

第13回河川堤防技術シンポジウム
企画セッション『堤防設計の未来』

河川堤防のせん断強さと透水性の評価
～河川堤防の構造検討の手引きの改訂に向けて～

名城大学 小高 猛司
日本工営 李 圭太
土木研究所 石原 雅規

『河川砂防技術基準』

設計編 第1章 河川構造物の設計

第2節 堤防 2.2.2 設計に反映すべき事項

<標準>

堤防は複雑な基礎地盤の上に築造され、過去の被災に応じて嵩上げ及び拡幅等の強化を重ねてきた歴史的な構造物であることを踏まえ、以下の項目を検討し、設計に反映するものとする。

- ・不同沈下に対する修復の容易性
- ・基礎地盤及び堤体との一体性及びなじみ
- ・嵩上げ及び拡幅等の機能増強の容易性
- ・損傷した場合の復旧の容易性
- ・基礎地盤及び堤体の構造及び性状に係る調査精度に起因する不確実性
- ・基礎地盤及び堤体の不均質性に起因する不確実性

その他、設計に当たっては、環境及び景観との調和、構造物の耐久性、維持管理の容易性、施工性、事業実施による地域への影響、経済性及び公衆の利用等を総合的に考慮するものとする。

『河川堤防の構造検討の手引き』改訂

⇒「調査精度に起因する不確実性」を低減する取組

『河川堤防の構造検討の手引き』改訂に向けて 考慮すべきポイント（本発表で関係するもの）

現場透水試験の活用

堤体の強度定数を同定する際の試験条件の適正化

安定解析における過剰間隙水圧の適正な評価

本委員会のWG活動(主に、李・小高・石原)の一環で実施してきた

全国河川堤防の地盤調査と室内土質試験

○島根県・高津川 (2007. 9)	礫・砂
○島根県・江の川 (2007. 9)	礫・砂
○鳥取県・小鴨川 (2008. 9)	礫・砂
大阪府・淀川 (2012. 2)	砂・シルト
高知県・仁淀川 (2013. 9)	礫
○北海道・千歳川 (2013. 12)	砂・シルト
○愛知県・庄内川 (2014. 1)	砂・シルト・粘土
○島根県・斐伊川 (2014. 3)	砂
和歌山県・紀の川 (2014. 4)	礫
○大阪府・大和川 (2014. 8)	砂・シルト
新潟県・信濃川 (2014. 9)	礫
○京都府・木津川 (2014. 11)	砂
山梨県・釜無川 (2014. 12)	礫
○○鹿児島県・川内川 (2015. 1)	砂 (シラス)
○宮城県・渋井川 (2015. 11)	砂・シルト
○秋田県・子吉川 (2016. 1)	礫・砂・シルト
○○○石川県・梯川 (2016. 6)	砂・シルト
○岡山県・小田川 (2016. 9)	礫・砂
○○○熊本県・緑川、白川 (2016. 11)	砂・シルト
○○高知県・物部川 (2017. 2)	礫
○○○青森県・ニッ森川 (2017. 2)	砂・シルト
○○○岐阜県・犀川 (2018. 2)	シルト
○○○岡山県・小田川 (2018. 11, 12, 2019. 3)	砂・シルト
○島根県・国府川 (2020. 2)	礫
○○鹿児島県・川内川 (2020. 11)	砂 (シラス)
○○静岡県・狩野川 (2020. 12)	シルト・砂
○○岐阜県・揖斐川 (2022. 1)	礫・砂
○○福井県・九頭竜川 (2022. 5)	シルト
○○愛知県・半場川 (2023. 3)	シルト・砂
○○三重県・揖斐川 (2023. 11)	砂
○○高知県・四万十川 (2025. 1)	砂・礫
○○秋田県・子吉川 (2025. 10, 11)	シルト

- ・様々な堤防土の**力学特性の把握**と**強度定数設定法**の検討
- ・室内試験用の**高品質な試料**の**簡易な採取法**の検討
- ・物理探査による堤防構造の評価
- ・現場透水試験による透水性の評価



現場透水試験を扱った参考資料（例）

河川堤防技術シンポジウム論文集 <https://committees.jsce.or.jp/jiban02/node/53>

石原雅規・東 拓生・秋場俊一・地蔵智樹・小高猛司・崔 瑛・李圭太：梯川旧堤で実施した現地堤防地盤調査，第4回河川堤防技術シンポジウム論文集，2016.

李圭太・小高猛司・石原雅規・久保裕一・御手洗翔太：河川堤防盛土の原位置透水特性に関する考察，第5回河川堤防技術シンポジウム論文集，2017.

小高猛司・李圭太・久保裕一・石原雅規・杉山詠一・藤田薰：小田川堤防開削調査時の現場透水試験と室内透水試験による堤体透水性の評価，第8回河川堤防技術シンポジウム論文集，2020.

小高猛司・李圭太・久保裕一・藤田 薫・湯貫 敬・石原雅規・青柳悠大：開削時現場調査と室内試験による狩野川堤防の評価，第9回河川堤防技術シンポジウム論文集，2021.

児玉直哉・小高猛司・李圭太・大堀文彦・久保裕一・久保宜之・鈴木貴博・稻吉正浩・石原雅規：令和4年7月に決壊した半場川堤防の周辺地盤と開削調査の概要，第11回河川堤防技術シンポジウム論文集，2024.

適正な強度定数の評価を扱った参考資料（例）

河川堤防技術シンポジウム論文集 <https://committees.jsce.or.jp/jiban02/node/53>

小高猛司・崔瑛・李圭太・小林芳樹・武楊：すべり安定性照査に用いる堤体土の強度定数， 第2回河川堤防技術シンポジウム論文集, 2014.

小高猛司・李圭太・石原雅規・崔瑛・武楊・田村太郎：砂質堤体土の簡易サンプリングとその強度特性の評価，第3回河川堤防技術シンポジウム論文集, 2015.

小高猛司・崔瑛・李圭太・石原雅規・高木竜二・田中貴之・御手洗翔太：「粘性土」堤体土の浸透時の力学特性の評価，第4回河川堤防技術シンポジウム論文集, 2016.

小高猛司・李圭太・石原雅規・久保裕一・田中貴之・梅村逸遊：吸水軟化試験による河川堤防土の低拘束圧下のせん断強度の，第5回河川堤防技術シンポジウム論文集, 2017.

小高猛司・李圭太・久保裕一・中山雄人・梅村逸遊・森智彦：河川堤防の浸透破壊と堤体材料の土質特性との関係，第6回河川堤防技術シンポジウム論文集, 2018.

小高猛司・李圭太・久保裕一・石原雅規・中山雄人・李朝暉・藤田薰：河川堤防の浸透時のせん断強度，第7回河川堤防技術シンポジウム論文集, 2019.

小高猛司・李圭太・久保裕一・藤田 薫・湯貫 敬・石原雅規・青柳悠大：開削時現場調査と室内試験による狩野川堤防の評価，第9回河川堤防技術シンポジウム論文集, 2021.

小高猛司・李圭太・久保裕一・湯貫 敬・山下隼史・鷺見航大・夏目将嗣・児玉直哉：細粒分を含まない礫質堤防土の力学特性の評価，第10回河川堤防技術シンポジウム論文集, 2022.

地盤工学会誌

小高猛司・李圭太・石原雅規・久保裕一・小高猛司・児玉直哉：堤防土のせん断強度の評価～吸水軟化試験～，地盤工学会誌, Vol.73, No.3, 2025.

『河川堤防の構造検討の手引き』改訂に向けて 考慮すべきポイント（本発表で関係するもの）

現場透水試験の活用

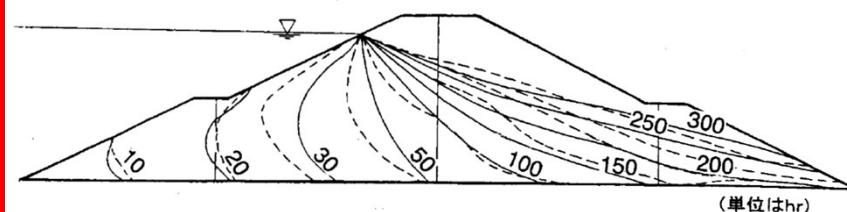
堤体の強度定数を同定する際の試験条件の適正化

安定解析における過剰間隙水圧の適正な評価

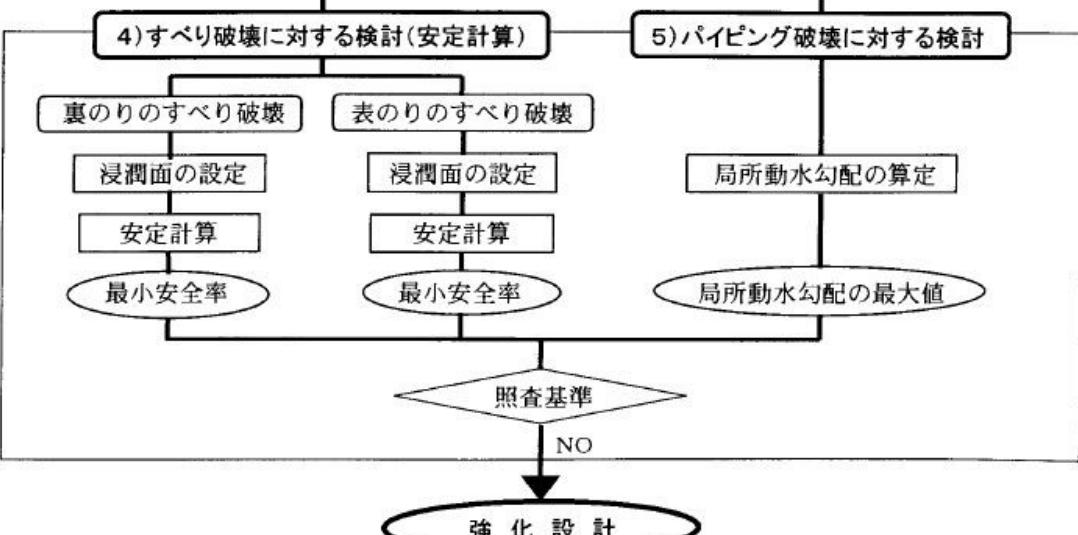
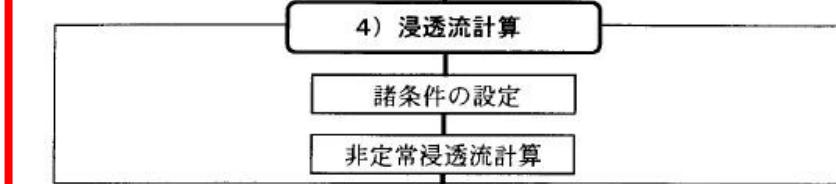
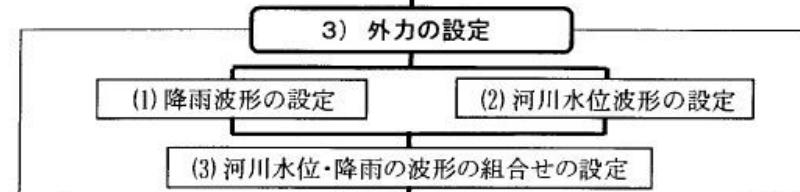
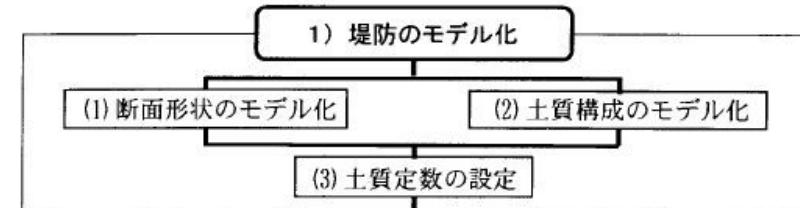
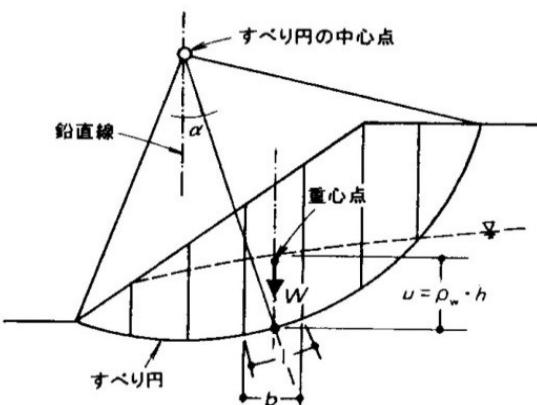
河川堤防の安全性評価

河川堤防の構造検討の手引き
(財) 国土技術研究センター
(初版2002, 改訂版 2012)

必要な土質定数: 飽和透水係数, 不飽和特性



必要な土質定数: 強度定数



河川堤防の構造検討に用いる浸透特性

- ・ 河川構造の構造検討の手引き（改訂版）平成24年2月 JICE
- ・ 河川堤防の浸透に対する照査・設計のポイント 平成26年7月 PWRI

河川構造の構造検討の手引き

3.2 浸透に対する構造検討のための調査

3.2.2 土質調査 p.23

堤 体：主として室内土質試験（粒度試験、室内透水試験）

基礎地盤：主として現場透水試験・土質試験（粒度試験）

※ 現場透水試験はボーリング孔を利用して実施するもので（単孔式透水試験），土の透水特性（透水係数）を知ることができるほか，試験区間の間隙水圧を示す水頭（地下水位）を精度良く把握することができる。現場透水試験の対象は，地下水位面以下の飽和部分を構成する礫質土および砂質土で，主として基礎地盤が対象となる。

※ 砂質土や礫質土についても乱さない試料を採取することが望ましいが，乱さない試料の採取は一般に難しく，力学試験に必要な試料は原則として乱した状態で採取する。この場合，室内の土質試験（透水試験，せん断試験）は乱した試料を密度調整して実施するので，…できる限り正確な密度を把握することが重要である。

※ 堤体の透水性を把握するための透水試験は原則としては礫質土あるいは砂質土を対象とし，粘性土については，…一定の値を設定することが望ましいことから，試験を行う必要はない。

・特別な条件（亀裂が多いなど）がない限りは飽和透水係数として，

シルトを主体とする場合 $k_s = 1 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ $1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$

粘土を主体とする場合 $k_s = 1 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$

河川堤防の浸透に対する照査・設計のポイント

5. 土質定数

5.1 浸透に対する照査・設計に係る定数 p.18

5.1.1 浸透に対する照査・設計に係る定数

一覧点一

浸透に対する照査・設計においては、浸透流計算と円弧すべり面計算を実施。その際必要な定数は以下のとおり。

- 土質基本量：1)土粒子の密度 C_s , 2)乾燥密度 ρ_d , 3)湿潤密度 ρ_f , 4)飽和密度 ρ_{sat} ,
5)間隙比 e , 6)含水比 w , 7)体積含水率 θ , 8)飽和度 S_r
- 浸透流計算に用いる土質定数（飽和透水係数 k_s が最重要）
 - ・ 鮫和透水係数は5.4節で詳説する。
 - ・ 湿潤面（地下水位）より上の不飽和状態の土中への浸透や土中からの排水を不飽和浸透・排水と呼ぶ
 - ・ ① θ ～比透水係数 (k_u/k_{sat}) 関係
 - ：体積含水率 θ の低下とともに透水係数 k_u は著しく低下
 - ・ ② 水分特性曲線 (θ ~ ψ 関係)
 - ：不飽和状態の土中の間隙水圧は負圧（サクション）であり、体積含水率 θ の低下とともにサクション ψ は著しく増加
 - ・ 不飽和浸透・排水については①と②の関係を用いて時間的変化（非定常という）も計算するプログラムが照査業務に使用されている（構造検討の手引き²⁾ 参照）
 - ・ ①と②の関係については試験方法が確立されていないことなどから、割り切って土質分類ごとに設定した関係を用いる。
- 円弧すべり面計算に用いる定数
 - ・ 強度定数：粘着力 c 、内部摩擦角（せん断抵抗角） ϕ
 - ・ 強度試験から推定過程の留意事項は5.5節以降を参照
 - ・ 基本的な注意事項： c と ϕ をバラバラに使用せず、一括して組合せて評価すべき

一覧点二

- 検討に必要な土質定数はすべて準備できたか？

5.4 透水係数の推定 p.21

5.4.1 透水係数の推定

一覧点一

➢ 鮫和透水係数が大変重要

- ・ 支配的な浸透現象を説明するためには、飽和透水係数を適切に設定することが重要
- ・ 堤体土質が不飽和であるからといって不飽和透水係数を個別に設定する必要はない

➢ 土質（粒度分布）や間隙の大きさ（粒径等）に依存

- 単位に cm/s と m/s が使われる。単位によって 100 倍値が異なる。取り違えないように
- 土層毎とのオーダー や隣接土との比（同じ位か百倍違う）が計算結果を左右
- 鮫和透水係数を推定する方法

- ・ 3種類（現地試験法、採取土試料の室内試験法、土の粒度などから推定する方法）

1) 現地試験法²¹⁾

飽和透水係数を不飽和な堤体表面で測定する方法として一例を挙げると、締固めた地盤の透水試験 (JGS 1316-2003) がある

2) 室内試験法¹⁴⁾

3) 土の粒度や間隙比などから推定する近似的方法

- i) 10%粒径を用いる Hazen 式、ii) 20%粒径を用いる Creager の方法、iii) 50%粒径、均等係数と間隙比も考慮する理論式。など巻末資料参照

