

信頼性解析法の河川堤防への適用に関する研究

岐阜大学 工学部 社会基盤工学専攻
本城 勇介
大竹 雄
神谷 浩二

研究の背景と目的

長い歴史の中で順次築造されてきた構造物であり、堤体の強度が不均一

基礎地盤は古い時代からの河川的作用により形成され、極めて複雑

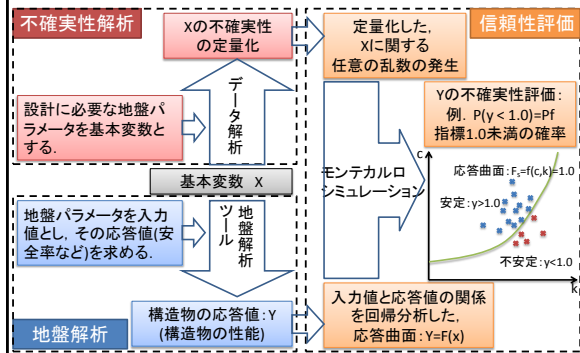
被災した場合、堤体や基礎地盤も破壊されてしまい、被災原因の解明が困難



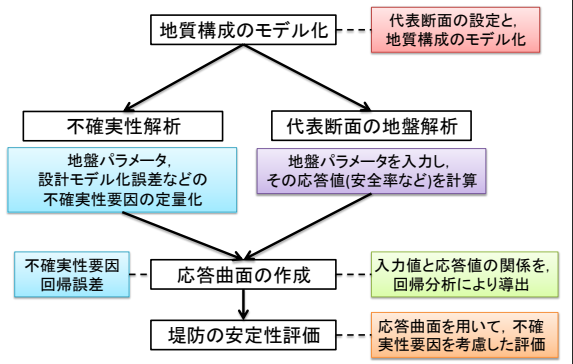
多くの不確実性要因

種々の不確実性を統計解析し、信頼性解析に基づき、河川堤防の安定性を評価する方法の開発と問題点を明確化することを目的とする。

信頼性設計の手順



解析の手順



地盤調査データ

調査項目	
N値, 湿潤密度, 土粒子密度, 間隙比, 粒度組成,	
粒径(D60, D50, D20, D10), 均等係数, 曲率係数, 液性限界,	
塑性限界, 塑性指数, 土質分類, 透水係数(実験値),	
透水係数(計算値), 粘着力(試験値), 内部摩擦角(試験値)	

STA(km)	58	58.4	58.8	59.2	59.6	60	60.4	61.27	62	62.4	62.8	63.2	63.6
標準貫入試験	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
基本物理試験	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
UU試験	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
CU試験	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

STA(km)	64	64.4	64.8	65.2	65.6	66	66.4	66.8	67	67.2	67.6	68
標準貫入試験	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
基本物理試験	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
UU試験	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
CU試験	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

代表断面の設定と地質構成のモデル化

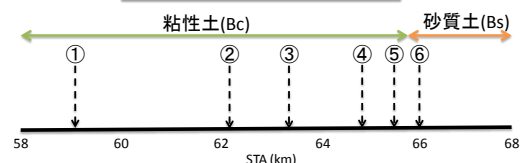
①STA58.8, ②STA62.4, ③STA63.6, ④STA64.8, ⑤STA65.6, ⑥STA66.6断面を代表断面として設定

地質構成のモデル化

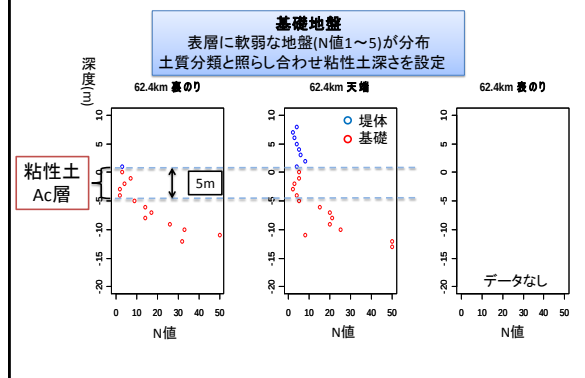
堤体地盤

STA58.8~STA65.6を粘性土層(Bc層)

