

## 切盛土の安定に関する信頼度分析

## RELIABILITY ANALYSIS FOR FAILURE OF EMBANKMENT AND CUTTING SLOPE

松尾 稔\*・黒田 勝彦\*\*  
*By Minoru Matsuo and Katsuhiko Kuroda*

## 1. はじめに

地盤や土構造物の設計信頼度を合理的に決定したいという要求は、近年、特に強くなっている。Freudenthalによって提案された基本的な考え方<sup>1),2)</sup>があるとはいえる、上記の要求に答えるべき適切な方法論はまだ具体化されていない。筆者らは盛土の急速せん断破壊を例に取り上げ、純力学的に設計係数（従来の安全率と類似の概念）と破壊確率の関係を求めた<sup>3),4)</sup>。さらに、盛土建設に際する期待費用と破壊確率の関係を明らかにし、設計信頼度決定のための1つのモデルを提案した<sup>5)</sup>。そして多くの試算例や実施例によって検討を加え、経済的評価モデルの妥当性を確かめた。これらの研究において示したように、土構造物の信頼度分析は、設計信頼度を決める上にも、また土質調査の規模決定を行なう上にもきわめて有効である。

本論文では、同様の観点から、傾斜した地山の途中に切盛土を行ない道路を建設する場合の力学的な信頼度分析と、設計信頼度決定のための経済的評価モデルを提案している。2. では切盛土の信頼度分析のために必要な基礎的事項について述べる。3., 4. では破壊確率と費用との関連を述べ、経済的評価モデルを提案する。5. では種々の数値計算を行ない、切盛土の妥当な設計係数について考察を加える。

## 2. 信頼度分析のための基礎的項目

### (1) 信頼度分析のための基本的仮定

切盛土の信頼度分析に当たり、以下の仮定を設ける。

(i) 斜面の破壊は円弧すべりによる試行法で検討で

きるものとし、破壊面そのものの生起確率やクリープ破壊などは一応除外する。

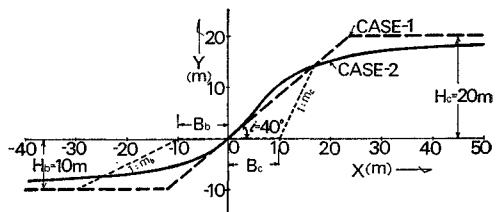
(ii) 地山および盛土は、その強度  $\tau$  が

で表わせる土質(以下、 $c \sim \phi$  系土質と略称する)からなるものとし、すでに示した結果<sup>6)</sup>に基づき、 $c$ ,  $\tan \phi$  は互いに独立で、かつ正規分布にしたがう確率変数とする。さらに、地山と盛土の湿潤単位体積重量  $r_t$ ,  $r_b$  はともに正規分布、また  $\tan \phi$  は  $r_t$  に対して正の線形相関があるものとする。

(iii) 地山の形状は、一般に図-1の実線で示すように、そのスロープが連続的に変化した有限高さのものとする。形状の関数表示としては、取扱いに便利な次のような初等関数を選定した。

$$y = \frac{H_b + H_c}{\pi} \tan^{-1} \left\{ \frac{\pi \tan i}{H_b + H_c} \frac{1}{\cos^2 \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{H_b - H_c}{H_b + H_c} \right)} x \right. \\ \left. + \tan \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{H_b - H_c}{H_b + H_c} \right) \right\} + \frac{1}{2} (H_c - H_b) \dots (2)$$

上式の記号はすべて図-1に示してある。このような連続関数で表わすことの利点は、地山形状の実状に近いことに加えて、解析結果が連続的に変化するから、種々の性質の定性的な傾向を推定する上で都合がよい。式(2)の関数は、道路の施工基面を  $x$  座標に、施工基面と斜面の交点を座標原点にしたもので、原点における斜面勾配を  $\tan i$  で表わしている。ところで従来の種々の解析においては、簡単のため、斜面を直線で近似し、図中の折