一覧点二

- 設定した透水係数は土質・締固め度から考えて妥当か？

- 室内試験では密度か間隙比が現場の状態に近いか？

- 試験値は近似的方法による推定値と比較して大きなズレがないか？

透水俓度 k (cm/s)											
10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^0	10^1	10^2
実質上不透水		非常に低い	低い	中位				高い			
粘性土	微細砂、シルト 砂-シルト-粘土混合土				砂および礫				清浄な礫		

図 5.4.1 透水俓度 k の目安¹⁴⁾

堤体の現場透水試験

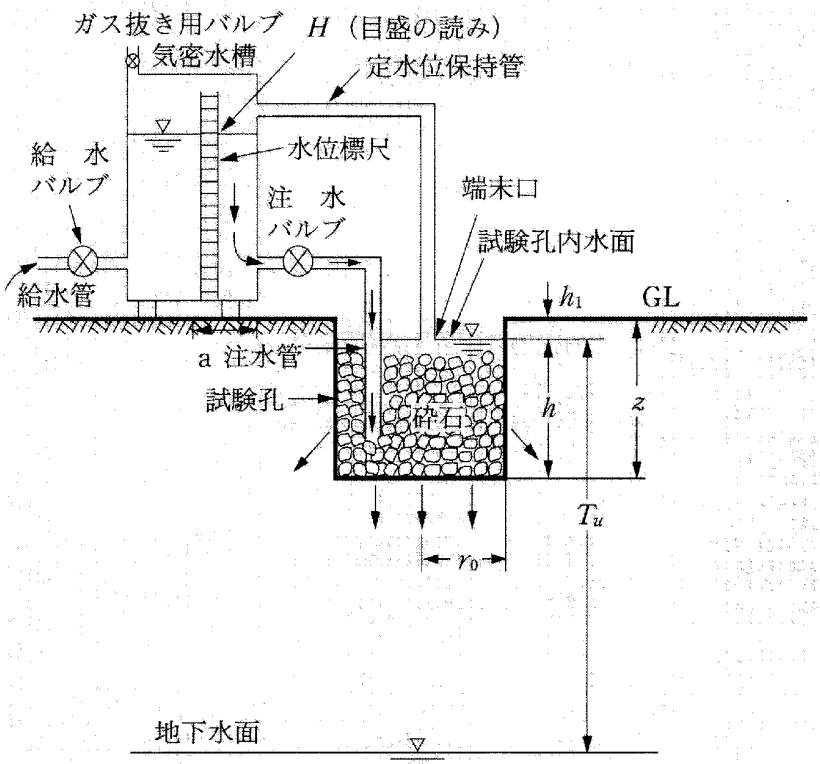


JGS 1316-2012 締め固めた地盤の透水試験方法
JGS 1319-2017 地下水面より上の地盤を対象とした透水試験方法

$$k = \frac{Q}{2\pi h^2} \left[\ln \left[\frac{h}{r_0} + \sqrt{\left(\frac{h}{r_0} \right)^2 + 1} \right]^{\frac{1}{2}} - \sqrt{\left(\frac{r_0}{h} \right)^2 + 1} + \left(\frac{r_0}{h} \right) \right]$$



マリオットサイフォンによる原位置透水試験

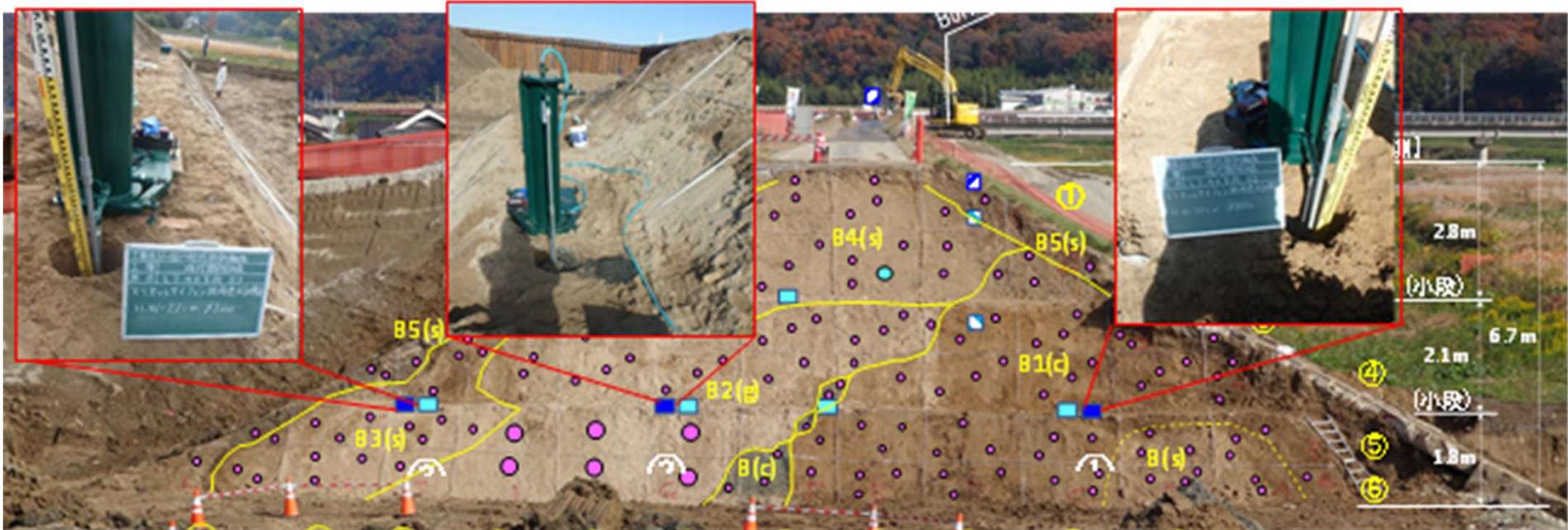


平成30年7月豪雨 小田川堤防被災箇所 開削調査

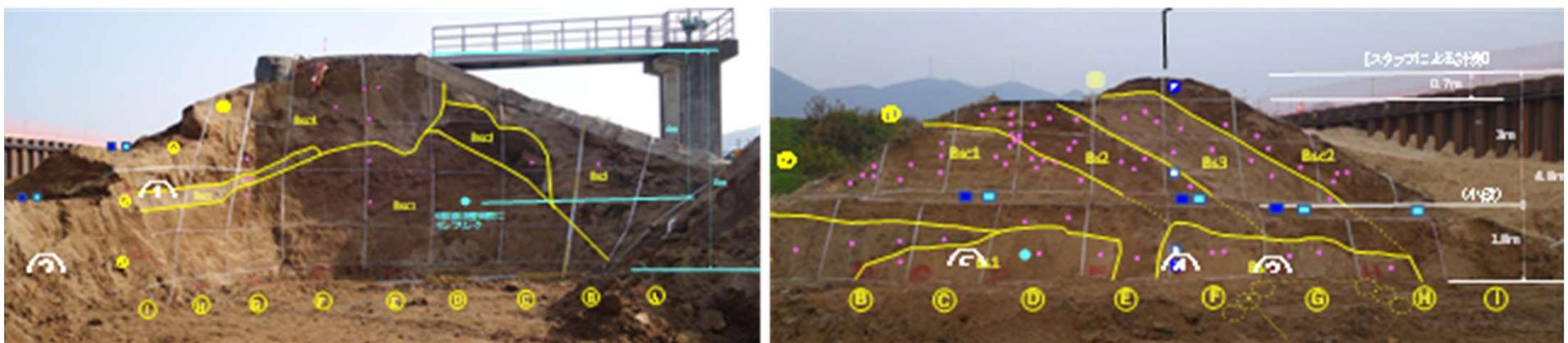
小高・李・石原ら: 第8回河川堤防技術シンポジウム論文集, 2020.



小田川被災箇所での現地調査(2018.11,12, 2019.3)と土質試験を実施



左岸3.4kの破堤箇所における開削調査時の現場透水試験の実施箇所と状況



左岸6.4kの破堤箇所における開削調査時の現場透水試験の実施箇所と状況

現場透水試験結果

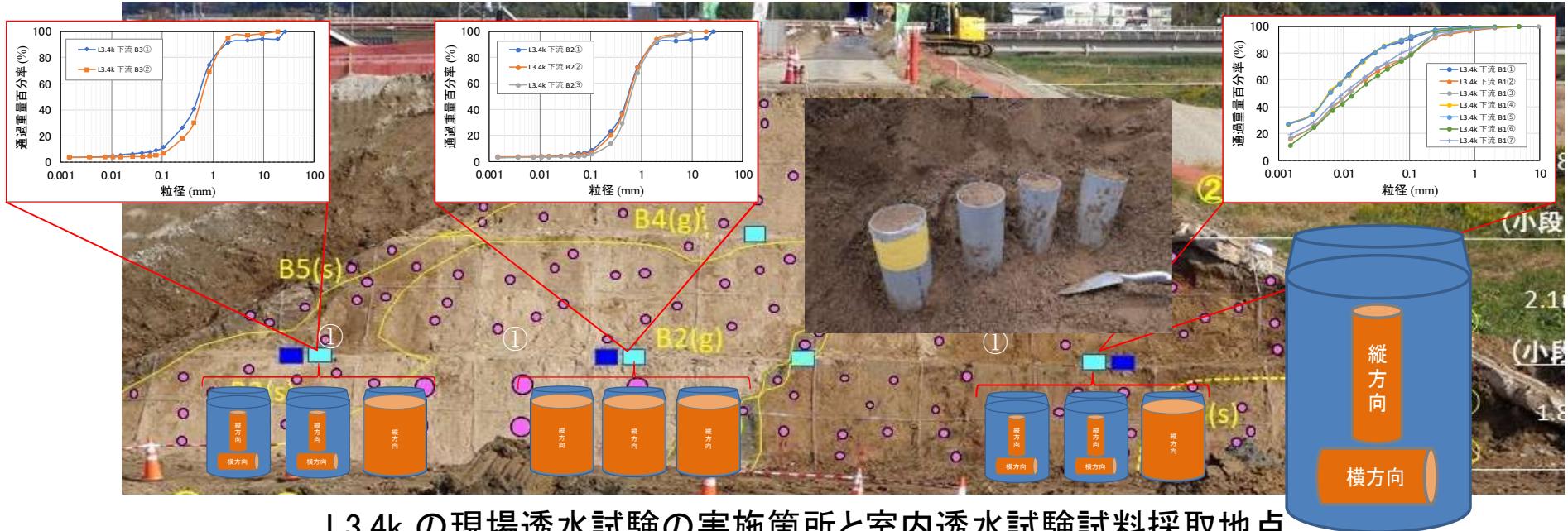
調査場所	開削断面(上下流)	試験位置		現場透水係数(m/s)	現場透水試験近辺の土質		Creagerによる推定透水係数(m/s)
		詳細箇所	写真		工学的土質分類	D ₂₀ (mm)	
右岸 0.6k	下流	上段	①	1.6×10 ⁻⁴	砂質粘土 (CLS)	—	—
		下段	②	3.1×10 ⁻⁵	砂質細粒土(FS)	0.0016	—
	上流	上段 (堤外)	③	4.6×10 ⁻⁵	砂質粘土 (CLS)	—	—
		上段 (堤内)	④	2.3×10 ⁻⁵	砂質粘土 (CLS)	—	—
		下段 (堤外)	⑤	1.9×10 ⁻⁵	砂質粘土 (CLS)	—	—
		下段 (堤内)	⑥	6.4×10 ⁻⁵	粘土質砂 (SC)	0.0046	3.0×10 ⁻⁸
左岸 3.4k	下流	堤外	①	3.2×10 ⁻⁶	砂質細粒土(FS)	0.0013	—
		堤内 (内側)	②	3.7×10 ⁻⁴	礫混じり砂 (SP-G)	0.4130	4.8×10 ⁻⁴
		堤内 (外側)	③	1.1×10 ⁻⁴	礫混じり砂 (SP-G)	0.3257	2.7×10 ⁻⁴
左岸 4.2k	下流	上段	—	2.5×10 ⁻⁴	細粒分混じり礫質砂 (SG-F)	0.37	2.5×10 ⁻⁴
		下段	—	3.1×10 ⁻⁵	細粒分質砂 (SF)	0.04	1.8×10 ⁻⁶
	上流	堤内 (内側)	—	9.2×10 ⁻⁵	細粒分質砂 (SF)	0.078	8.5×10 ⁻⁶
		堤内 (外側)	—	4.6×10 ⁻⁵	細粒分礫混じり砂 (S-FG)	0.2	8.9×10 ⁻⁵
左岸 6.4k	下流	上段	①	6.2×10 ⁻⁵	粘土質砂 (SC)	—	—
		下段	②	6.9×10 ⁻⁶	粘土質砂 (SC)	—	—
	上流	堤外	③	6.2×10 ⁻⁵	礫混じり細粒分質砂 (SF-G)	0.0106	1.1×10 ⁻⁷
		中央	④	5.4×10 ⁻⁴	礫混じり細粒分質砂 (SF-G)	0.0074	6.6×10 ⁻⁸
		堤内	⑤	1.4×10 ⁻⁴	細粒分質礫質砂 (SFG)	0.0098	1.0×10 ⁻⁷

総じて粒度から推定される透水係数よりも現場透水試験での値の方が大きく、3オーダー程度大きい箇所もある。特に、細粒分を多く含む堤体の場合にその傾向が顕著である。

粘性土では、手引きの設定値10^{-7~8}(m/s)とも2オーダー程度の開きがある。

逆に礫まじり砂のように粒度の粗い堤体土の場合の評価は、現場透水試験と整合しているが、6.4k上流断面のように、礫が混入していても細粒分が多い場合には推定値と現場透水係数との差が大きい。

室内透水試験 vs 現場透水試験



L3.4k の現場透水試験の実施箇所と室内透水試験試料採取地点



凍結試料の切断



切断状況



特殊旋盤機にて成形



成形された供試体



ベントナイト
充填後の状態



脱気後に透水試験

室内透水試験 vs 現場透水試験

調査 場所	開削 断面	採取位置	試験方法	供試体の 成形方法	室内透水係数(m/s)		現場透水試験近辺の土質		現場透水係 数(m/s)			
					縦供試体 (鉛直方向)	横供試体 (水平方向)	工学的土質分類	推定透水 係数(m/s)				
左岸 3.4k	下流	堤外①	変水位	縦1本	8.4×10^{-9} (1.93)		細粒分質砂 (FS)	推定不可	3.2×10^{-6}			
			変水位	縦横2本	1.6×10^{-8} (1.93)	7.5×10^{-8} (2.01)						
			変水位	縦横2本	8.8×10^{-9} (2.00)	6.9×10^{-9} (2.00)						
		堤内(内側)②	定水位	縦1本	4.2×10^{-5} (1.99)		礫混じり砂 (SP-G)	4.8×10^{-4}	3.7×10^{-4}			
			定水位	縦1本	7.0×10^{-5} (1.95)							
			定水位	縦1本	5.8×10^{-5} (1.95)							
		堤内(外側)③	変水位	縦1本	2.3×10^{-7} (1.90)		礫混じり砂 (SP-G)	2.7×10^{-4}	1.1×10^{-4}			
			変水位	縦横2本	5.7×10^{-7} (1.78)	9.7×10^{-6} (1.67)						
			変水位	縦横2本	8.6×10^{-7} (1.76)	8.9×10^{-6} (1.71)						
左岸 4.2k	下流	上段	変水位	縦横2本	7.7×10^{-7} (1.65)	2.2×10^{-6} (1.57)	細粒分混じり礫質砂 (SG-F)	2.5×10^{-4}	2.5×10^{-4}			
		下段	変水位	縦横2本	8.4×10^{-6} (1.53)	5.5×10^{-7} (1.60)	細粒分質砂 (SF)	1.8×10^{-6}	3.1×10^{-5}			
	上流	堤内(内側)	変水位	縦横2本	2.2×10^{-7} (1.57)	3.2×10^{-7} (1.69)	細粒分質砂 (SF)	8.5×10^{-6}	9.2×10^{-5}			
		堤内(外側)	定水位	縦1本	3.4×10^{-6} (1.431)		細粒分礫混じり砂 (S-FG)	8.9×10^{-5}	4.6×10^{-5}			

※()内の数字は凍結供試体の湿潤密度(g/cm³)

総じて現場透水試験に比べて室内透水試験で得られる透水係数は小さい。これは、既往の調査結果においても同様の傾向が見られている。

細粒分を多く含んでいると見られる場所においては、透水係数に1~2オーダーかそれ以上の差がある。

粒度から推定した透水係数と比較:

