示す。図一3に上流側水位と入力加速度波形を示す。実験は、①上流側の水位の上昇、②堤体内の間隙水圧計の値が一定値を示すまで保持、③定常状態を確認した後に加振、の手順で実施した。なお、加振は本加振 250 Gal に先立ち予備加振を実施した (本加振の 1/10)。



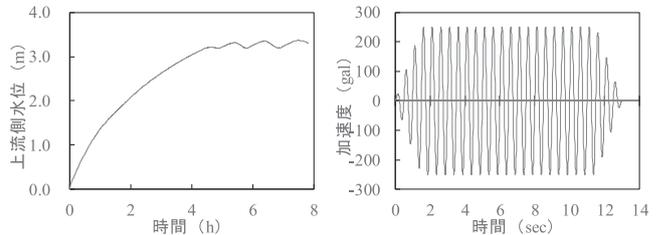
図一2 模型概要図

表一1 模型材料一覧

モデル名	材料	物性等
堤体盛土	日光硅砂 4 ~ 8 号 カオリン粘土	$D_{\max} = 2.0 \text{ mm}$, $U_c = 5.7$, $D_c = 85\%$, $\rho_d = 1.591 \text{ g/cm}^3$, $w_{\text{opt}} = 11.6\%$, $k = 2.71 \times 10^5 \text{ m/sec}$
基礎地盤	東北硅砂 6 号	$D_r = 85\%$, $\rho_d = 1.621 \text{ g/cm}^3$, $k = 5.6 \times 10^4 \text{ m/sec}$
止水性改良体	セメント改良体	$\rho_d = 1.795 \text{ g/cm}^3$ $k = 6.8 \times 10^{10} \text{ m/sec}$
透水性改良体	ポーラスコンクリート	$\rho_d = 1.836 \text{ g/cm}^3$, $k = 5.8 \times 10^3 \text{ m/sec}$
間隙水	粘性流体	$\eta = 50 \text{ mPa}\cdot\text{s}$

表一2 実験ケース

ケース名	対策	
	上流側	下流側
CASE1	なし	なし
CASE2	止水性改良体 2.0 m	透水性改良体 2.0 m
CASE3	止水性改良体 4.0 m	透水性改良体 4.0 m



