## 4. 評価精度向上のための検討

堤体材料及び基礎地盤の土質定数には、自然材料である土質の不均一性に由来するばらつきが存在 する。また、基礎地盤の土の強度定数には堤体及び土層の自重の締め固め作用による水平・鉛直方向 の変化が存在する。しかしながら、実際の円弧すべり安定解析ではこれらのばらつきや強度分布の変 化は考慮されていない。そこで、これらのばらつきを考慮した円弧すべり安定解析による安全率の信 頼性を検討した。

## 4. 1 土質定数のばらつきを考慮した安全率の算出

強度に関する土質定数(C:粘着力、φ:内部摩擦角)の不均一性が円弧すべり安定解析の安全率 に与える影響をモンテカルロ法により検討した。モンテカルロ法とは、複数の説明変数に確率分布を 有する乱数を与えて、繰り返し計算することにより計算結果の確率分布を得る手法であるが、ここで は C 及びφの生起確率の分布を仮定し、その確率分布に従って C 及びφの値を乱数として与え繰り 返し安全率を算出し、安全率の頻度分布(確率分布)を得ることとする(図-4.1)。



#### 図 4.1 モノナガルロ法の械

## 4. 1. 1 土質定数(C, φ)のばらつき設定

C 及びφを乱数として与えるための確率分布の分布型は表-4.1 に示したように設定した。既往の 研究によると、粘着力については、対数正規分布または正規分布、内部摩擦角は正規分布が多く用い られているが(表-4.4)、ここでは粘着力については対数正規分布、内部摩擦角については正規分布 を用いることとした。

Phoon and Kulhawy (1999)の研究はこの方法論に基づいており、使用した試験値の数は類似の既往の研究の中では群を抜いて多いため、現時点ではもっとも一般性をもった値を示していると考えられる。内部摩擦角については、土質材料の性質及び密度が均一に近づくと、変動係数は小さい値をとり、また土質材料の性質や密度に不確実性があると考えられる場合には、変動係数は高い値をとる。これらの点を考慮して、ばらつきの程度を示す変動係数については、Phoon and Kulhawy (1999)の示した値を参考に、表-4.2のように設定した。

	平均值	分布型
C(粘着力)	土質試験値	対数正規分布
	土質試験値	正規分布

表-4.1 土質定数(C, φ)の頻度分布の分布型の設定

部位	土質	C(粘着力)	φ (内部摩擦角)
+E /+-	砂質土	30%	10%
堤仲	粘性土	30%	10%
甘花林中市市	砂質土	10%	5%
基礎地盤	粘性土	10%	5%

表-4.2 土質定数(C. *d*)の変動係数の設定

### 4. 1. 2 土質定数のばらつきを考慮した確率論的安全率の算出

土質定数のばらつきを考慮した考慮した確率論的安全率の算出は、表-4.3 に挙げる5箇所とした。 図-4.2 に庄内川(左岸25.0k+155m)についてモンテカルロ法における計算試行を行った結果を示す。 試行回数が増えると安全率が1.0を超える確率は0.875 に収束し、試行回数が5,000 回を超えたとこ ろで収束する値との差が5%以内に収まるので、ここでの検討では、モンテカルロ法の試行回数を5,000 回とした。なお、安全率はすべてピーク水位時の裏法面のすべりに対する安全率としている。

效正	土	質	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
固川	基盤	堤体	唯止論的女主举	
庄内川 (左岸 25.0k+155m)	礫質土	砂質土	0.881	
荒川 (左岸 11.3k)	砂質土	砂質土	1.081	
斐伊川 (右岸 11.4~11.6k)	砂質土	砂質土	1.175	
米代川 (左岸 5.0k)	砂質土	砂質土	1.216	
荒川 (左岸 13.7k)	砂質土	粘性土	1.652	

表-4.3 対象事例



図-4.2 試行回数と確率論的安全率の収束状況

## 4. 1. 3 すべり破壊の信頼性に関する評価

表-4.3 に挙げた5事例について、モンテカルロ法により安全率の確率分布を求め、安全率が 1.0 を超える確率(信頼性: すべり破壊が起こらない確率)を算出した結果を図-4.3 に示す。確定論的 安全率(試験値の土質定数を用いて計算した安全率)が 0.8 から 1.2 の間においてすべり破壊に対す る信頼性は急激に上昇し1.2 を上回ると 90%以上になることがわかる。この結果、土質定数(C, φ) のばらつきを考慮しても計算上は安全率が 1.2 以上であればほぼすべり破壊に対する信頼性を確保し ていると言うことができる。