- ・礫が多く透水性が高い位置においては、推定値は現場透水係数に近い
- ・細粒分が多く透水性が低い位置においては、推定値は室内透水係数に近い

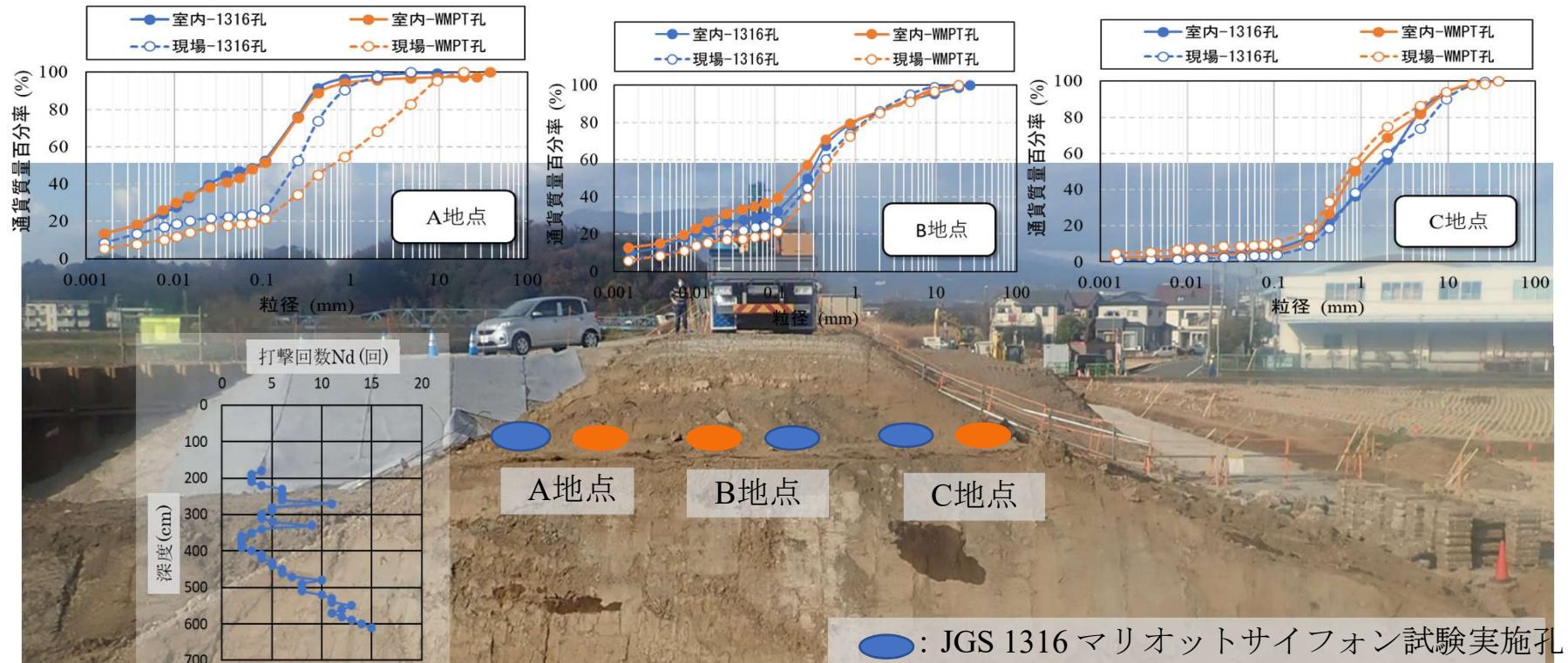
JGS1316を基本とした 簡易な現場透水試験法

マリオットサイフォンを使わず水道メーターで
堤体内への浸透注入流量を計測する

- WMPT(Water Meter Permeability Test)法 定常法, 非定常法
※ 注水流量をいかに簡便に計測するか

狩野川的場樋管(右岸8.5k付近)下流側開削断面における現場調査

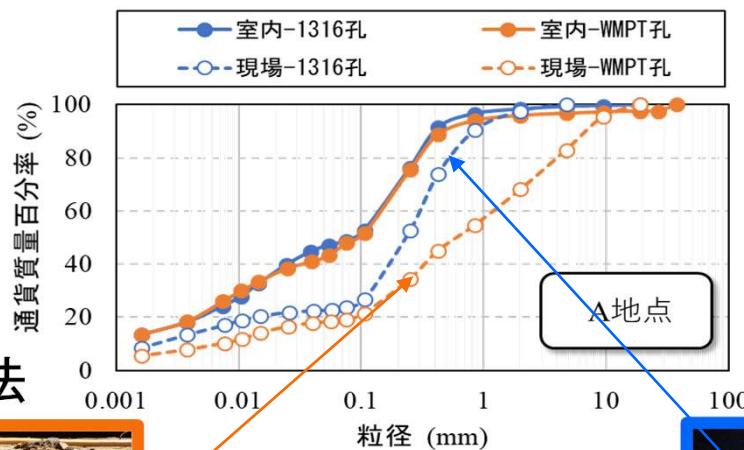
小高・李・石原・青柳ら:第9回河川堤防技術シンポジウム論文集, 2021



各地点で以下の試験/試料採取を実施

- ・簡易動的貫入試験 (A地点のみ)
- ・マリオットサイフォン試験 (JGS-1316)
- ・水道メーター法透水試験(WMPT)
- ・簡易現地透水試験 (土研式、水華、インフィルトロメーター)
- ・不攪乱 / 攪乱試料採取

A地点 / JGS-1316(マリオットサイフォン), WMPT(水道メーター)



A-WMPT孔-WMPT法



A-WMPT孔



A-1316孔



1316法 1.32×10^{-4} m/s
WMPT法 1.46×10^{-4} m/s

両者による方法による差は無い

1316法 7.98×10^{-5} m/s
WMPT法 7.67×10^{-5} m/s

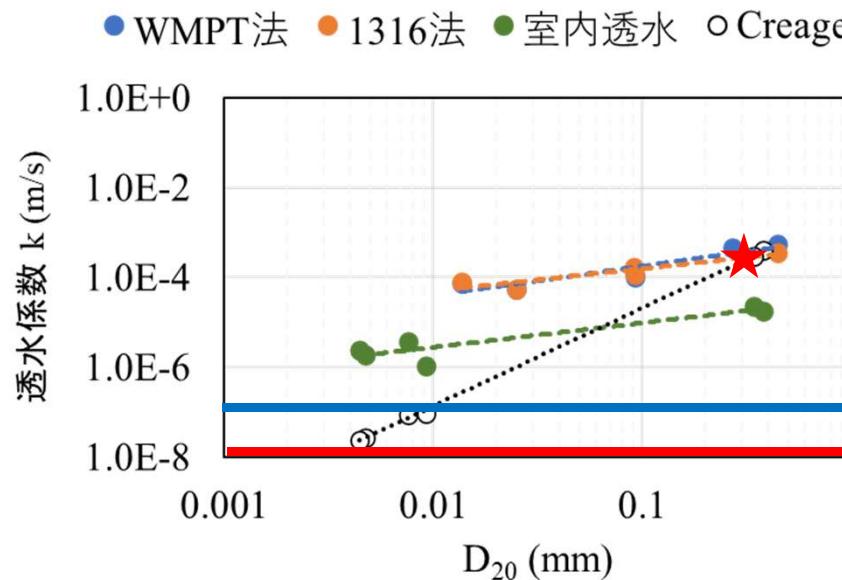
狩野川的場地区透水試験結果(UNIT : m/s)



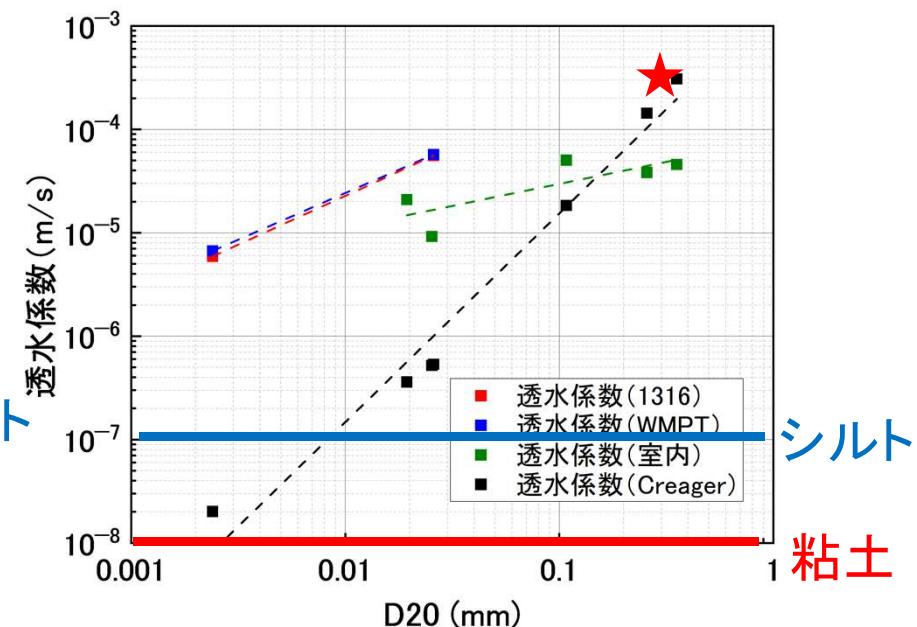
現場透水試験のまとめ

★揖斐川御砂樋管(2023)
※均一砂堤防

狩野川的場地区(2020)



半場川(愛知県)(2023)



- ・現場透水試験: 1316(マリオットサイフォン)法とWMPT(水道メーター)法は一致。ただし、高透水では水道メーター法のみ計測可能。
- ・室内透水係数は、粒径の大きさに関係なく、現場透水係数よりも小さい。
- ・Creager法の透水係数は、広い粒度の範囲で現場透水係数よりも小さく、 $D_{20}=0.5\text{ mm}$ 程度の粗い砂質土になると一致する。
- ・精度、簡便さから判断して、水道メーター法は極めて有効な現場透水試験法。

現場透水試験のまとめ

設計・照査にあたっての非定常浸透流解析

「粘性土」 $\rightarrow k=10^{-8}m/s$ (粘土), $10^{-7}m/s$ (シルト)

「河川堤防の構造検討の手引き」より

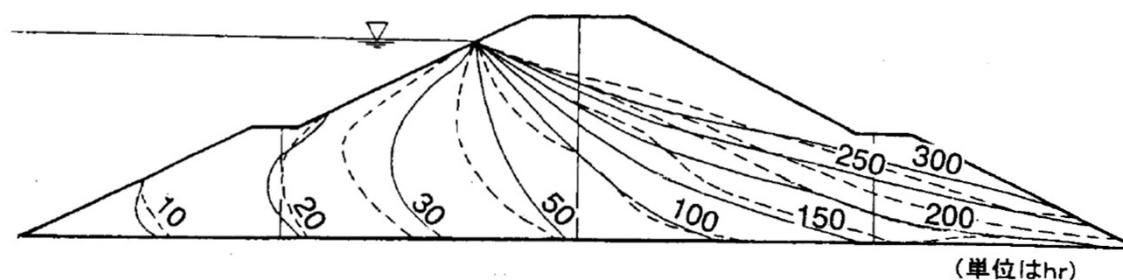
実際の堤防の透水性を過小評価していないか?

\rightarrow 浸潤面が上がらない \rightarrow 危険側の評価

粒度からの推定や室内透水試験は要注意

堤体のマクロな透水性を評価できる現場透水試験を推奨

(※学会基準よりも簡便な方法(WMPT法等へ))



『河川堤防の構造検討の手引き』改訂に向けて 考慮すべきポイント（本発表で関係するもの）

現場透水試験の活用

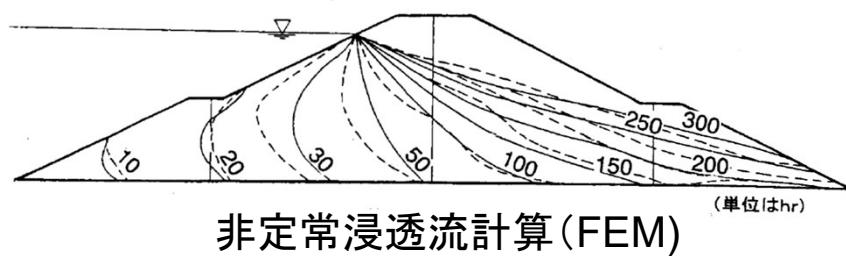
堤体の強度定数を同定する際の試験条件の適正化

安定解析における過剰間隙水圧の適正な評価

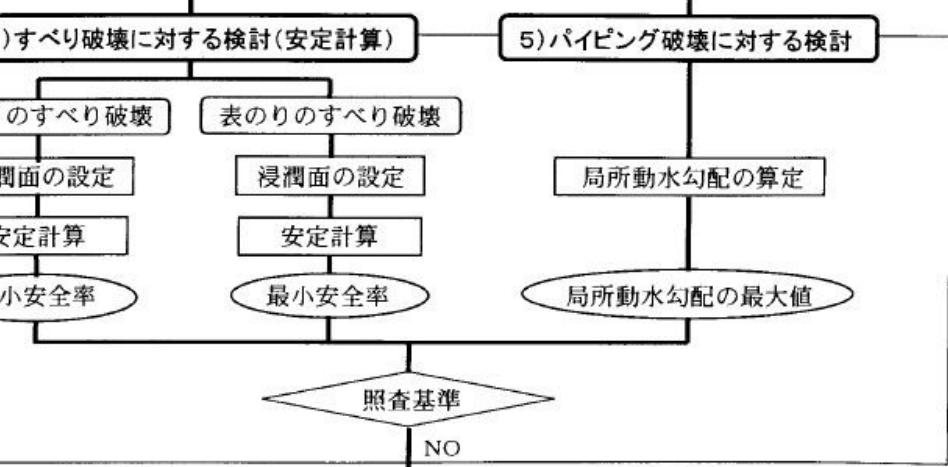
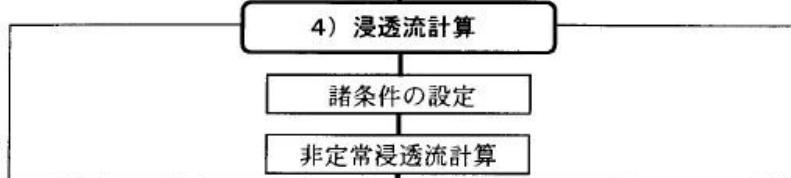
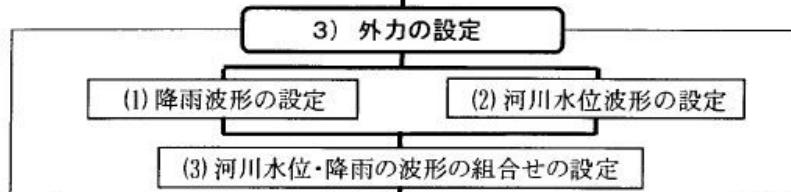
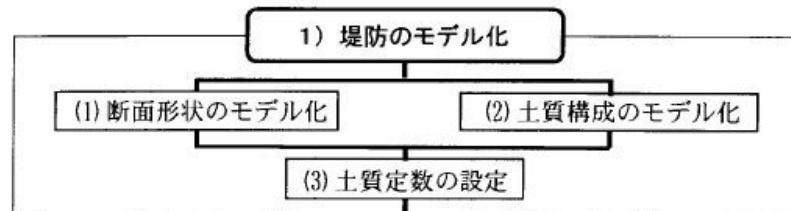
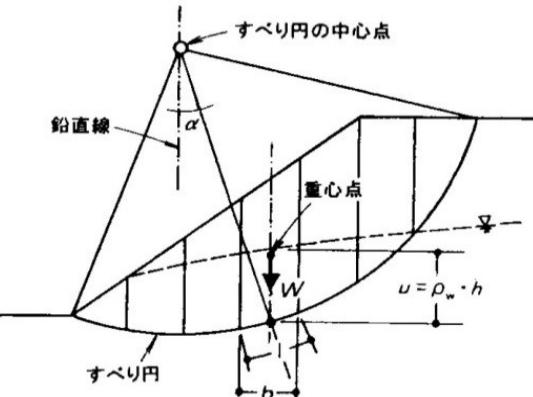
河川堤防の安全性評価

河川堤防の構造検討の手引き
(財) 国土技術研究センター
(初版2002, 改訂版 2012)

必要な土質定数: 飽和透水係数, 不飽和特性



必要な土質定数: 強度定数



河川堤防の安全性評価に用いる適切な強度定数

「河川堤防の構造検討の手引き(2002)」

表 3.2.3 堤防横断方向の土質試験の項目(力学試験用試料)