### 図-1 地山の形状

\* 正会員 工博 名古屋大学助教授 工学部付属土圧研究施設

\*\* 正会員 工修 京都大学助手 工学部交通土木工学教室

線（破線）で示されるような不連続な斜面として取扱われる場合が多い。そこで、本研究でも、このように仮定した地山（以下、case-1と略称）と連続関数式（2）で仮定した地山（以下、case-2と略称）とを対比させながら、両者の解析結果の差異、解析上の難易なども合せて検討する。

(iv)  $c \sim \phi$  系斜面の安定解析には、厳密には応力分布と間げき水圧分布に関する検討が必要である。これは、実際問題として、いかなる段階での信頼度（破壊確率）を設計信頼度として取扱えばよいかという重要な問題とも関連する。施工中や施工直後、あるいは道路として開通した後などの各時点において、地山および盛土の強度や荷重の状態は多少変化するから、どの時点での信頼度、あるいは費用関数を問題にするかを検討しなければならない。これは非常にむずかしい問題であるが、結論的には、切土や盛土によって破壊が起こるとすれば、それは開通以前、すなわち施工中あるいは施工後開通までに生ずる、として考えることにする。理由は次のとおりである。(a) きわめて複雑な切盛土の信頼度分析に関する基本的な方法論を確立することが、まず第一歩として重要である。(b) 盛土の下部に軟弱層がある場合には、その破壊が1つの問題になるが、一般に圧密の進行によって地盤強度は時間とともに増大するから、いったん盛土が立上ったのちに壊れることは理屈上考えられないし、破壊した例も筆者らの調査においてはない。また排水を十分に考慮していねいに施工された盛土が、開通後その内部で破壊した例がない<sup>5)</sup>。(c) 問題は降雨の影響の大きい切土部分である。切土部では降雨の影響で風化が進み、開通後重大な崩壊を生じている例がある。しかし、この問題を定量的に取扱うとすれば、土の物性、すなわち、破壊確率や期待費用を時間の関数として取扱わねばならない。このことはきわめて困難な課題である。そこで、本研究においては、排水や斜面保護などに関する十分なる対策を講じることはもちろんとして、開通後の降雨や風化による破壊に対しては、適切な行政的措置を実施することを立て前に、信頼度分析の方法論を確立するため、一応、施工直後の問題にしぼって考察を加える。すなわち、基本的姿勢として道路開通後、路面や周辺人家、田畠に影響を与える破壊はないことを立て前に考えていくことにする。

## (2) 切盛土の設計係数と破壊確率の関係

一般に  $c \sim \phi$  系土質からなる斜面に関し、設計係数  $\bar{F}_s^*$  は式(3)で、 $\bar{F}_s^*$  と破壊確率  $P_F$  の関係は式(4)で与えられることはすでに示した<sup>6)</sup>。

$$\bar{F}_s^* = \frac{p_1^*}{q^*} \cdot \frac{\mu_c}{\mu_r} + \frac{p_2^*}{q^*} (a \mu_r + b) \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} P_F &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^K \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \\ K &= \frac{1.0 - \bar{F}_s^*}{\sqrt{\left(\frac{p_1^*}{q^*} \cdot \frac{\mu_c}{\mu_r}\right)^2 \left(\frac{V_c^2 + V_r^2}{1 + V_r^2}\right) + \left(\frac{p_2^*}{q^*} a \sigma_r\right)^2}} \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここに、上式における  $p_1^*, p_2^*, q^*$  は斜面の形状により幾何学的に決まる定数、 $\mu_c, \mu_r$  はそれぞれ  $c, r$  の平均値、 $V_c, V_r$  は  $c, r$  の変動係数、 $a, b$  は前節(ii)で述べたように、 $\tan \phi$  と  $r$  が正の直線相関があるとしたときの回帰係数である。ただし、 $P_F$  を応力比で定義した場合、すなわち、