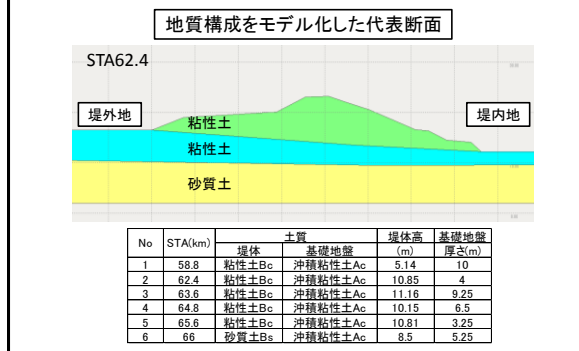
上流部STA66.0を砂質土層(Bs層)



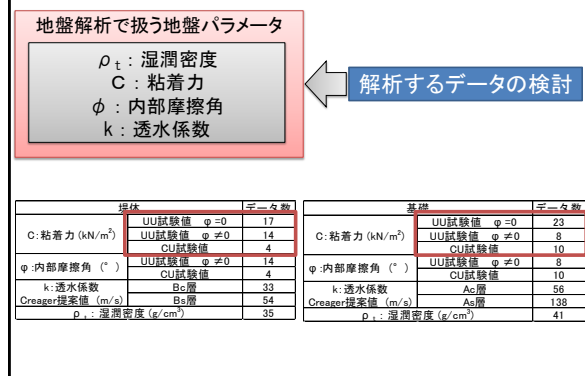
代表断面の設定と地質構成のモデル化



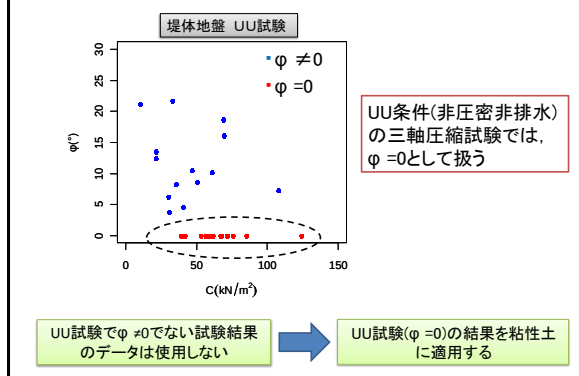
代表断面の設定と地質構成のモデル化



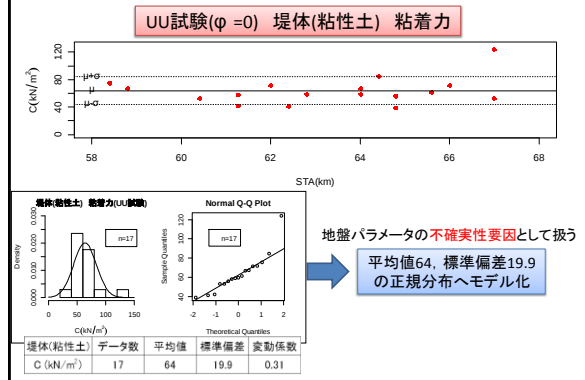
不確実性解析(地盤パラメータ)



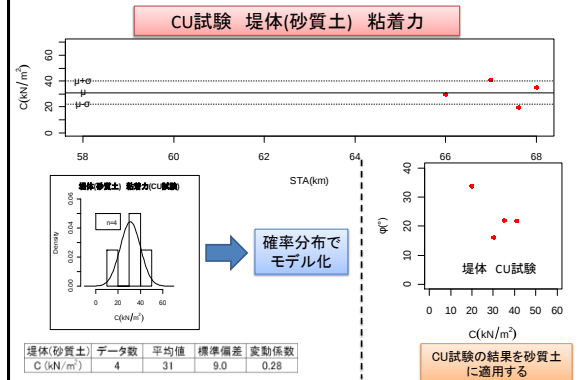
UU試験



地盤パラメータの解析(UU試験)