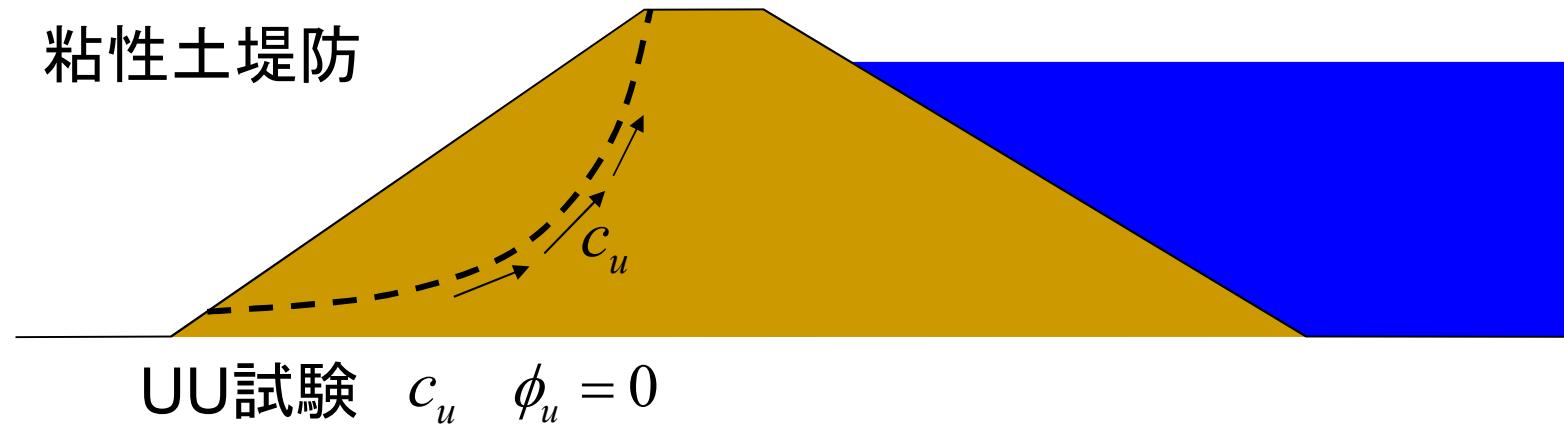
土質試験の項目		礫質土	砂質土	粘性土	得られる定数等
物理試験	土粒子の密度試験	○	○	○	土粒子の密度 ρ_s
	含水量試験	○	○	○	含水比 w_a
	粒度試験	○	○	○	粒径加積曲線、10%粒径 D_{10} 等
	液性限界・塑性限界試験			○	液性限界 w_L 、塑性限界 w_p
	湿潤密度試験	○	○	○	湿潤密度 ρ_f
力学試験	透水試験	○	○		飽和透水係数 k_s
	三軸圧縮試験もしくは等体積一面せん断試験	UU 条件		○	粘着力 c_f (内部摩擦角 ϕ_f)
		CU 条件	○	○	内部摩擦角 ϕ_{cf} (粘着力 c_{cf})
材料試験(堤防新設の場合)		○	○	○	最大乾燥密度 ρ_d^{\max} 等

注 1)UU 条件は非圧密非排水条件、CU 条件は圧密非排水条件である

注 2)土質分類(礫質土、砂質土、粘性土)は表 3.2.1 に同じである

河川堤防の照査・設計において

全応力解析である修正フェレニウス法で算出する安全率の
力学的な意味



浸潤前(=後)の堤体土の**非排水せん断強さ**で安全率を算定

本当の**粘土**であれば合理的

粘土: ほぼ不透水

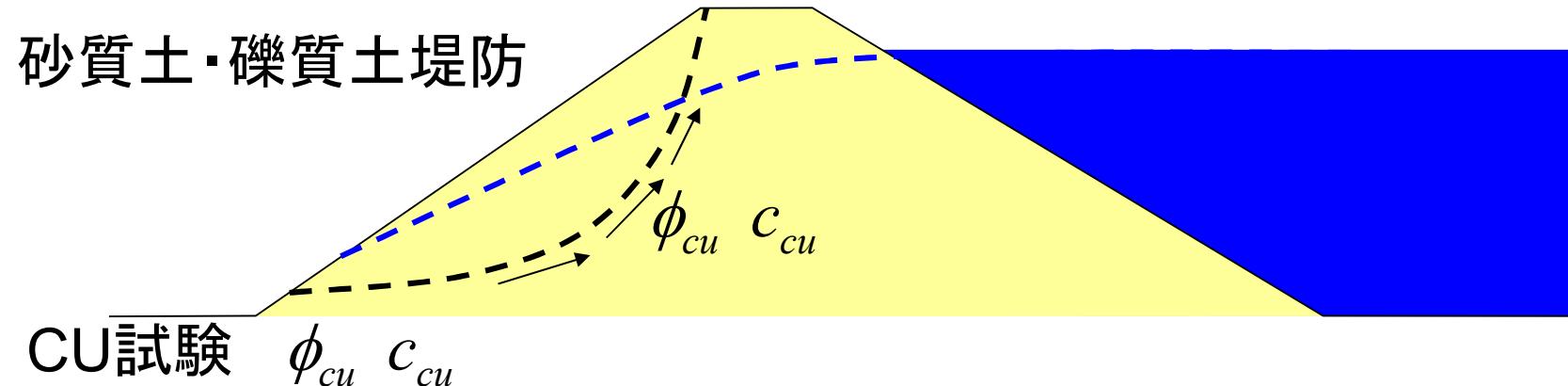
真の粘着力(=非排水せん断強さ)を有する

実際は不適である理由:

人工盛土である堤防土に本当の粘土はほとんどない

河川堤防の照査・設計において

全応力解析である修正フェレニウス法で算出する安全率の
力学的な意味



浸潤時の堤体土の非排水せん断強さで安全率を算定

理屈上は合理的

実際は不適である理由:

三軸試験※で得られる砂質土の非排水せん断強さは非現実的
※完全非排水条件かつ大ひずみ領域

河川堤防の安全性評価に用いる適切な強度定数

「河川堤防の構造検討の手引き(2002)」

表 3.2.3 堤防横断方向の土質試験の項目(力学試験用試料)

土質試験の項目		礫質土	砂質土	粘性土	得られる定数等
物理試験	土粒子の密度試験	○	○	○	土粒子の密度 ρ_s
	含水量試験	○	○	○	含水比 w_a
	粒度試験	○	○	○	粒径加積曲線、10%粒径 D_{10} 等
	液性限界・塑性限界試験			○	液性限界 w_L 、塑性限界 w_p
	湿潤密度試験	○	○	○	湿潤密度 ρ_f
力学試験	透水試験	○	○		飽和透水係数 k_s
	三軸圧縮試験もしくは等体積一面せん断試験	UU 条件		○	粘着力 c_f (内部摩擦角 ϕ_f)
		CU 条件	○	○	内部摩擦角 ϕ_{cf} (粘着力 c_{cf})
材料試験(堤防新設の場合)		○	○	○	最大乾燥密度 ρ_d^{\max} 等

注 1)UU 条件は非圧密非排水条件、CU 条件は圧密非排水条件である

注 2)土質分類(礫質土、砂質土、粘性土)は表 3.2.1 と同じである

詳細点検時に求められた地方整備局ごとの強度定数

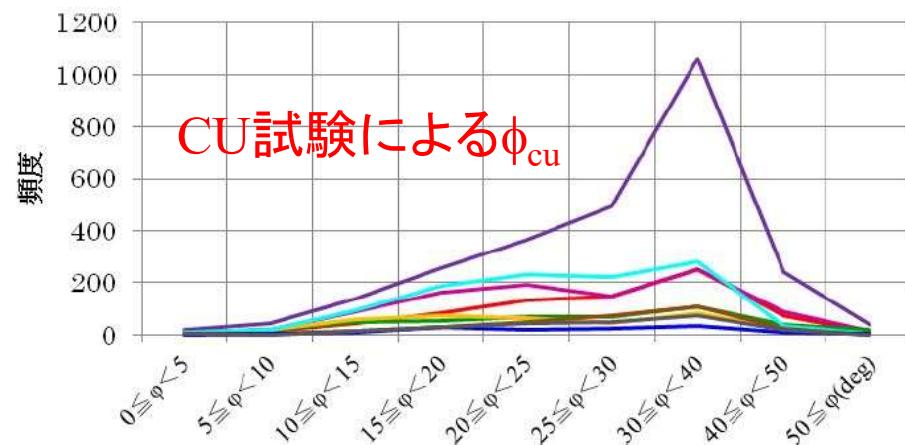


図 A10.4 CU 試験から得られた内部摩擦角 ϕ

- 北海道
- 東北
- 北陸
- 関東
- 中部
- 近畿
- 中国
- 四国
- 九州

CU試験以外の試験による強度定数も現場の判断で使用
(地方整備局毎に特色有り)

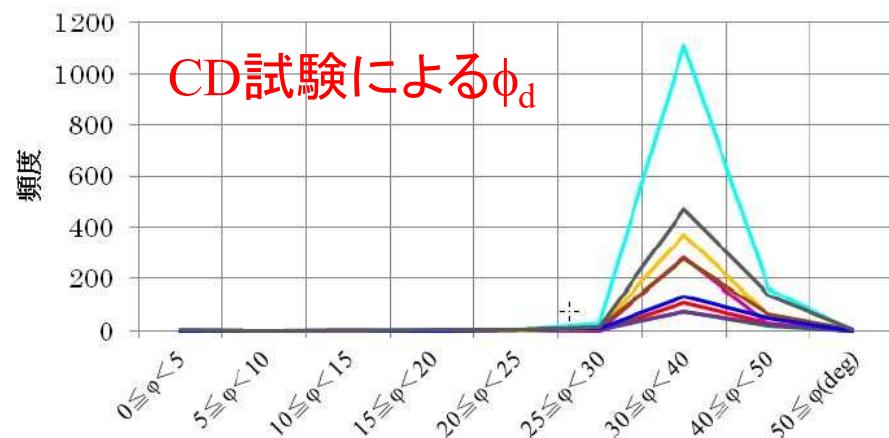


図 A10.8 CD 試験から得られた内部摩擦角 ϕ

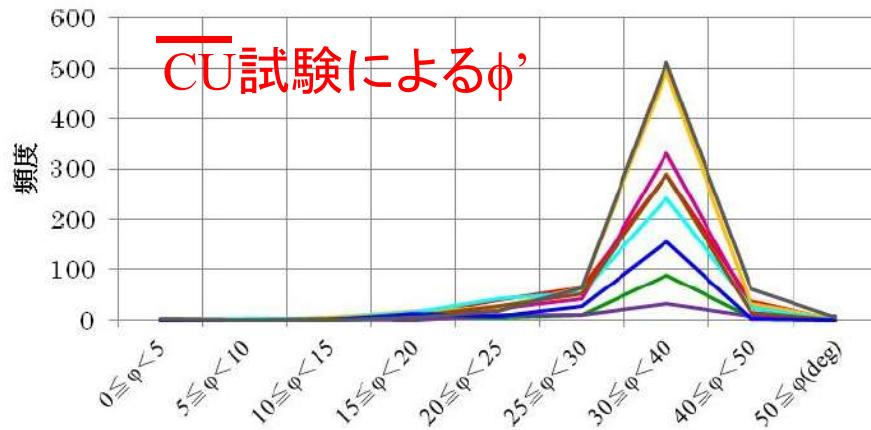


図 A10.6 CUB 試験から得られた内部摩擦角 ϕ (有効応力)

「河川堤防の浸透に対する照査・設計のポイント(旧版)」より

河川堤防の安全性評価に用いる適切な強度定数

「河川堤防の構造検討の手引き(改訂版)(2012)」**実情に沿った改訂**

表 3.2.3 堤防横断方向の土質試験の項目(力学試験用試料)

土質試験の項目		礫質土	砂質土	粘性土	得られる定数等
物理試験	土粒子の密度試験	○	○	○	土粒子の密度 ρ_s
	含水量試験	○	○	○	含水比 w_a
	粒度試験	○	○	○	粒径加積曲線、10%粒径 D_{10} 等
	液性限界・塑性限界試験	注 3)	注 3)	○	液性限界 w_L 、塑性限界 w_P
	湿潤密度試験	○	○	○	湿潤密度 ρ_t
力学試験	透水試験	○	○		飽和透水係数 k_s
	三軸圧縮試験 もしくは一面せん断試験 ^{注4)}	UU 試験		○	粘着力 c_u (内部摩擦角 ϕ_u)
		CU 試験	○	○	粘着力 c_{cu} 、内部摩擦角 ϕ_{cu}
		CUB 試験	○	○	粘着力 c , c' 内部摩擦角 ϕ , ϕ'
		CD 試験	○	○	粘着力 c_d 、内部摩擦角 ϕ_d
材料試験(堤防新設の場合)		○	○	○	最大乾燥密度 ρ_d^{\max} 等

注 1)UU 試験は非圧密非排水条件、CU 試験は圧密非排水条件、CUB 試験は圧密非排水条件(間隙水圧測定)、

CD 試験は圧密排水条件である

注 2)土質分類(礫質土、砂質土、粘性土)は表 3.2.1 と同じである

**現場の技術者の裁量が
格段に増えた**

浸透時のすべり破壊の安定性評価の現状（詳細点検以降）

- ・現行評価法：浸透解析と円弧すべり解析を組み合わせた全応力解析
- ・強度定数：適切な試験条件を選択

河川堤防の構造検討の手引き

三軸圧縮試験時の試験条件

砂や砂礫 → CU, CUB, CD (平成24年2月改訂)

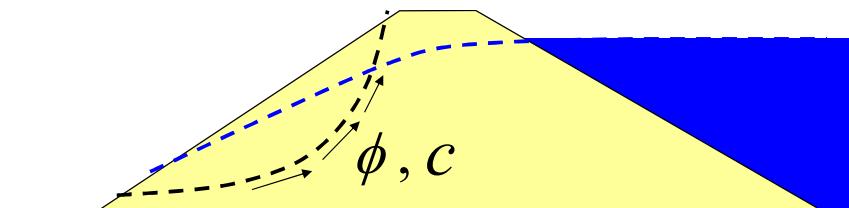
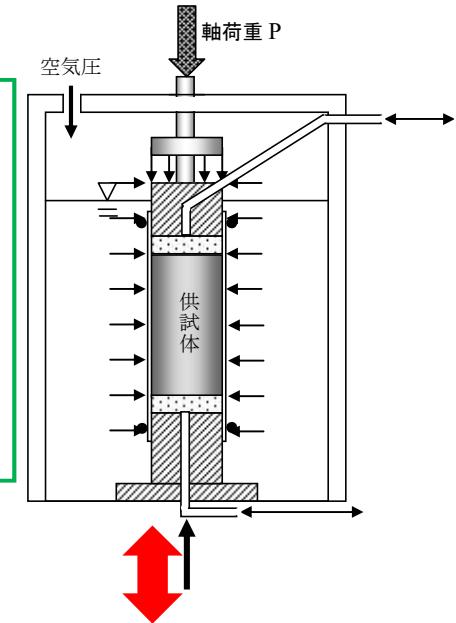
非排水せん断 排水せん断

粘性土 → UU, CU (平成24年2月改訂)