研究機関または研究者	粘着力C(Nk/m <sup>2</sup> )		内部摩擦角 φ (° )		十两	封驗法	国夕	備 老		
	平均值	変動係数	分布型	平均值	変動係数	分布型	上貝	武映伝	国泊	加行
Baars(2006)	26(20)		正規				固い粘土	U	オランダ	例題用モデル
Gelder and Vrijling(2004)	10	20	正規				粘土		オランダ	例題用モデル
Phoon and Khlhawy(1999)	100	6-56		20	20	正規	細粒土	UC		試験値の整理
Phoon and Khlhawy(1999)	276	11-49					粘土・シルト	UU		試験値の整理
Phoon and Khlhawy(1999)	405	18-42					粘土	CICU		試験値の整理
Phoon and Khlhawy(1999)	112	6-80					粘土	記録なし		試験値の整理
Phoon and Khlhawy(1999)				15.3	10-50		粘土・シルト			試験値の整理
Phoon and Khlhawy(1999)				33.3	4-12		粘土・シルト			試験値の整理
USACE(1999)	$800 lb/ft^2$	40					基礎地盤·粘土	U	米国	例題用モデル
USACE(1999)	$800 \text{lb/ft}^2$	30					基礎地盤·粘土	U	米国	例題用モデル
USACE(1999)	$500 \text{lb/ft}^2$	10					基礎地盤上部·粘土	U	米国	例題用モデル
Wolff(1997)	$800 \text{lb/ft}^2$	40					基礎地盤上部·粘土	U	米国	例題用モデル
Lacasse and Nadim(1996), cited by USACE(2006)			対数正規				粘土	U		既往研究まとめ
Lacasse and Nadim(1996), cited by USACE(2006)			正規				粘土質シルト	U		既往研究まとめ
Shannon and Wilson, Inc., and Wolff(1994), cited by USACE(1999)		30-40					粘土	U	米国	既往研究まとめ
Wolff(1985), cited by USACE(1999)					7.5-10.1		粘土	D	米国	既往研究まとめ
Wolff(1985), cited by USACE(1999)		11-45					粘土	U	米国	既往研究まとめ
Fredlund and Dahlman(1972), cited by Harr(1987), cited by USACE(1999)		40					粘土	U		既往研究まとめ
Gekder and Vrijing(2004)				35	10	正規	砂		オランダ	例題用モデル
Phoon and Khlhawy(1999)				37.6	5-11		砂			試験値の整理
USACE(1999)				30	6.7		堤体·砂	U	米国	試験値の整理整理
USACE(1999)				30	5.9		基礎地盤·砂	U	米国	例題用モデル
USACE(1999)				34	5.9		基礎地盤·砂	U	米国	例題用モデル
Wolff(1997)				30	6.7		堤体·砂		米国	例題用モデル
Wolff(1997)				34	5.9		基礎地盤·砂		米国	例題用モデル
Lacasse and nadim(1996), cited by USACE(2006)						正規	砂			既往研究まとめ
Wolff(1994), cited by USACE					3.7-9.3		砂	D	米国	既往研究まとめ
Schultze(1972), cited by Harr(1987), cited by USACE(1999)					12		砂	D		既往研究まとめ
Fenton and Griffiths(2004)			対数正規				一般			分布型に関する検討
Babu and Murthy(2003)		10-40	正規		7-26	正規	一般		インド	既往研究まとめ

表-4.4 土質定数(C, φ)の頻度分布に関する既往研究

網掛けされたものは本検討で用いたもの ※U:排水試験 UC:圧縮試験 UU:非圧密非排水三軸試験 CICU:非圧密等方非排水三軸試験

## 4. 1. 4 モンテカルロ法の試行結果(個票)

次ページ以降にモンテカルロ法により試行計算を行った事例の個票を示す。被災時に実際に作用した外力を与え浸透流計算を行った後、モンテカルロ法により土質定数(C, φ)を確率分布で与えて繰り返し計算された結果得られた安全率の確率分布(頻度分布)のヒストグラムと円弧すべりのすべり面を「解析結果」の覧に示している。



## 試行結果個票-1(庄内川左岸 25.0k+155m)

- 42 -



# 試行結果個票-2(荒川左岸11.3k)



試行結果個票-3(斐伊川右岸 11.4~11.6k)