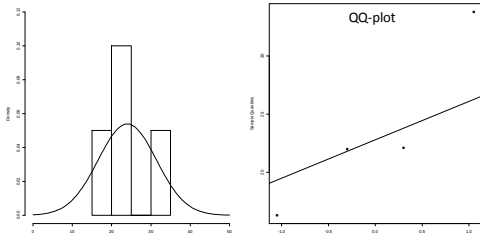


地盤パラメータの解析(CU試験)



内部摩擦角(CU試験値)

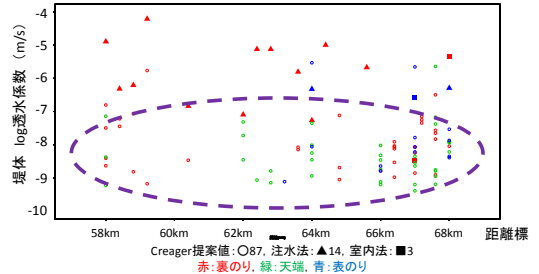
内部摩擦角(堤体 CU試験値): 正規分布への当てはまり



	データ数	平均値	標準偏差	変動係数
φ : 内部摩擦角 (°)	4	24	7.4	0.31

透水係数

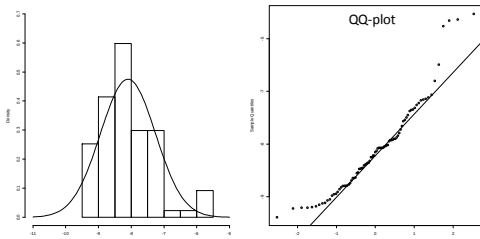
透水係数(堤体): 距離標(河川縦断方向)への分布



上図より、実験値とCreager提案値では、明らかに差がある。
ここでは、Creager提案値を地盤パラメータとして採用した。

透水係数

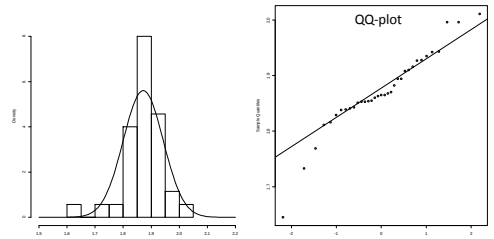
log透水係数 Creager提案値(堤体): 正規分布への当てはまり



	データ数	平均値	標準偏差	変動係数
k	87	1.25E-07	4.93E-07	3.95
log k		-8.10	0.84	-0.10

湿潤密度

湿潤密度(堤体): 正規分布への当てはまり



	データ数	平均値	標準偏差	変動係数
γ : 湿潤密度 (g/cm³)	35	1.87	0.07	0.04

ばらつきはほとんどなく、決定変数として扱う。

土質定数 まとめ

堤体

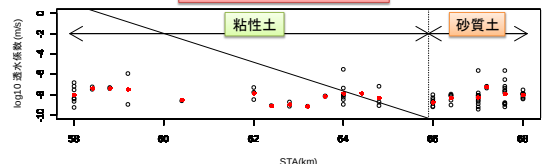
		データ数	平均値	標準偏差	変動係数	分布
C: 粘着力 (kN/m²)	UU試験値 φ=0	17	64	19.9	0.31	正規分布
	UU試験値 φ≠0	14	45	25.4	0.57	
	CU試験値	4	31	9.0	0.28	
φ: 内部摩擦角 (°)	UU試験値 φ=0	14	12	5.9	0.50	正規分布
	CU試験値	4	24	7.4	0.31	
	k: 実験値					
k: Creager提案値	透水係数 (m/s)	17	6.51E-06	1.48E-05	2.27	正規分布
	log透水係数 (m/s)		-6.03	1.06	-0.18	
	log透水係数 (m/s)	87	1.25E-07	4.93E-07	3.95	
γ: 湿潤密度 (g/cm³)	log透水係数 (m/s)		-8.10	0.84	-0.10	決定変数
		35	1.87	0.07	0.04	