非圧密 圧密

三軸試験の特殊性

- ・普及している
- ・完全非排水条件、完全排水条件の「理想(非現実)」条件が実現可能
- ・せん断状態が対象とする河川堤防の破壊状態と必ずしも一致しない



全応力法の円弧すべり解析

- ・河川堤防の浸透すべり破壊の実現象(拘束圧レベル、ひずみレベル)に即した試験条件を選択すべき

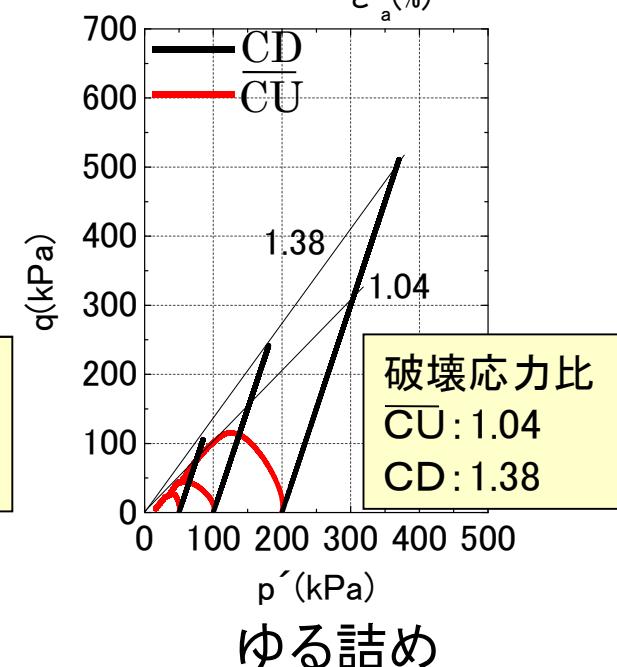
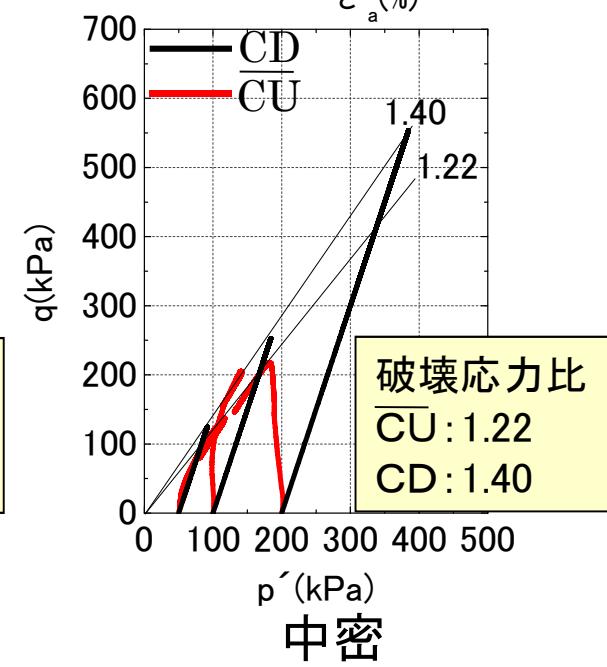
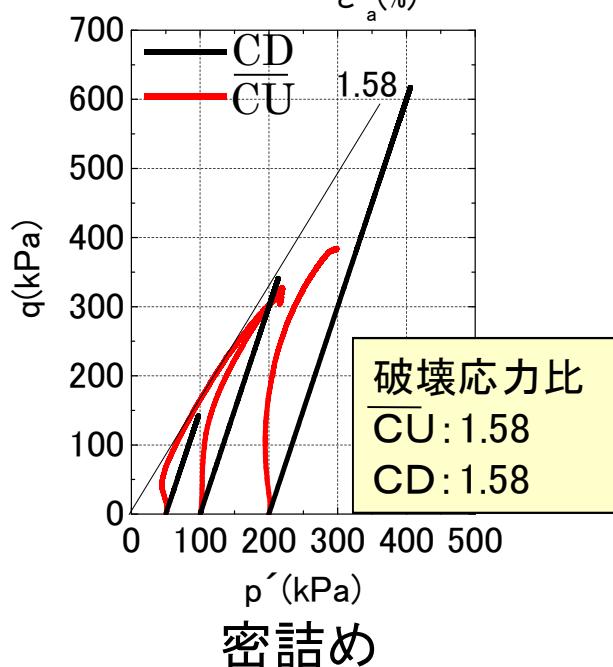
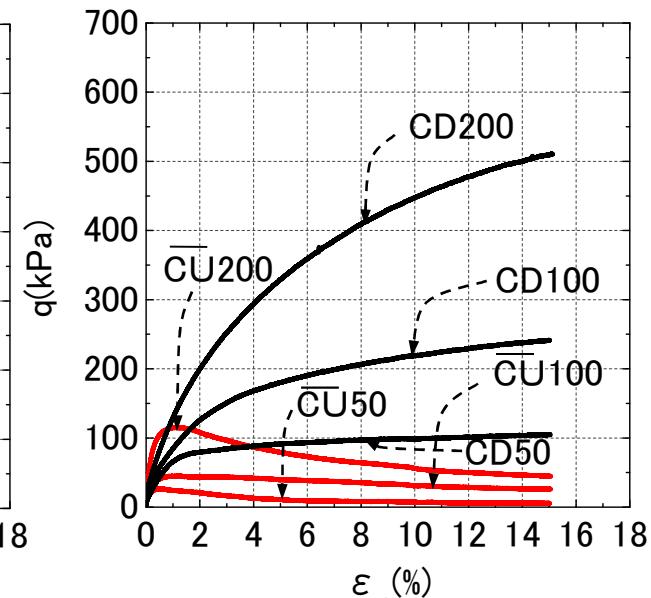
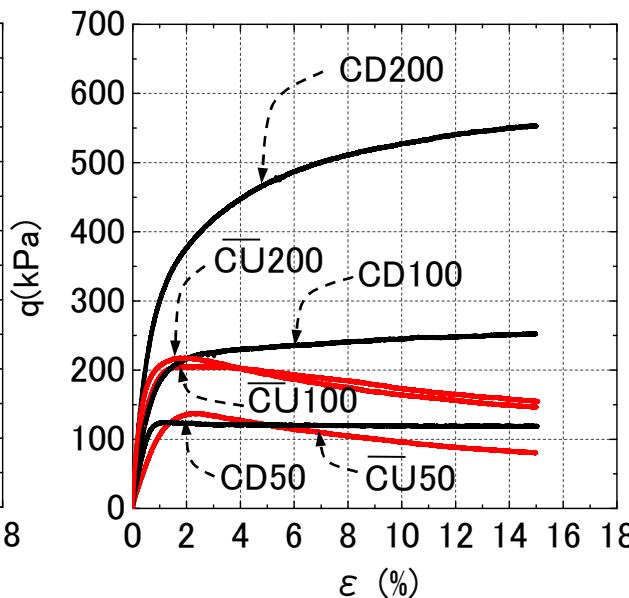
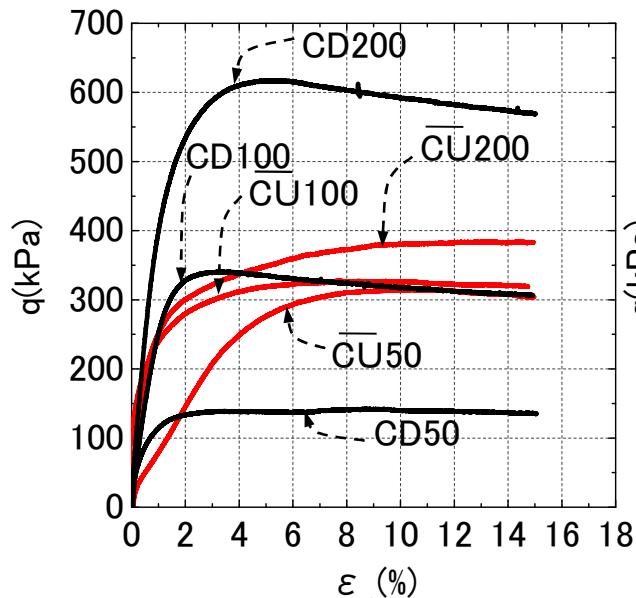
現実の砂質・砂礫系堤防

CU条件 → 完全非排水せん断条件は非現実的

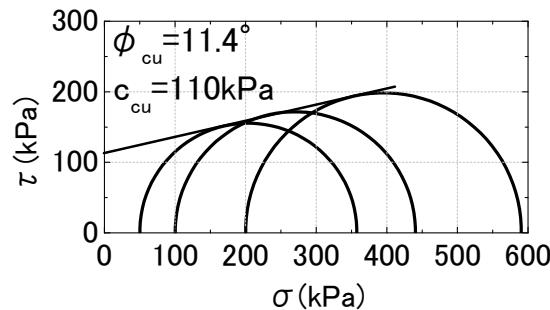
(実在しない見かけの粘着力の原因、ばらつきの要因)

CD条件 → 有効応力、ひずみレベルが増大し続ける三軸試験の排水せん断条件は、有効応力が減少しつつ破壊に至る浸透すべり破壊とは大きく異なる
(過大評価の原因)

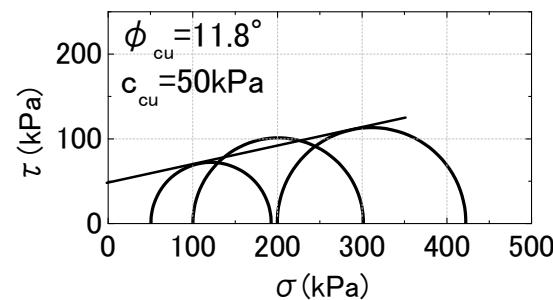
三軸試験例（礫質砂：応力～ひずみ関係と有効応力経路）



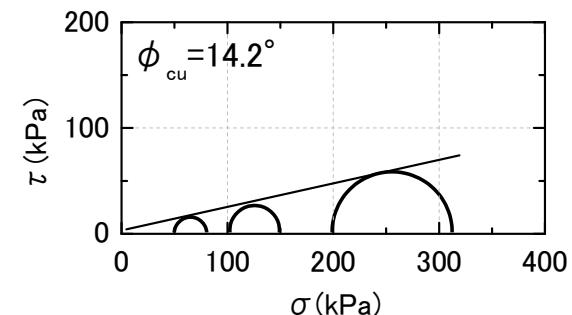
三軸試験条件による強度定数の違い



密詰め



中密



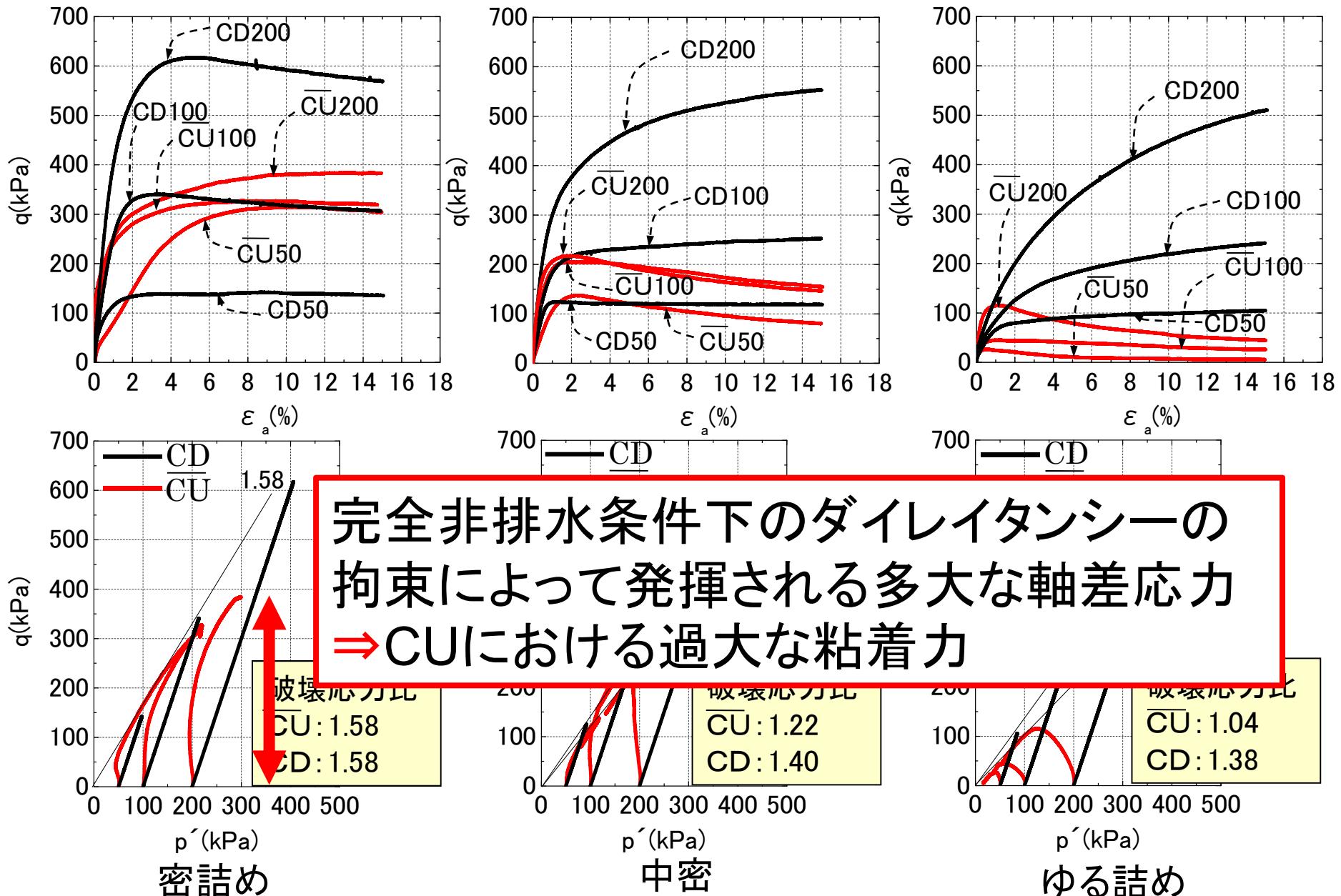
ゆる詰め

$$\overline{\text{CU}}(\text{全応力}) = \text{CU}$$

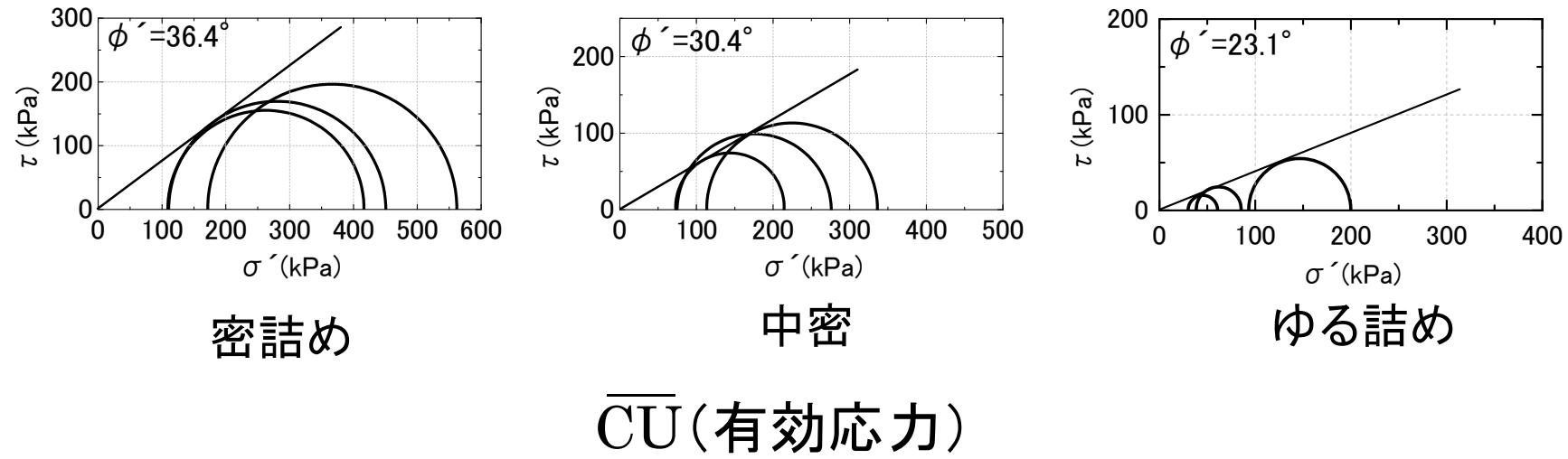
密詰めになるほど過大な粘着力

実験の種類	$\phi_{cu} (\circ)$	$c_{cu} (\text{kPa})$	$\phi' (\circ)$	$\phi_d (\circ)$
密詰め	11.4	110	36.4	38.8
中密	11.8	50	30.4	35.3
ゆる詰め	14.2	0	23.1	34.3

三軸試験例（礫質砂：応力～ひずみ関係と有効応力経路）



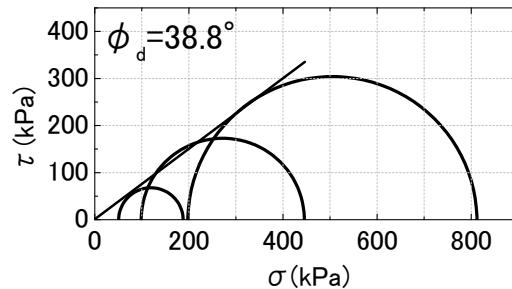
三軸試験条件による強度定数の違い



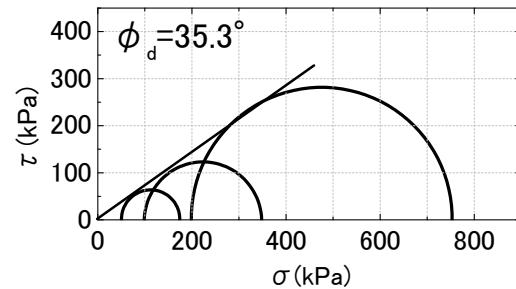
密詰めになるほど ϕ' が大きくなる

実験の種類	$\phi_{cu}(\circ)$	$c_{cu}(kPa)$	$\phi'(\circ)$	$\phi_d(\circ)$
密詰め	11.4	110	36.4	38.8
中 密	11.8	50	30.4	35.3
ゆる詰め	14.2	0	23.1	34.3