## 試行結果個票-4(米代川左岸5.0k)



# 試行結果個票-5(荒川左岸13.7k)

### 4.2 鉛直及び水平方向の強度分布を考慮した安全率の試算

堤体及び基礎地盤には土層の自重の締固め作用等による強度分布の変化が存在するが、実際の解析 においては強度分布の変化は考慮していない。そこで、ここでは土質材料の鉛直及び水平方向の強度 分布の円弧すべり安定解析の安全率に及ぼす影響を把握するため、締固め作用による土質材料の強度 分布を仮定して安全率を算出した。

### 4.2.1 強度分布の設定

土層の自重の締固め作用による強度定数の設定手法の一つに IPET Strength モデル<sup>7)</sup>がある。ここでは、IPET Strength モデルに基づき基礎地盤について当該地点の有効土被り圧の 0.24 倍に相当する土被り深さ 1ft 当たり 11psf (1m 当たり 1.37kN/m<sup>2</sup>)増加するという設定にしている。また、水平方向についても実際の試験値に基づき、天端直下と法尻直下において、強度定数を設定している。本検討では、対象被災事例として堤体及び基礎地盤とも粘性土で構成される荒川左岸 70.4k とした。本検討では、鉛直方向については IPET Strength モデルに基づき表-4.5 のように設定した。鉛直方向については、おおよそ有効土被り圧の 0.2 倍であり、水平方向の分布については、試験値がないので、天端直下及び法尻直下の粘着力Cの値を1~17kN/m<sup>2</sup>の3ケース及び一様分布と仮定したケース0とし、強度分布の違いの影響を確認することとした。なお、天端直下から法尻直下にかけての強度の水平方向の分布は直線的に変化することとした。内部摩擦角度については、0のまま変化しないものとした。

ケース	<b>纵古七白八左</b>	水平方向	<b>进</b>	
	新国力问力 <sup>中</sup>	天端直下	法尻直下	加大
0	一様分布(27.0kN/m²)	$27.0 \mathrm{kN/m^2}$	$27.0 \mathrm{kN/m^2}$	一様分布
1	土被り 1m 当たり 1.37kN/m <sup>2</sup> 増加	$17.0 \mathrm{kN/m^2}$	$17.0 \text{kN/m}^2$	鉛直分布のみ
2	土被り 1m 当たり 1.37kN/m <sup>2</sup> 増加	$17.0 \mathrm{kN/m^2}$	10. $0$ kN/m <sup>2</sup>	
3	土被り 1m 当たり 1.37kN/m <sup>2</sup> 増加	$17.0 \mathrm{kN/m^2}$	$1.0 \mathrm{kN/m^2}$	

表-4.5 基礎地盤の強度(C:粘着力)分布の設定



図-4.4 強度分布の設定(ケース3)

#### 4.2.2 安全率の算出結果

図-4.5 に安全率の試算結果を示す。ケース0は強度分布を仮定しない事例であり、ケース1は鉛 直方向のみ強度分布を考慮したもので、ケース2、3は水平方向の強度分布も考慮したものである。 強度分布を考慮すると一様分布に比べて強度の強い部分もあるが低い部分も出てくるので、そこが弱 点となる。その結果、強度分布を考慮したケース1~3は強度分布を考慮しなかったケース0よりも 安全率が低くなったものと思われる。強度分布の設定が土被りが浅くなり法尻に向かうほど強度が弱 くなる設定であるため、ちょうどすべり面に近い部分に弱点ができることになり、安全率を低下させ る影響が現れやすくなっているものと考えられる。



図-4.5 強度分布を考慮した安全率試算結果

破壊形態については、一様分布のものに比べて、強度分布を考慮したものの方がすべり面が浅くなっている(図-4.6、4.7)。これは、上述のとおり土被りが浅い部分の土層の強度が弱くなったため すべり面が浅くなったものと考えられる。



### 4. 2. 3 安全率試算例

表-4.7 にケース0から3までの円弧すべり安定計算結果を示す。表の左側の列に土層の強度分布 の設定や土質強度定数の設定について記載している。強度分布を考慮したケース1~3について、強 度分布設定図の土層の境界面に記載されている数字は、その場所における土質材料の強度(粘着力) であり、数字の各記載箇所の強度分布は直線分布としている。



表-4.7 強度分布を考慮した堤防の円弧すべり安定計算の結果



表-4.7 強度分布を考慮した堤防の円弧すべり安定計算の結果(続き)