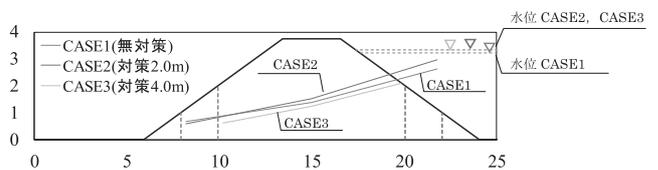
図一3 上流側水位と入力加速度波形

(2) 実験結果

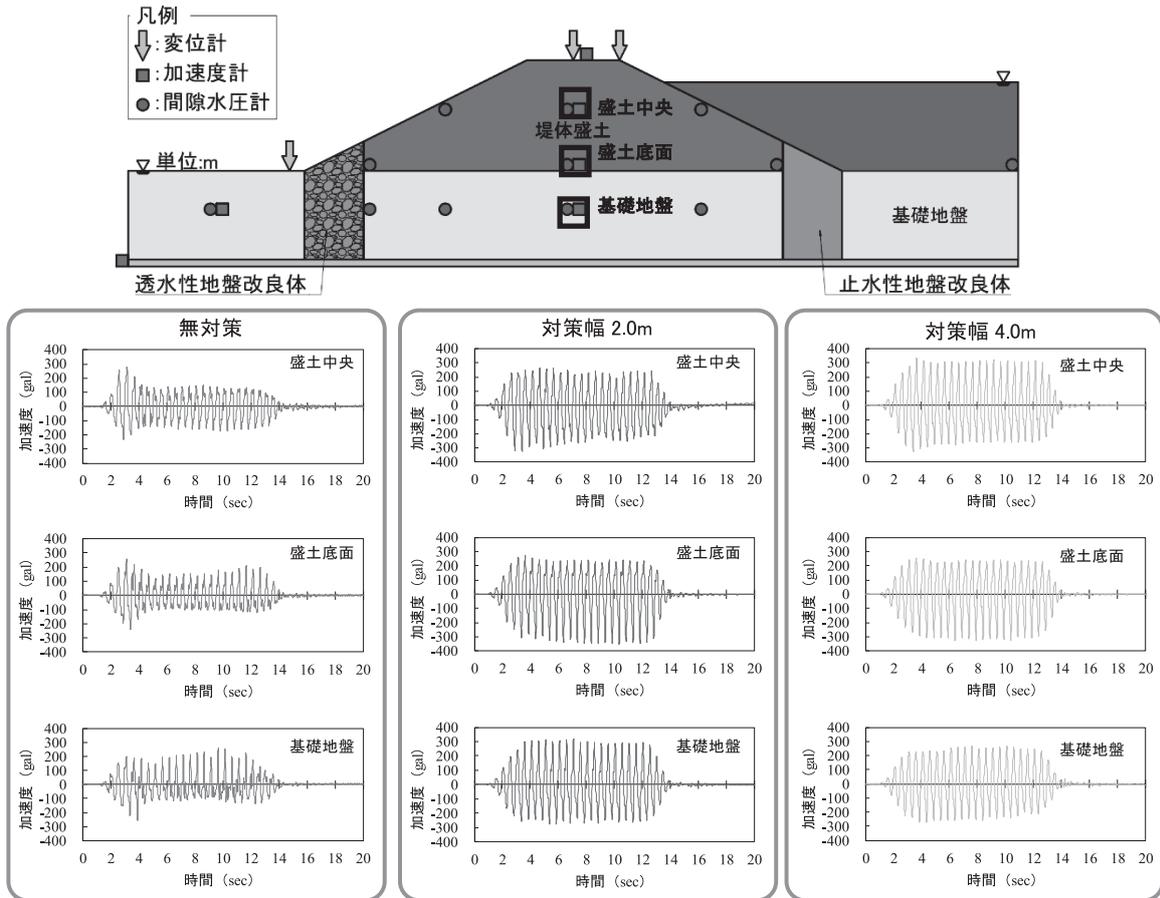
図一4に実験における加振直前の堤体内の水位を示す。堤体内の水位は、堤体底面の間隙水圧計から推定した。装置の制約もあり各ケースで上流側水位にばらつきが生じたが、無対策のCASE1に比べて対策幅 2.0 m のCASE2の水位勾配は大きくなった。また、対策幅 4.0 m のCASE3はCASE1, 2と比べて水位が低く、透水性改良体の排水効果が顕著である。

図一5に加振時の加速度応答を示す。無対策では、3秒過ぎにピークを迎えたのちに減少しており、地盤の液状化によるものと推察される。対策有は無対策に比べると改良体の拘束効果により明瞭な加速度振幅の低下は確認できない。

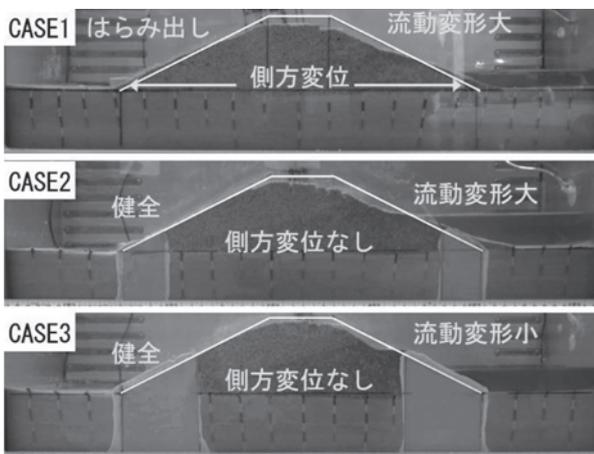
図一6, 7に実験における加振後の変形と堤体天端中央の沈下量の時刻歴を示す。無対策時は基礎地盤の液状化に伴い、法尻が外側に変形するとともに上流側法面も液状化による流動変形が発生した。これに対して、対策時には基礎地盤の側方変位および上流側の流動が抑制された。改良幅が大きいほどその効果は顕著であった。堤体天端中央の沈下量は、無対策と対策幅 2 m では同様で対策効果が明確となっていないが、対策幅 4 m では 54% 沈下量が低減した。これは、地盤条件や外力に応じた適切な改良仕様の設定が重要であることを示すものである。



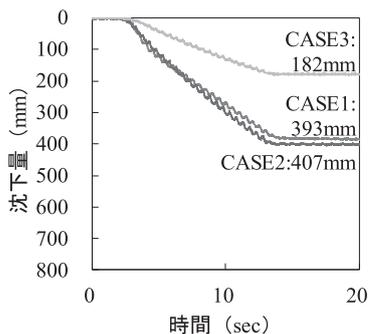
図一4 加振直前の堤体内水位



図一五 加振時の加速度応答



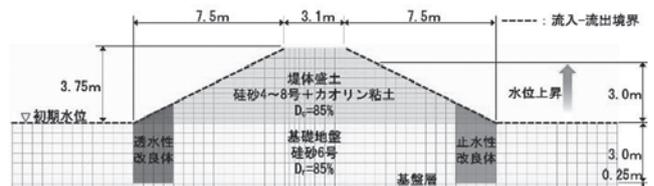
図一六 加振後の変形状況 (遠心模型実験)