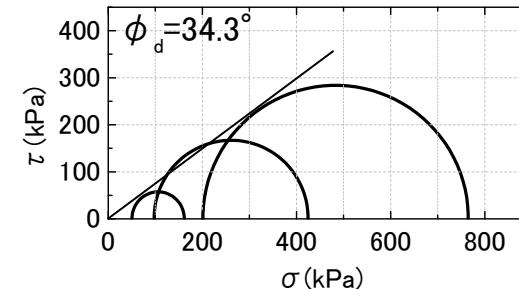
三軸試験条件による強度定数の違い



密詰め



中密



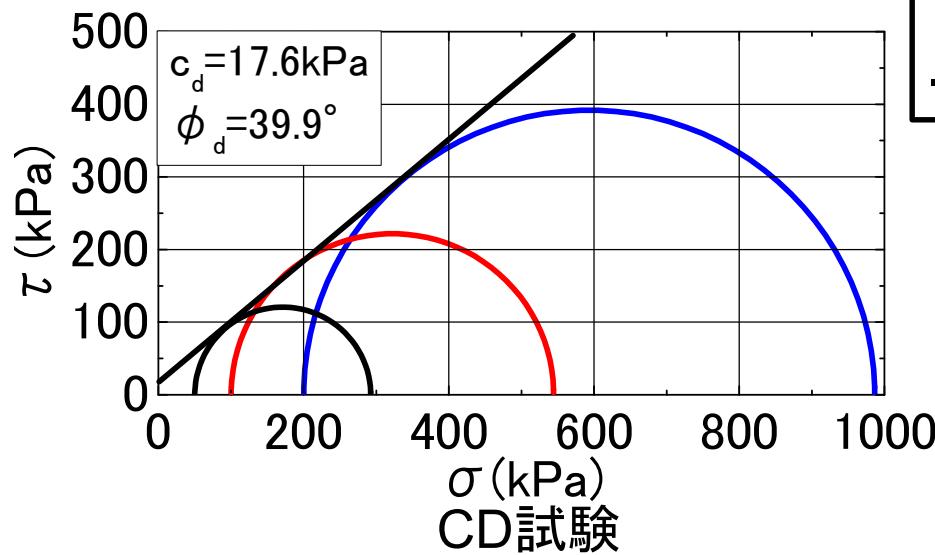
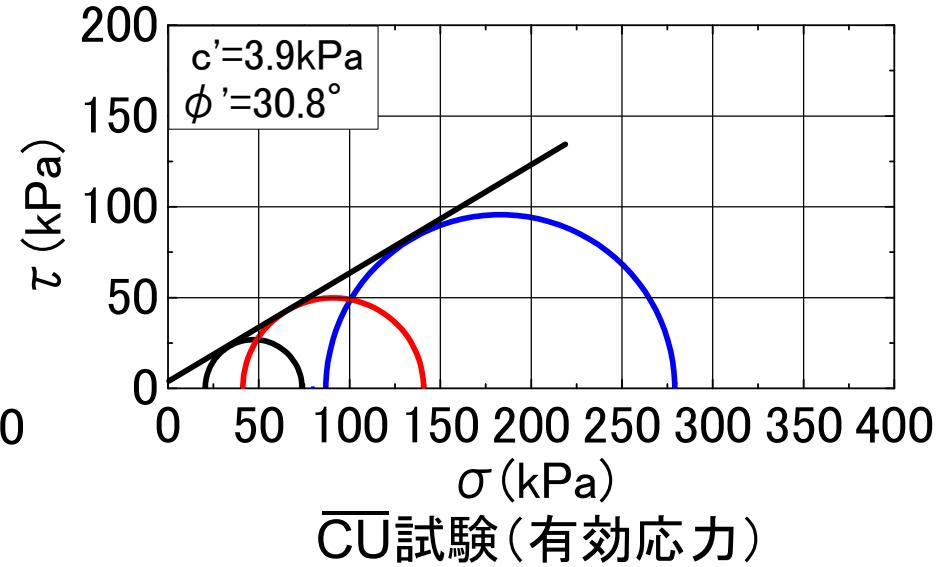
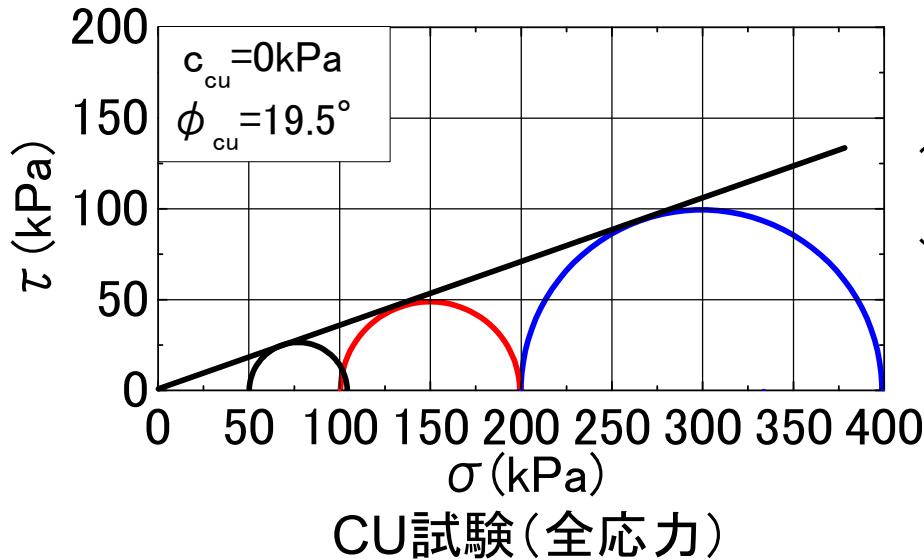
ゆる詰め

CD

密度にあまり依存しない

実験の種類	$\phi_{cu}(\circ)$	$c_{cu}(kPa)$	$\phi'(\circ)$	$\phi_d(\circ)$
密詰め	11.4	110	36.4	38.8
中密	11.8	50	30.4	35.3
ゆる詰め	14.2	0	23.1	34.3

試験例（ゆる詰め礫質砂試料）



有効拘束圧

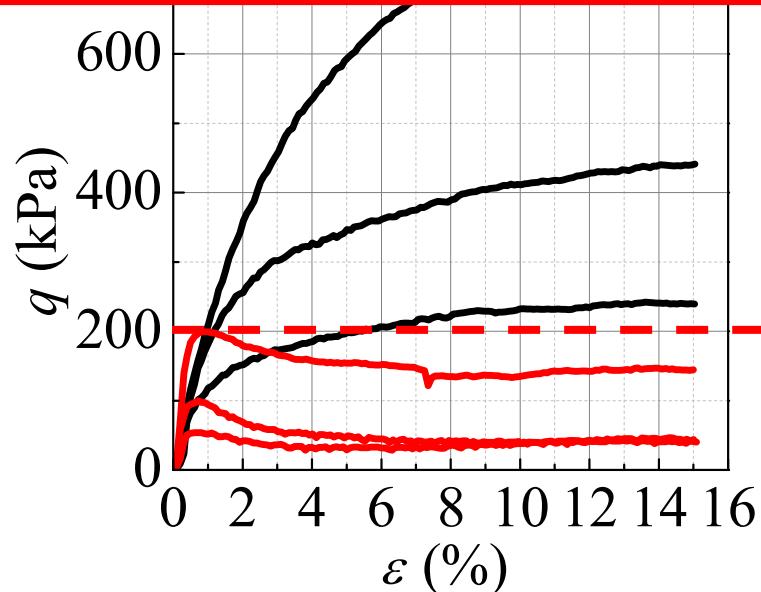
— 50kPa — 100kPa — 200kPa

相対密度80%の値

試験条件	粘着力c	内部摩擦角 ϕ
CU試験	0	19.6°
$\overline{\text{CU}}\text{試験}$	3.9	30.8°
CD試験	17.6	39.9°

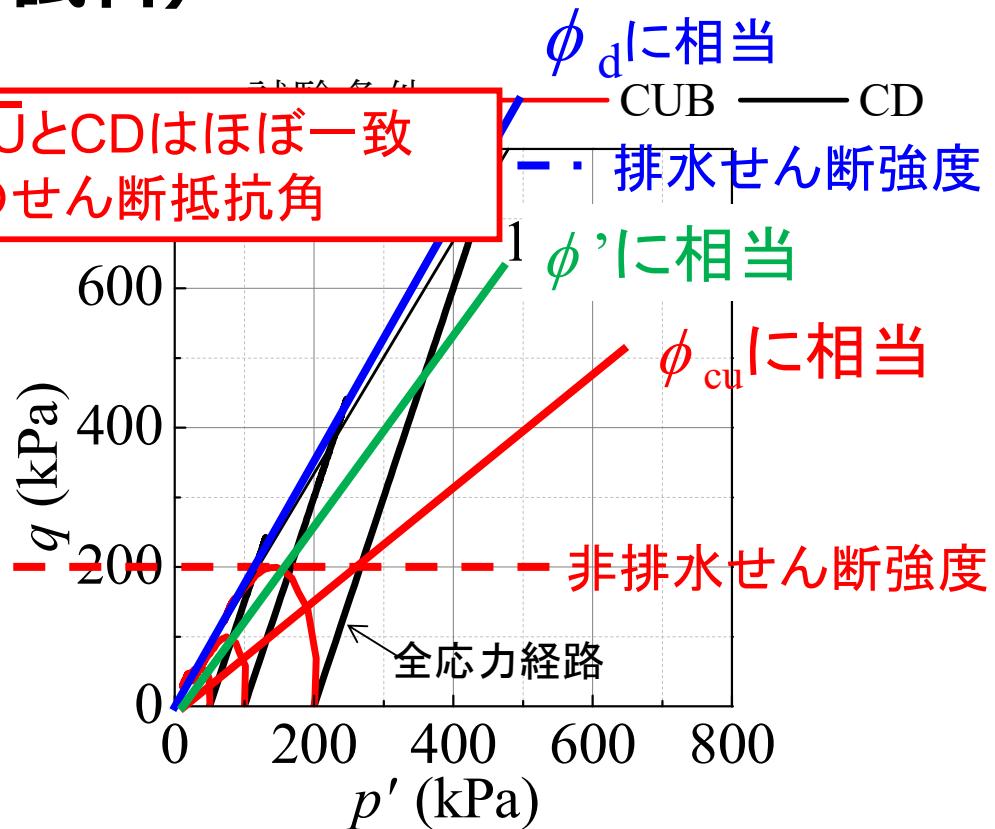
試験例 (ゆる詰め礫質砂試料)

構造崩壊が顕著でない変相まではCUとCDはほぼ一致
 $\Rightarrow \phi'$ は小ひずみレベルでの排水時のせん断抵抗角



応力～ひずみ関係

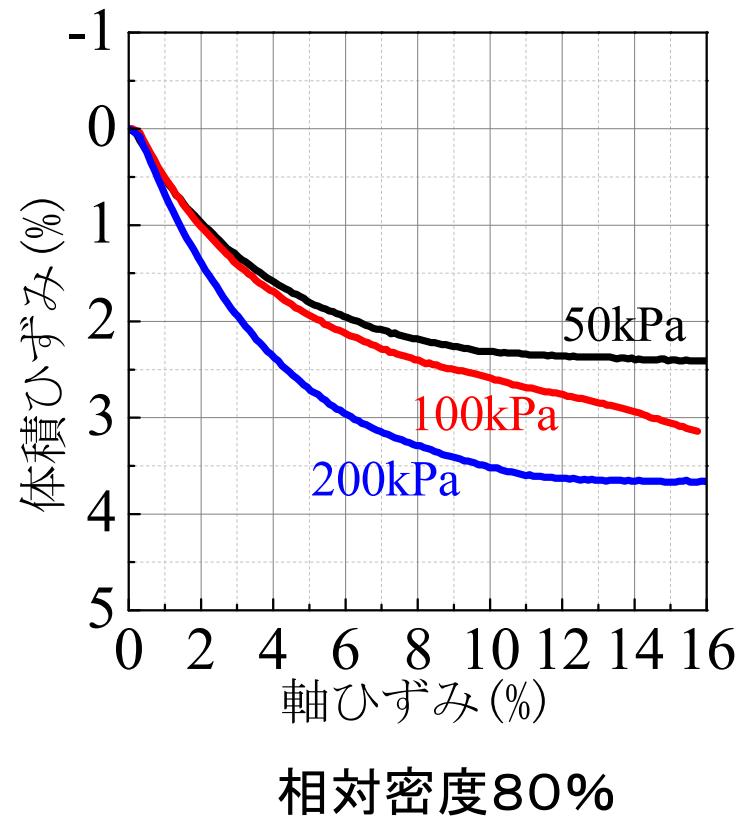
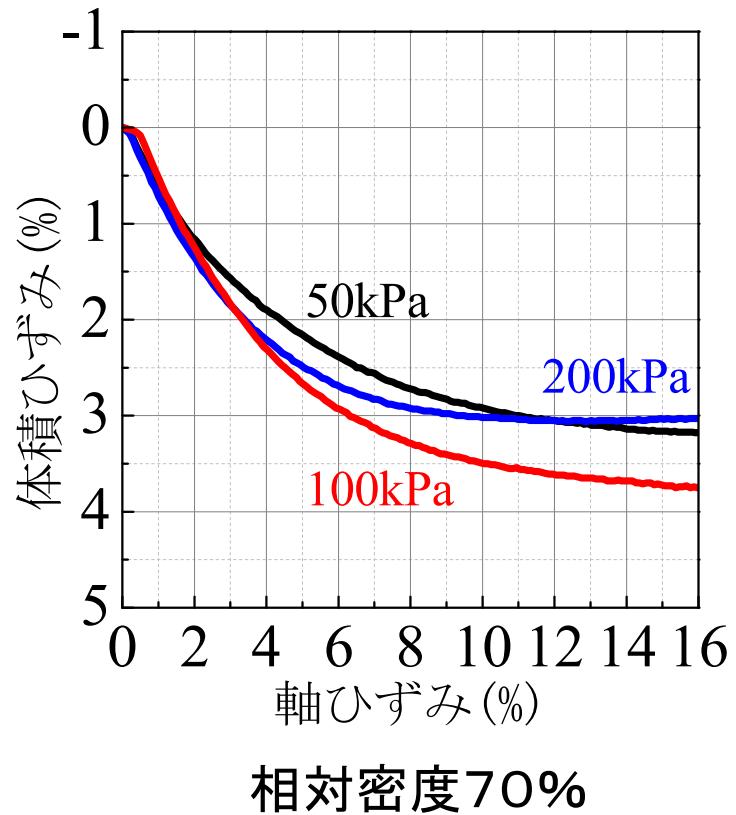
多くの場合, $\phi_{cu} < \phi' < \phi_d$ となる。



全応力 & 有効応力経路

排水せん断強度を発揮するためには、十分な構造崩壊(塑性圧縮)を伴う必要がある。

試験例（ゆる詰め礫質砂試料）



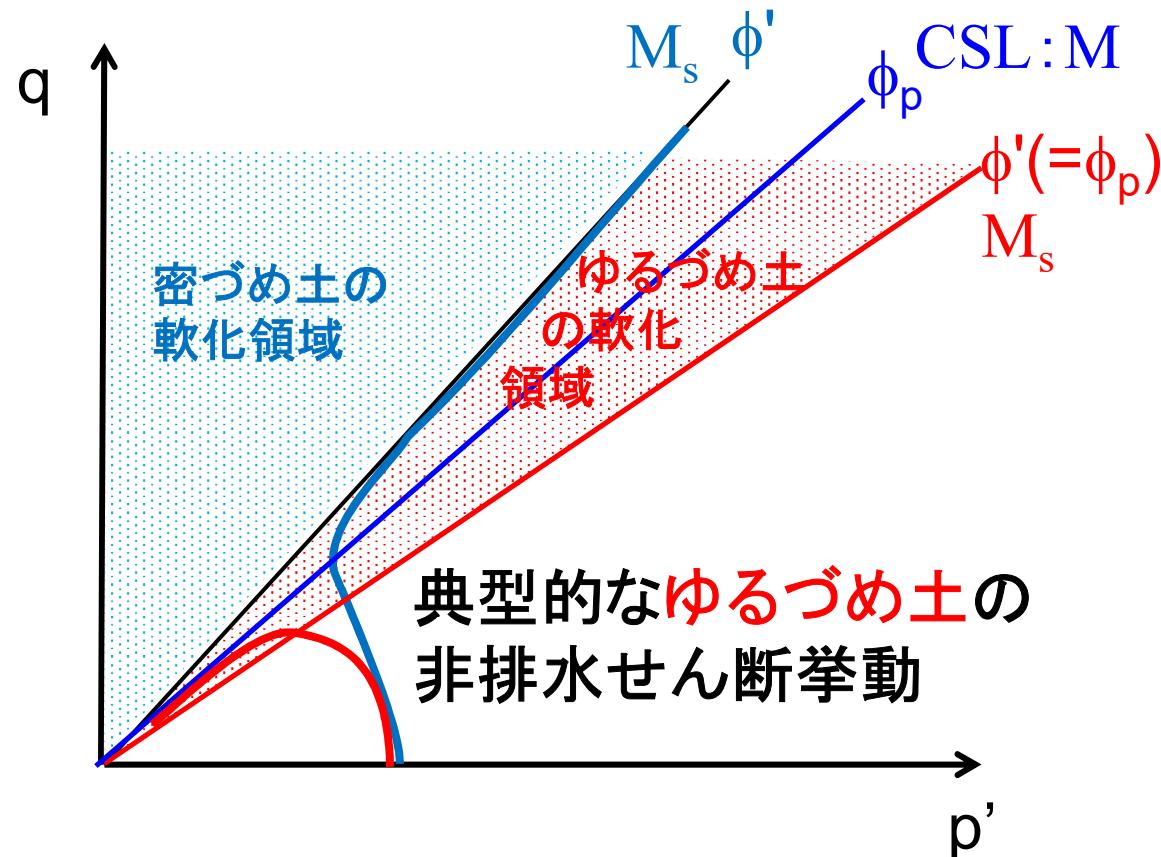
CD試験における体積ひずみ～軸ひずみ関係

浸透時のすべり破壊の安定性評価の現状

弾塑性論に基づく三軸試験条件と強度定数の解釈

三軸試験から求められる強度定数→軟化領域の敷居線

典型的な密づめ堤体土の非排水せん断挙動



様々な実際の堤体土を試験してたどり着いた結論

「河川堤防の構造検討の手引き(改訂版)(2012)」

表 3.2.3 堤防横断方向の土質試験の項目(力学試験用試料)

土質試験の項目		礫質土	砂質土	粘性土	得られる定数等
物理試験	土粒子の密度試験	○	○	○	土粒子の密度 ρ_s
	含水量試験	○	○	○	
	粒度試験	○	○	○	
	CUIは妥当ではない CDは過大評価	注3) ○	注3) ○	○	細粒分含有率だけで粘性土と判定してはだめ 堤防には本当の粘土はない！
力学試験	透水試験	○	○	○	飽和水係数 k_s
	三軸圧縮試験 もしくは一面せん断試験 ^{注4)}	UU 試験	○	○	粘着力 c_u (内部摩擦角 ϕ_u)
		CU 試験	○	○	粘着力 c_{cu} , 内部摩擦角 ϕ_{cu}
		CUB 試験	○	○	粘着力 c , c' , 内部摩擦角 ϕ , ϕ'
		CD 試験	○	○	粘着力 c_d , 内部摩擦角 ϕ_d
材料試験(堤防新設の場合)		○	○	○	最大乾燥密度 ρ_{dmax} 等