基礎

		データ数	平均値	標準偏差	変動係数	分布
C: 粘着力 (kN/m²)	UU試験値 φ=0	23	51	20.5	0.40	正規分布
	UU試験値 φ≠0	8	32	6.4	0.20	
	CU試験値	10	56	40.4	0.72	
φ: 内部摩擦角 (°)	UU試験値 φ=0	8	6	3.4	0.57	正規分布
	CU試験値	10	37	12.9	0.35	
	k: 実験値					
k: Creager提案値	透水係数 (m/s)	24	4.25E-05	6.23E-05	1.46	正規分布
	log透水係数 (m/s)		-4.83	0.80	-0.17	
	log透水係数 (m/s)	225	6.67E-04	5.90E-03	8.85	
γ: 湿潤密度 (g/cm³)	log透水係数 (m/s)		-5.43	2.05	-0.38	決定変数
		41	1.78	0.13	0.07	

地盤パラメータの解析(透水係数)

堤体 透水係数



STA58~STA65.6

堤体(粘性土)	データ数	平均値	標準偏差	変動係数
k (m/s)	33	1.64E-07	5.86E-07	3.58
log k		-8.04	0.95	0.12

粘性土の透水係数のモデル化

STA66~STA68

堤体(砂質土)	データ数	平均値	標準偏差	変動係数
k (m/s)	54	1.01E-07	4.31E-07	4.26
log k		-8.13	0.78	0.1

砂質土の透水係数のモデル化

不確実性解析(設計モデル化誤差)

設計計算では、多くの単純化や理想化が行われる。この結果、計算結果と真値の間には乖離が存在する。これを設計モデル化誤差とする。

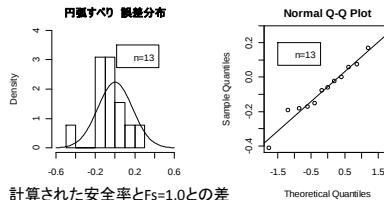
$$G_c = G + e$$

ここに、 G_c は真の安全率、 G は計算値の安全率、 e はモデル化誤差である。

23地点の被災事例と被災時の再現計算結果※より、設計計算の安全率と真の安全率(被災時における安全率=1.0)の誤差(モデル化誤差)について検討した。

※国総研資料「堤防の浸透破壊に対する安全性評価の精度向上に関する調査」(菊森, 2008)

安全率の誤差(円弧すべり)



計算された安全率と $F_s=1.0$ との差

	データ数	平均値	標準偏差
円弧すべり	13	-0.052	0.178

設計モデル化誤差 e を、**不確実性要因**として扱う

平均値0、標準偏差0.178
の正規分布へモデル化

浸透破壊について、同様にモデル化

	データ数	平均値	標準偏差	分布
局所動水勾配	12	0	0.247	正規分布
漏ぶくれ	6	0	0.303	正規分布

地盤解析と応答曲面の作成

〈応答曲面〉

地盤解析により導いた構造物の応答と基本変数(地盤パラメータなど)の近似的な関数関係

例：地盤解析で地盤パラメータを入力し、円弧すべり安全率 F_s を計算

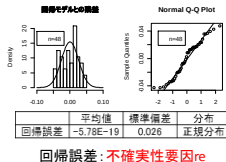
説明変数		被説明変数
入力値		応答値
C0	C1	F_s
1	0.12	0.968
0.5	0.2	0.893
0.5	0.33	1.273
0.25	0.25	0.878
1	0.2	1.226
0.5	0.2	0.891
0.5	0.25	1.056
1	0.2	1.221
0.5	0.2	0.896

回帰分析

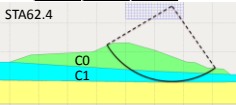
$$F_s = 0.036 + 0.65 \cdot C0 + 1.46 \cdot C1$$

基本変数：堤体粘着力 $C0$ 、基礎粘着力 $C1$

回帰分析では、説明変数となる地盤パラメータを平均値で除した値で回帰分析を行う。



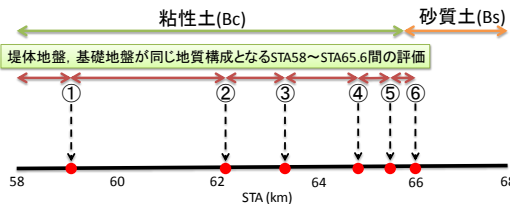
回帰誤差：不確実性要因 e



代表断面から堤防全体へ

代表断面の地盤解析

堤防全体を評価するため、法線方向への断面を評価できる応答曲面を作成する。



応答曲面(すべり破壊)