図一七 堤体天端中央の沈下量 (遠心実験)

4. 数値解析による遠心模型実験の再現

数値解析は液状化解析プログラム LIQCA2D20 を使用した²⁾。図一八に解析モデルを示す。土骨格の境界条件として、底面は水平・鉛直を固定、側方は水平固定・鉛直自由とした。間隙水、^{しんとうすい}浸透水の境界条件として、基礎地盤表面および堤体法面を流入-流出境界とした。表一3、4に解析に用いた材料パラメータを示す。基礎地盤および堤体盛土は繰返し弾塑性モデルとし、物理試験および繰返し三軸試験よりパラメータを設定した。改良体は弾性モデルとし、一軸圧縮試験結果からパラメータを設定した。水分特性曲線は、堤体材料、基礎地盤、止水性改良体は共通とし、堤体材料の保水性試験結果を用い、また、透水性改良体は、既往の研究における単粒碎石を参考にそれぞれ van-



図一八 解析モデル

表-3 材料パラメータ (地盤)

対象材料		堤体盛土 Dc = 85%	基礎地盤 Dr = 85%
密度	ρ_t (g/cm ³)	1.776	2.017
透水係数	k (m/sec)	5.4E-5	5.6E-4
初期間隙比	e_0	0.677	0.629
圧縮指数	λ	0.0203	0.0061
膨張指数	κ	0.0060	0.0045
擬似過圧密比	OCR	1.0	1.0
無次元化 初期せん断係数	G_0/σ_{m0}'	851.2	1600.0
変相応力比	M_m^*	1.459	1.441
破壊応力比	M_f^*	0.908	0.908
硬化関数中の パラメータ	B_0^*	2400	2800
	B_1^*	50	50
	C_f	0	0
規準ひずみ (塑性)	γ_r^{P*}	0.007	0.006
規準ひずみ (弾性)	γ_r^{E*}	0.07	0.04
ダイレイタンシー 係数	D_0	3.5	4.5
	n	3.0	1.2
異方性消失の パラメータ	C_d	2000	2000
初期飽和度	S_{r0}	0.63	1.0
水分特性曲線 パラメータ	a	1.8	1.8
	n'	4.0	4.0

表-4 材料パラメータ (改良体)

対象材料		止水性 改良体	透水性 改良体
密度	ρ_t (g/cm ³)	1.828	1.940
透水係数	k (m/sec)	1.0E-7	5.8E-3
Lame' の定数	λ	1.1E + 6	2.5E + 6
	μ	5.6E + 5	1.3E + 6
初期飽和度	S_{r0}	1.0	0.1
水分特性曲線 パラメータ	a	1.8	19.0
	n'	4.0	4.2

Genuchten のパラメータを設定した。解析ケースおよび入力条件は実験と同様に表-2, 3とした。

図-9 に浸透流解析後の飽和度分布を示す。解析では、対策工の効果により堤体内の飽和領域が縮小しており、実験と同様に透水性改良体の排水効果が確認できた。図-10 に加振後の変形図を示す。無対策時の堤体上下流方向へのはらみ出しや流動変形、対策時の堤体変形抑制効果を再現できている。図-11 に天端中央の沈下量を示す。最終沈下量は実験値に対して解析値が最大 2.0 倍程度大きな値を示したが、沈下挙動や沈下低減効果は、実験と解析で概ね一致する結果を示した。