注 1)UU 試験は非圧密非排水条件、CU 試験は圧密非排水条件、CUB 試験は圧密非排水条件(間隙水圧測定)、
CD 試験は圧密排水条件である

注 2)土質分類(礫質土、砂質土、粘性土)は表 3.2.1 に同じである

様々な実際の堤体土を試験してたどり着いた結論

「河川堤防の構造検討の手引き(改訂版)(2012)」

表 3.2.3 堤防横断方向の土質試験の項目(力学試験用試料)

土質試験の項目		礫質土	砂質土	粘性土	得られる定数等
物理試験	土粒子の密度試験	○	○	○	土粒子の密度 ρ_s
	含水量試験	○	○	○	含水比 w_a
	粒度試験	○	○	○	粒径加積曲線、10%粒径 D_{10} 等
	液性限界・塑性限界試験	注 3)	注 3)	○	液性限界 w_L 、塑性限界 w_P
	湿潤密度試験	○	○	○	湿潤密度 ρ_t
力学試験	透水試験	○	○		飽和透水係数 k_s
	三軸圧縮試験 もしくは一面せん断試験 ^{注4)}	UU 試験		I ○	粘着力 c_u (内部摩擦角 ϕ_u)
		CU 試験	○	○	粘着力 c_{cu} 、内部摩擦角 ϕ_{cu}
		CUB 試験	○	○	粘着力 c , c' 内部摩擦角 ϕ , ϕ'
		CD 試験	○	○	粘着力 c_d 、内部摩擦角 ϕ_d
材料試験(堤防新設の場合)		○	○	○	最大乾燥密度 ρ_{dmax} 等

注 1)UU 試験は非圧密非排水条件、CU 試験は圧密非排水条件、CUB 試験は圧密非排水条件(間隙水圧測定)、
CD 試験は圧密排水条件である

注 2)土質分類(礫質土、砂質土、粘性土)は表 3.2.1 に同じである

さらに進んで新たな試験法の提案

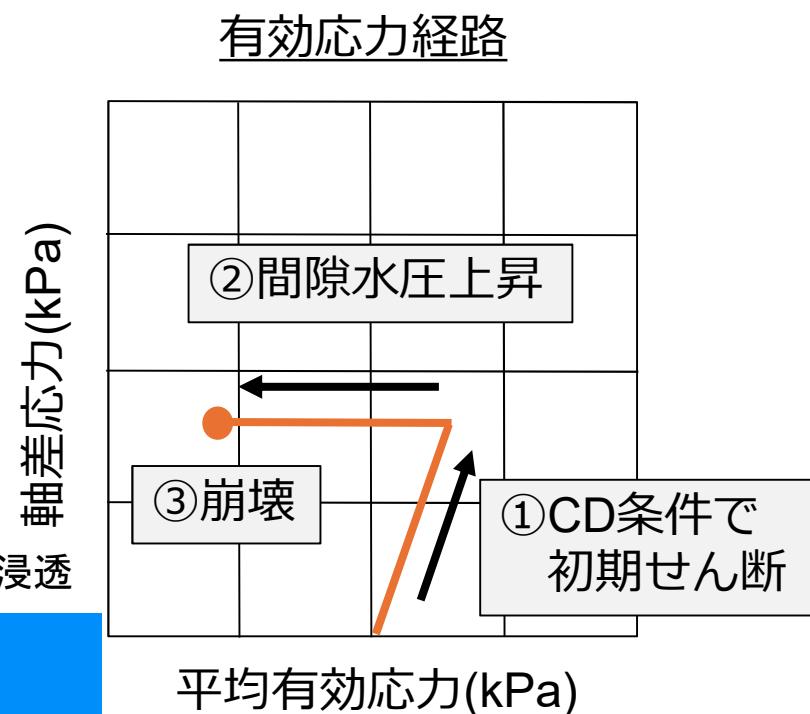
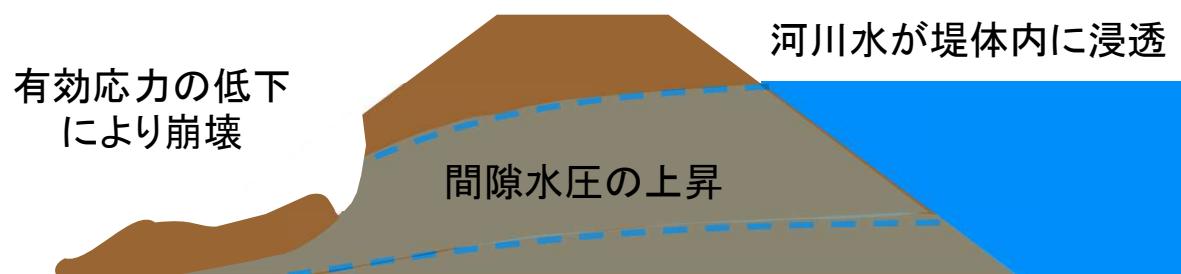
吸水軟化試験

◆ 吸水軟化試験

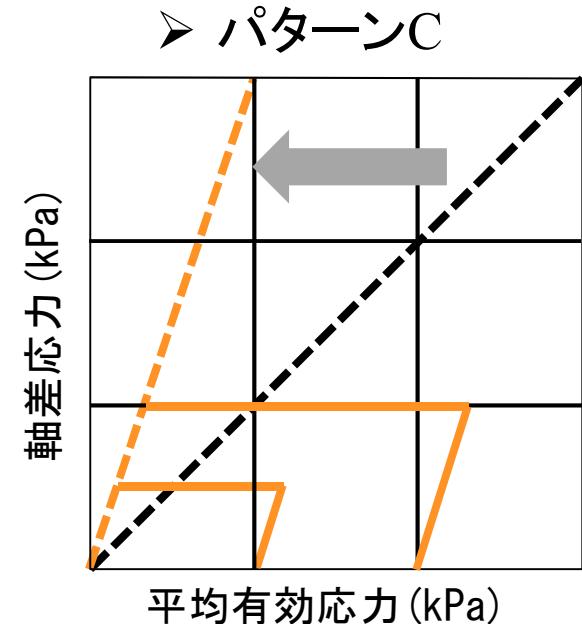
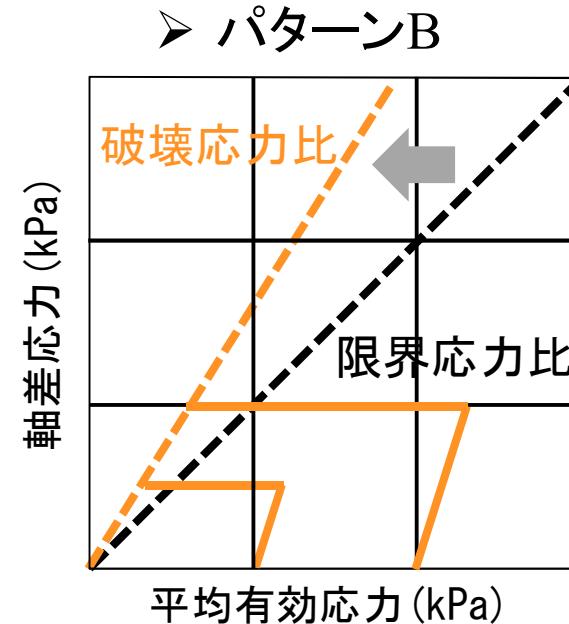
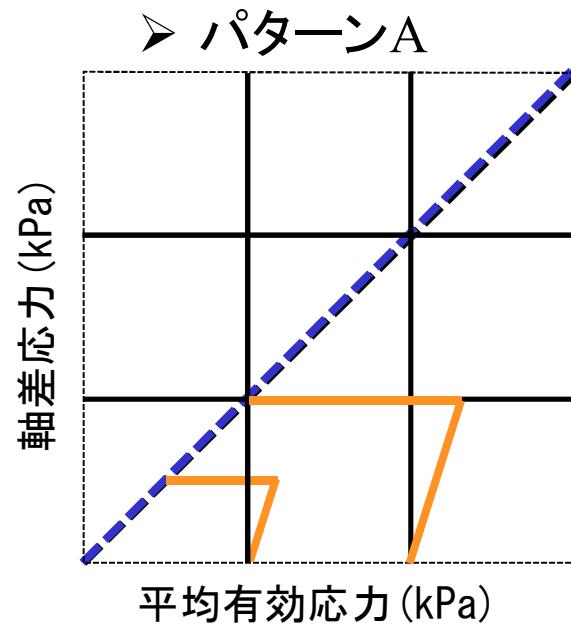
堤防の浸透すべり破壊を模擬した、低拘束圧、低ひずみレベル、低有効応力条件でのせん断強度が評価可能