すべり位置	応答曲面	R^2
堤体	$F_s = 3.60 + 3.75 \cdot C0 - 0.87 \cdot H + 0.050 \cdot H^2$	0.951
基礎	$F_s = 2.35 + 0.0066 \cdot C0 \cdot L + 0.20 \cdot C1 \cdot D - 0.055 \cdot H - 0.11 \cdot D - 0.013 \cdot L$	0.850

$C0$: 堤体地盤の粘着力、 $C1$: 基礎地盤の粘着力、 H : 堤体高さ、 L : 堤体幅、 D : 基礎地盤 A_c 層深さ

地盤パラメータだけでなく、形状を表す H と L 、 A_c 層深さ D を基本変数に加える

粘着力 $C0$ 、 $C1$ の回帰係数が正であるため、粘着力の上昇は安全率を上昇
堤防形状を表す H 、 L は、回帰係数が負であるため安全率を減少

粘着力の項が円弧すべりに対する抵抗力
 H 、 L と A_c 層深さ D の項が外力

円弧すべりに対する安全率 F_s を表現

応答曲面(浸透破壊)

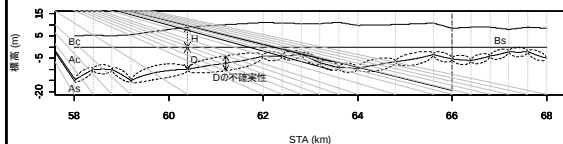
堤体地盤、基礎地盤が同じ地質構成となるSTA58~STA65.6間の評価

浸透破壊	応答曲面	R^2
水平方向	$i_h = 0.33 + 0.28 \cdot k0 \cdot H + 0.093 \cdot k1 / k0 + 0.30 \cdot H - 0.013 \cdot L + 0.25 \cdot \tan \theta$	0.760
鉛直方向	$i_v = 1.00 + 0.23 \cdot k0 \cdot H + 0.26 \cdot k1 / k0 + 0.57 \cdot H - 0.060 \cdot L - 0.68 \cdot \tan \theta$	0.654

$k0$: 堤体地盤の透水係数、 $k1$: 基礎地盤の透水係数
 H : 堤体高さ、 L : 堤体幅、 θ : 裏法尻角度、 D : 基礎地盤 A_c 層深さ

法線方向への、堤防の形状と A_c 層深さについて検討する

堤防の形状と基礎Ac層深さ



堤体高さ: H (m), 堤体幅: L (m), 裏法尻角度: θ (°)
堤防の形状を表す H , L , θ は、堤防測量により測られており対象区間内で確定値

基礎地盤Ac層深さ: D (m)
Ac層深さ D は、調査地点では把握することができる

地質構成に不確実性があると考え、Ac層深さ D の自己相関距離を算出し、krigingにより、任意の位置での平均値と標準偏差を与えた正規分布へとモデル化

堤防の安定性評価と不確実性要因

堤体	$F_s = 3.60 + 3.75 \cdot C_0 - 0.87 \cdot H + 0.050 \cdot H^2 + re + e$
基礎	$F_s = 2.35 + 0.0066 \cdot C_0 \cdot L + 0.20 \cdot C_1 \cdot D - 0.055 \cdot H - 0.11 \cdot D - 0.013 \cdot L + re + e$

作成した応答曲面に回帰誤差 re と設計モデル化誤差 e を加えて評価する

基本変数をMCSにより表で示すモデル化した確率分布で、10万組生成し、信頼性指標 β を算出

基本変数	記号	平均値	標準偏差	分布
回帰誤差	re	0	0.055	正規分布
設計モデル化誤差	e	0	0.178	正規分布
粘着力	C_0	1.0	0.31	正規分布
Ac層	C_1	1.0	0.40	正規分布
Bc層	k_0	1.0	0.12	対数正規分布
透水係数	k_1	1.0	0.15	対数正規分布