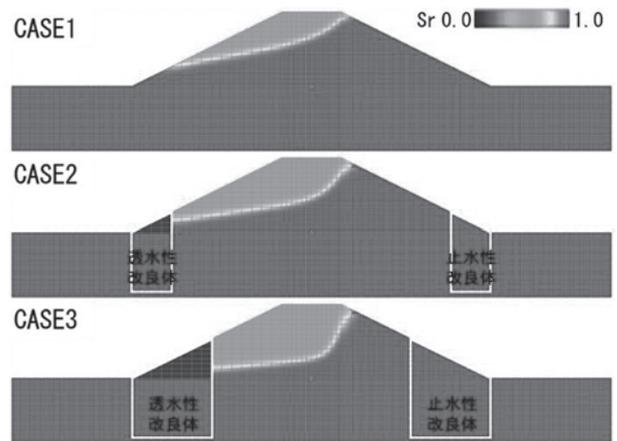


図-9 加振直前の飽和度分布

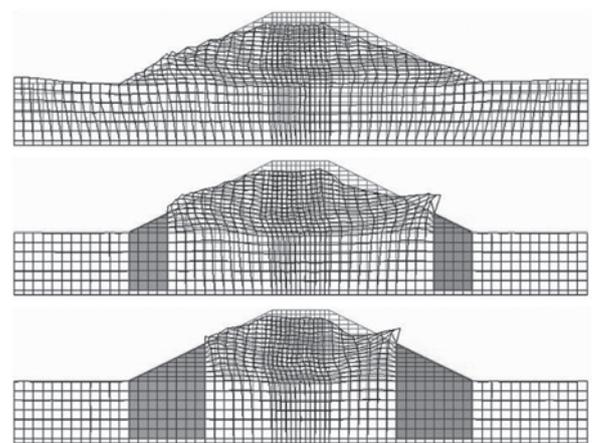


図-10 加振後の変形状況 (数値解析)

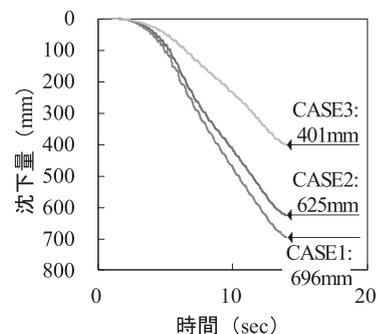


図-11 天端中央の沈下量の時刻歴 (数値解析)

数値解析により遠心模型実験の挙動を概ね再現することができた。今後、対策工の有効性や適用性を確認する上で本数値解析法の効果的な利用が期待できる。

5. 中層混合処理工法の施工の合理化 (改良型 WILL 工法の開発)

上述した盛土強靱化技術の合理的な施工を目的として、写真-2 に示す中層混合処理工法 (改良型 WILL 工法)³⁾ を開発した。改良型 WILL 工法は図-12 に

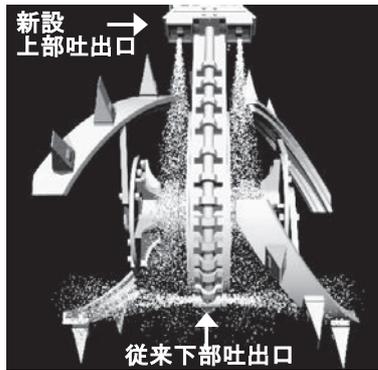
示すように従来型の下部吐出口に加えて、上部高圧吐出機構を新設することで時間当たり吐出量の増加と高圧噴射エネルギーにより早期に均質な改良体を造成することを可能とした。これにより、止水性改良体の施工は従来型に比較して施工速度が40%向上し、工事費を20%低減できることを確認した。透水性改良体は、同機械を用いて原位置にて碎石とセメントスラリーを攪拌混合して造成することが可能である（写真一3）。改良型 WILL 工法を用いて異なる特性を有する改良体を同一の施工機械で造成することにより、更なる施工の効率化を目指している。



写真一3 透水性改良体造成状況



写真一2 改良型 WILL 工法機械全景



図一12 改良型 WILL 工法の攪拌翼

6. おわりに

本稿では近年、増加する豪雨や地震による堤体盛土の安定化対策として新たに開発した止水性および透水性改良体による盛土強靱化を紹介した。豪雨や地震が同時期に発生する条件においても効果が期待でき施工の効率化にも対応している。本技術が国土強靱化の推進において一助となれば幸いである。

JICMA

《参考文献》

- 1) 国土交通省, 総力戦で挑む防災・減災プロジェクト～いのちとくらしをまもる防災減災～, 2020年9月
- 2) 一般社団法人LIQCA 液状化地盤研究所, LIQCA2D20・LIQCA3D20 (2020年公開版) 資料, 2020年12月
- 3) 西尾竜文, 足立有史, 木村誠, 小林司, 市坪天士, 土木学会土木建設技術発表会 2020, 2021年2月

【筆者紹介】

足立 有史 (あだち ゆうじ)
 (株)安藤・間
 建設本部 技術研究所



西尾 竜文 (にしお たつふみ)
 (株)安藤・間
 建設本部 技術研究所