◆ 試験手順

- ①等方圧密後 + 初期せん断 → 実地盤を模擬
- ②軸差応力一定 + 間隙水圧上昇 → 堤防への浸透
- ③低応力条件下 + 有効応力低下 → 崩壊



粘性土堤防にて実施した吸水軟化試験結果の分類



粘着力に相当するようなせん断抵抗が増加

・粘土もどき細粒土

浸透時に摩擦強度のみしか発揮しない砂質土のせん断特性

本当の粘性土

浸透時も卓越した粘着力を発揮するような粘性土本来の特性

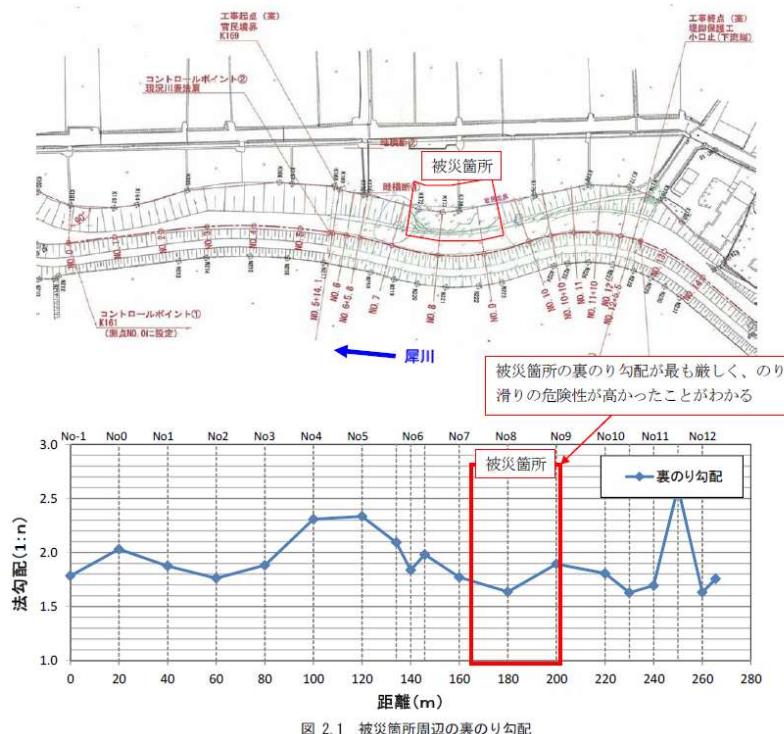
現存する粘性土堤防のほとんどは浸透時に粘着力を発揮しない摩擦性材料

「粘土もどき細粒土」

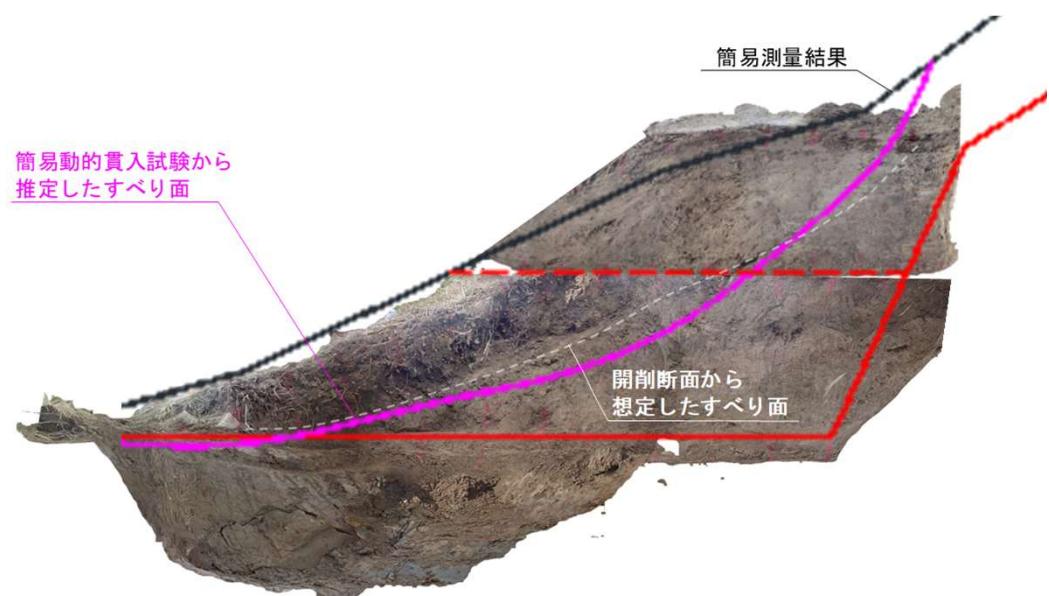
犀川堤防の法すべり被災事例

被災箇所状況※

- ▶ 被災時の水位から降雨によるすべり破壊と考えられる
- ▶ 被災箇所は緩やかな湾曲部で下流に比べると急勾配



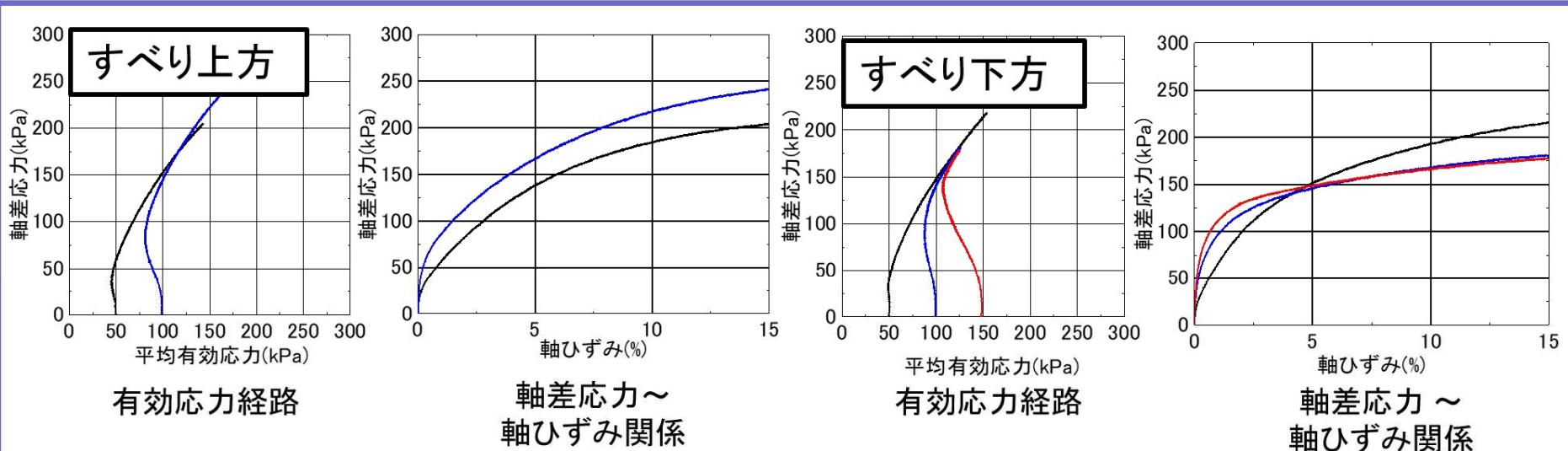
被災箇所平面図



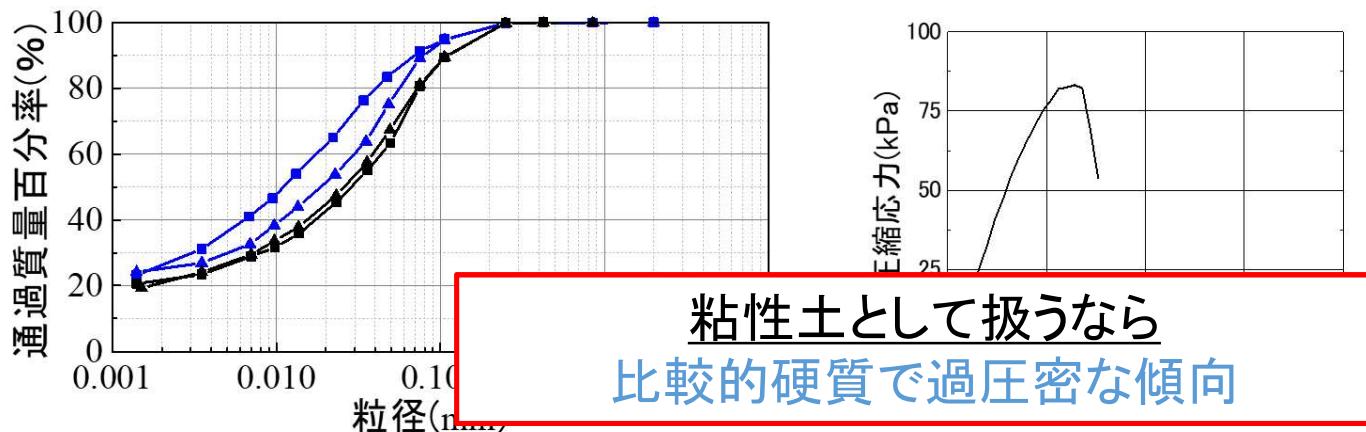
開削調査で確認されたすべり面※

※石原ら、法すべりが生じた犀川堤防における崩壊範囲に係る調査、第54回地盤工学会研究発表

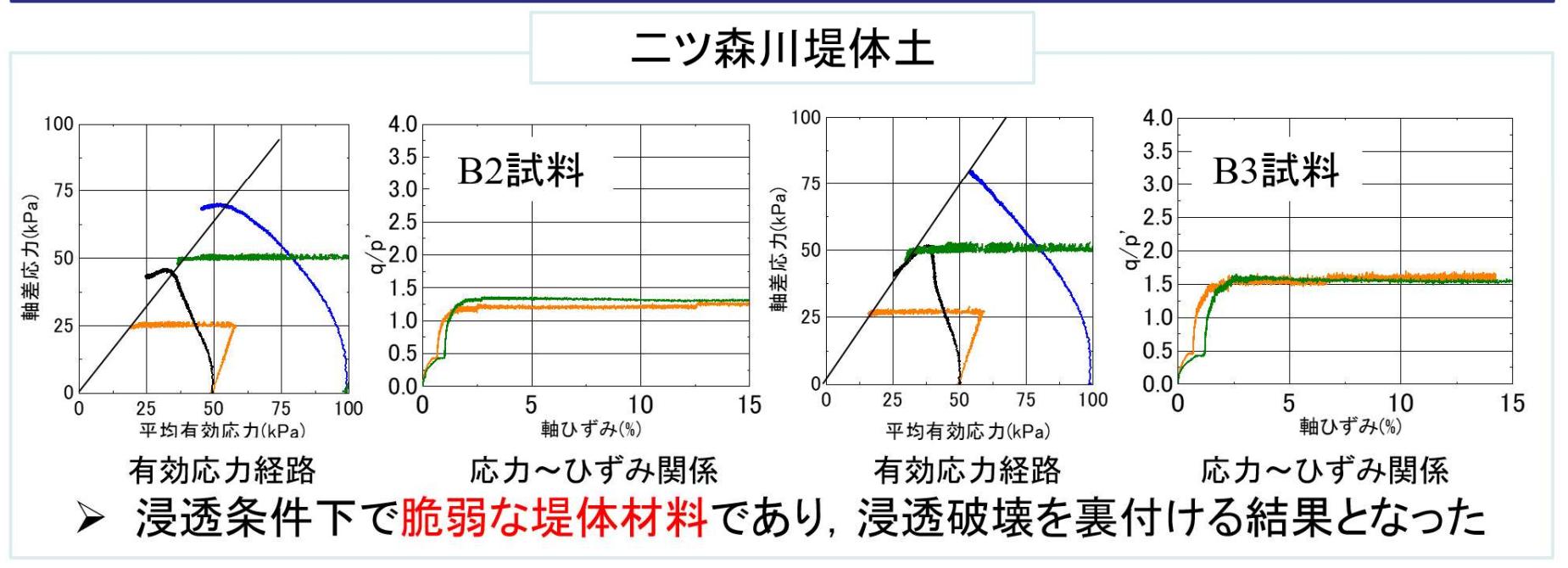
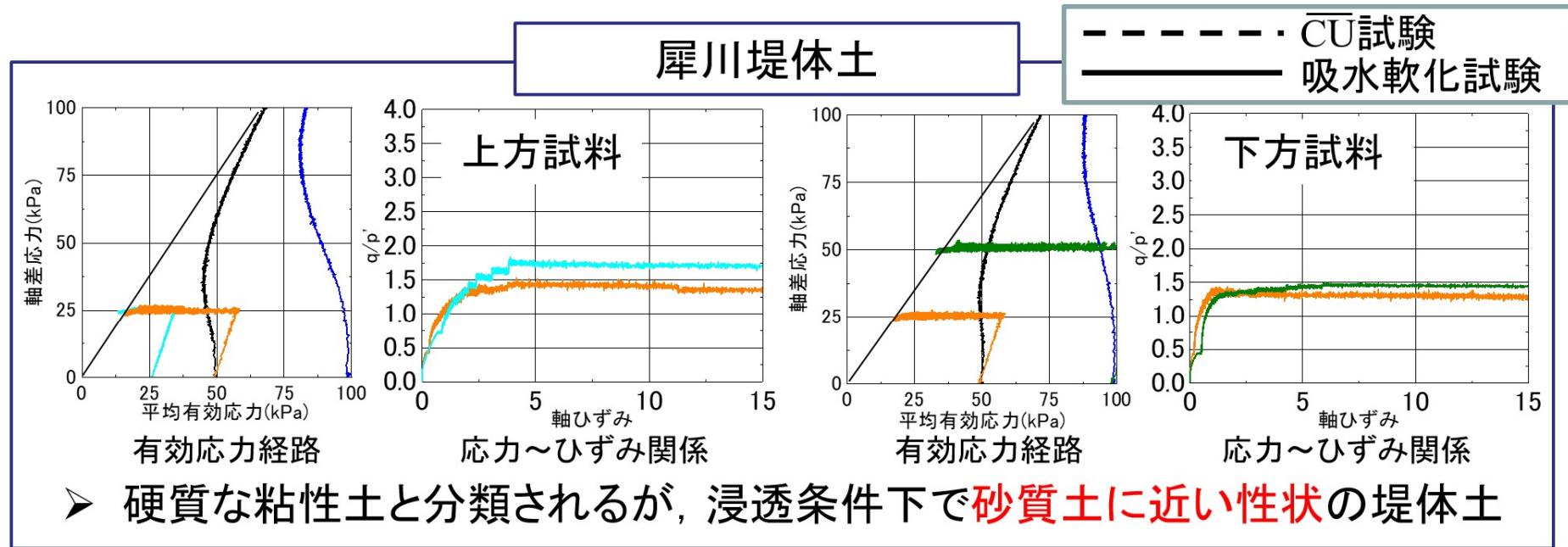
犀川堤防の法すべり被災事例(三軸圧縮試験と一軸圧縮試験)



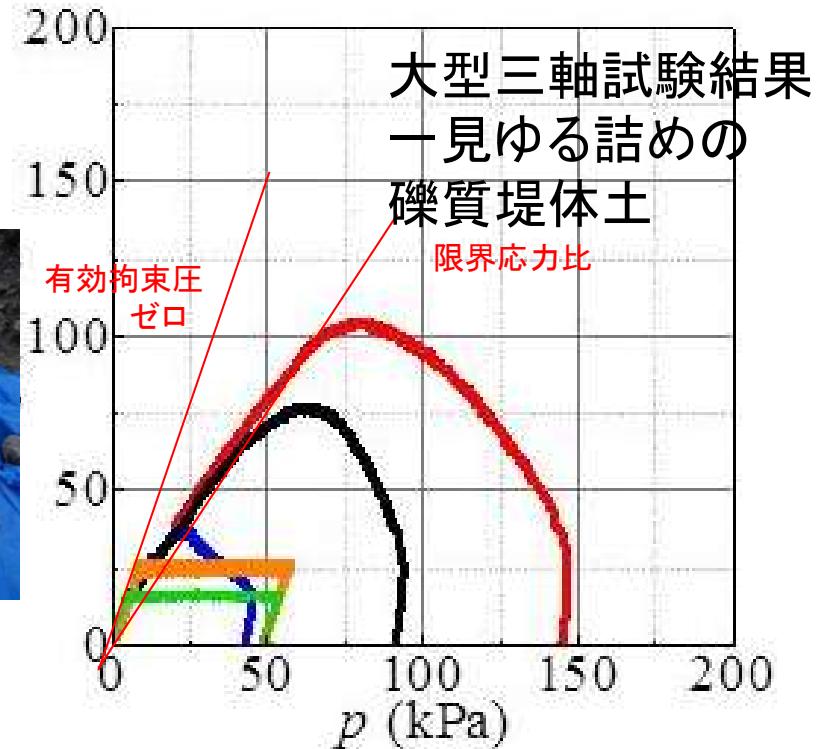
- ◆ 変相後に軸差応力が増加し続ける過圧密粘土な傾向
- ◆ 塑性膨張を伴う硬化に転じる変相時の軸ひずみは1~2%と小さい



犀川堤防の法すべり被災事例(吸水軟化試験)十二ツ森川堤防



吸水軟化試験による礫質堤防土の浸透時の強度特性の評価

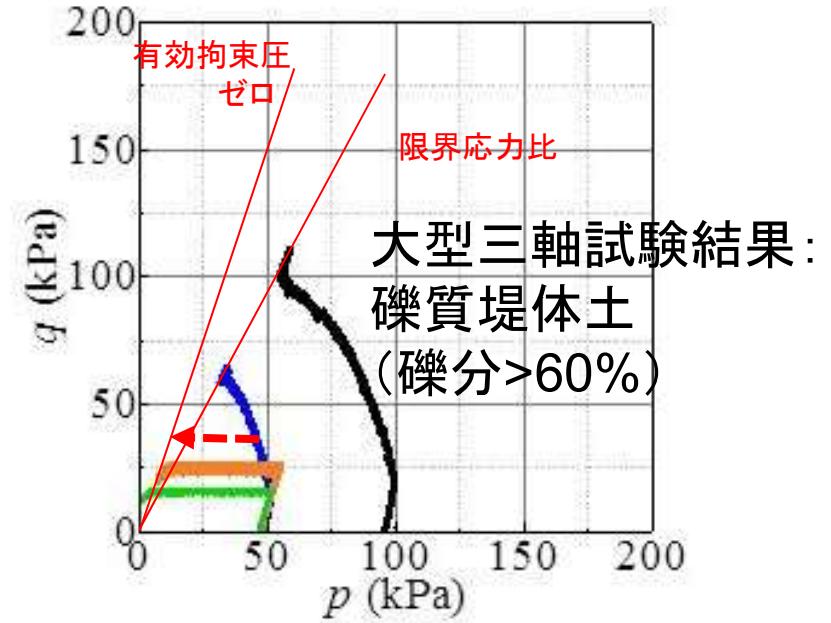


礫堤防での試料採取

試験試料の調整

大型三軸試験

吸水軟化試験による浸透破壊時の強度特性の評価 (実) 大スケールの礫質土堤体(土)の粘り強さの評価



耐越流性能
も高い

庄内川での堤防湛水モデル実験(H29.1.17-18) H27採択地域課題研究(代表者:杉井教授)

吸水軟化試験のまとめ

- ✓ 細粒土から礫質土の河川堤防土の浸透時のせん断強度を適正に評価できる室内試験法

細粒土堤体

- 比較的硬質な粘性土と判断されるが、浸透時に砂質土と同程度の摩擦抵抗しか発揮せず、締固め度が低い場合は浸透に脆弱



従来のUU試験等でc材として扱うと危険側の評価をする恐れがある

礫質土堤体

- ゆる詰め傾向にあり、CU試験で評価する強度定数は非常に小さいが低有効拘束圧下において比較的高いせん断強度を発揮



過小評価をすることになり、過剰な対策をしてしまう

河川堤防の安全性を評価する際、吸水軟化試験を採用することで精度の高い照査が可能となる

『河川堤防の構造検討の手引き』改訂に向けて 考慮すべきポイント（本発表で関係するもの）

現場透水試験の活用

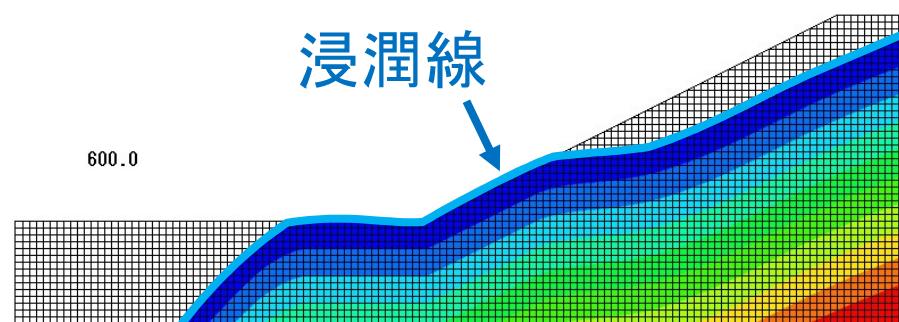
堤体の強度定数を同定する際の試験条件の適正化

安定解析における過剰間隙水圧の適正な評価

不飽和浸透流解析 + 円弧すべり解析

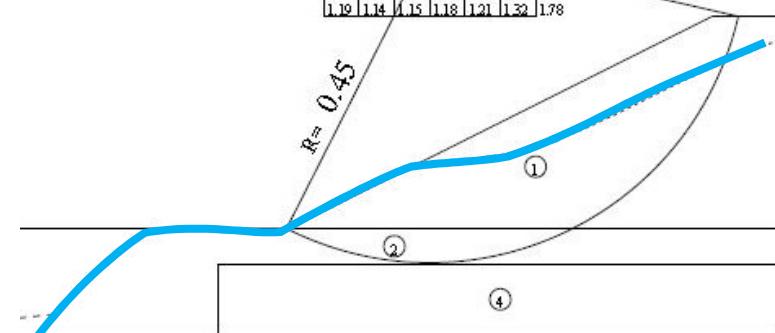


透水性
1
1/10



$F_s = 1.078$

最小安全率											
1.078											
円弧中心座標											
1.20	1.13	1.09	1.23	1.62	1.96	2.33					
1.24	1.12	1.08	1.09	1.48	1.73	2.09					
1.22	1.15	1.13	1.08	1.17	1.60	1.87					
1.22	1.14	1.10	1.13	1.10	1.28	1.74					
1.10	1.14	1.15	1.18	1.21	1.32	1.78					



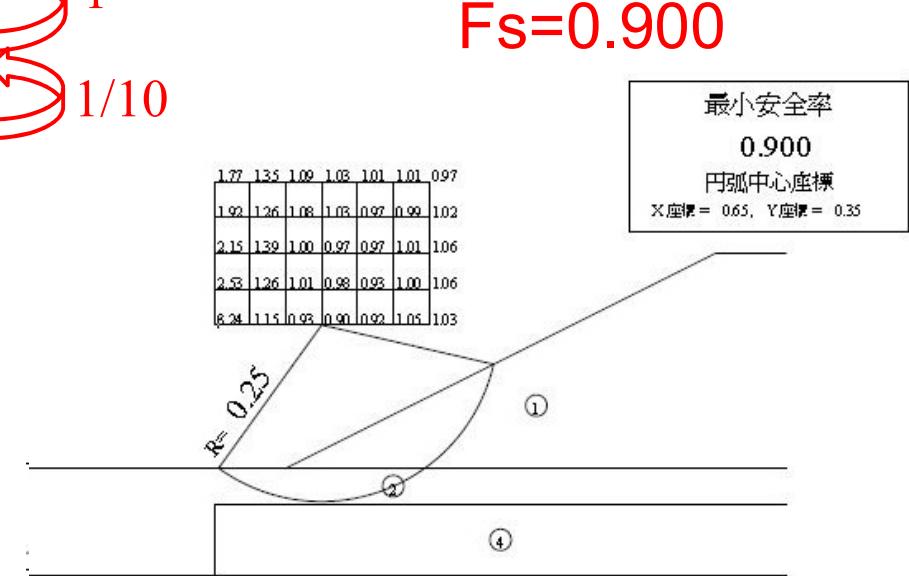
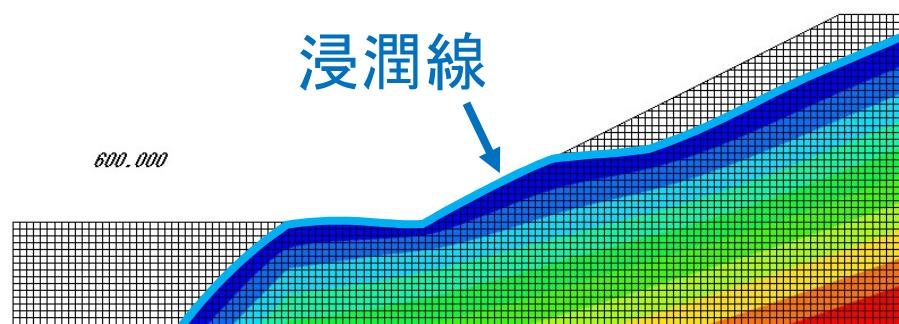
円弧すべり解析

不飽和浸透流解析で得た浸潤線から静水圧を計算し直す
(現行の手引きでの計算方法→安全率を過大評価する危険性あり)

不飽和浸透流解析 + 円弧すべり解析



透水性
1
1/10



円弧すべり解析

不飽和浸透流解析で得た過剰間隙水圧をそのまま使う
(透水性基礎地盤を含めた堤防地盤の不均質性に伴う安全性低下を考慮した
安全率の算定が可能→広義のパイピングによる堤体すべり破壊にも対応)

ま　と　め

『河川堤防の構造検討の手引き』改訂に向けて 考慮すべきポイント（本発表で関係するもの）

現場透水試験の活用

室内試験や粒度だけからは透水性を過小評価するため
現場透水試験によって適正な飽和透水係数を得る
簡易な試験法も活用

堤体の強度定数を同定する際の試験条件の適正化

堤体土質に関係なくCU試験を実施する
吸水軟化試験も推奨

安定解析における過剰間隙水圧の適正な評価

パイピングが懸念される透水性基礎地盤上の堤防の浸
透時の法すべり安定性も適正に評価