対象区間における信頼性指標 β の分布と、各不確実性要因が構造物の信頼性にどれだけ寄与するか検討する

不確実性要因の過大評価

延長8kmの堤防について

	UU試験	データ数
堤体	C	17(+14)
基礎	C	23(+8)

これに基づいて堤体と基礎の地盤パラメータを設定

延長2kmの堤防について

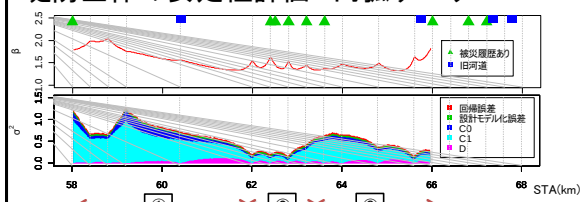
	CU試験	データ数
堤体	C, ϕ	4
基礎	C, ϕ	10

- 局所平均をとることによる地盤パラメータの
- ① 空間的ばらつきの低減を仮定できない
 - ② 統計的推定誤差を定量的に取り扱えるほどのデータ量がない

空間的ばらつきと統計的推定誤差について最も安全側(ばらつきの大きくなる)の仮定をする

- ① 局所平均をとることによる地盤パラメータのばらつきの低減を考えない
- ② 当該断面の C の平均値の推定分散は、得られているデータの分散に等しい

堤防全体の安定性評価 円弧すべり



① STA58～STA62

堤体: 低い
基礎Ac層: 深い

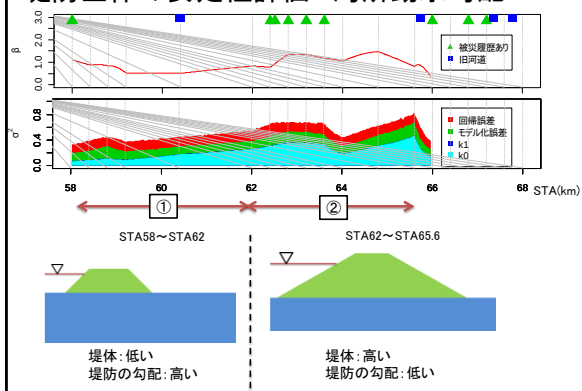
② STA62～STA63.5

堤体: 高い
基礎Ac層: 浅い

③ STA63.5～STA66

堤体: 高い
基礎Ac層: 少し深い

堤防全体の安定性評価 局所動水勾配



STA58～STA62

堤体: 低い
堤防の勾配: 高い

STA62～STA65.6

堤体: 高い
堤防の勾配: 低い

まとめ

不確実性要因の定量化、地盤パラメータを基本変数とする応答曲面の作成とそれを踏まえた堤防の信頼性評価を行う、一連の方法を提示した。

地盤に関する情報が極めて少ないため、地盤パラメータの確率分布をそのまま地盤パラメータのばらつきにするという、極めて不自然な仮定を置かざるを得なかった。この結果、地盤パラメータの不確実性を過大評価している可能性がある。

モデル化誤差については、過去の被災事例から、不確実性の定量化を行った。限界動水勾配、盤ぐれ照査では、設計モデル化誤差および応答曲面の回帰誤差が非常に大きい。

現時点の著者らの感想

- 信頼性設計は不確実性、すなわちバラツキを扱う。これは平均はだいたい推定できるとしてその信頼性を問題にすることである。現在の堤防の設計法が、地盤工学としてこのレベルに達しているか疑問に感じる。
- 土質試験と設計法の間に乖離がある。UU試験で ϕ が出るなど、解釈できない問題がある。
- 地盤調査が余りに少ない。また、下手に人口構造物であるため、自然地盤であれば仮定できる確率場の定常性などの仮定に問題がある。
- かつて宇野・杉井が試みたような純粋な統計的手法も適用の余地がある。
- 応答局面を用いる方法は、地盤工学の問題と、各要因の不確実性解析をある程度分離できるので、堤防の設計に適していると思われる。