$$P_F = P_{rob}[\bar{F}_s^* \leq 1.0] \quad \dots \dots \dots (5)$$

と抵抗モーメント  $M_R^*$  と転倒モーメント  $M_0^*$  の大小を比較した場合、すなわち、

$$P_F = P_{rob}[M_0^* \geq M_R^*] \quad \dots \dots \dots (6)$$

とで、その定義の相違による結果の差はほとんどないことがわかっているので<sup>9)</sup>、本論文では、式(5)にしたがって議論を進める。

さて、式(4)からわかるように、 $c \sim \phi$  系土質の斜面では、 $P_F$  中に幾何学的な条件によって決まる関数  $p_1^*, p_2^*, q^*$  が含まれている。すなわち、 $\phi=0$  系のように<sup>3)</sup>、 $P_F$  を  $\bar{F}_s^*$  に対して幾何学的条件に関係なく一義的に定めることができない。このことは重要であり、信頼度分析を行なう上で注意しなければならない。いいかえると、図-1のような地山の形状が固定されている場合であっても、道路幅員や切土、盛土部分の斜面勾配の変化などによって  $P_F$  は変化する。したがって、切盛土の信頼度を考える場合、道路幅員、施工基面の位置、切盛土部分の斜面勾配、地山の形状などを、一般には、結果に影響を与える要因として取扱う必要がある。しかし、多くの場合、施工基面の位置は上位計画において与件として与えられるので、本論文ではこれを変化させたときの影響は取り上げない。

## 3. 切土斜面の信頼度分析

斜面の安定解析を基礎にして、力学的な問題と経済的な費用とを結びつけようとする信頼度分析においては、力学的な条件、たとえば、切土斜面の勾配と破壊確率、予想される崩壊土量などとの関係を明らかにしていく必要がある。この章では、これらの関係を一つ一つ明らかにしたのち、経済的な評価モデルを求めていく。

### (1) 安定解析に用いた仮定と数値

一般的な基本的仮定については2.(1)に示したが、本節では切土斜面の安定解析に際する仮定と計算例に用いた数値について以下に示す。

表—1 土質，幾何学条件

		盛 土 部	切 土 部
土質 条件	$c$ ( $t/m^2$ )	1.2, 0.6	1.2
	$\phi$ ( $^\circ$ )	32, 30	32
	$r$ ( $t/m^3$ )	1.7, 1.6	1.7
	$c, r$ は 任 意	$\phi=0$	$\phi=0$
幾何学 条件	地 山 勾 配 ( $^\circ$ )	40 $H_b=10\text{ m}$	40 $H_c=20\text{ m}$
	道 路 幅 员 (m)	5, 6, 7, 8, 9 10, 11, 12, 13, 14	5, 6, 7, 8, 9 10, 11, 12, 13, 14
斜 面 勾 配		1.25, 1.50, 1.75 2.00, 2.25, 2.50 2.75, 3.00, 3.25 3.50	0.577, 0.839, 1.192 1.732, 2.747

(i) 図-1 に示すように、地山を一方で切取り、一方で盛土をして道路建設を行なう場合を考える。切土側の道路幅員を  $B_c$ 、地山の施工基面での傾斜角を  $i$ 、施工基面からの地山高さを  $H_c$ 、切土斜面の勾配を  $m_c$  とする。計算に用いた諸数値は一括して表-1 に示した。なお、計算に際して用いた  $m_c$  の最小値としては、普通の土質の場合の最急勾配という点に配慮して傾斜角  $60^\circ$  に対する値として 0.577 を、また、 $B_c$  の最小値としては、中央分離帯のない 4 車線道路の規模を考えて  $B_c=5\text{m}$  とした。

(ii) 自然状態における地山は十分安定であり、斜面の切取によって地山全体が安定を失い、施工基面よりも深いすべりが発生することはないものとする。このような仮定は実際の切土斜面の破壊形状の調査結果<sup>7)</sup>をみても容認できる。

(iii) 地山が  $c \sim \phi$  系の土質の場合は、本論文で示す具体的な解析例には次の数値を用いている。すなわち、 $\mu_c = 1.2(t/m^2)$ 、 $\mu_r = 1.7(t/m^3)$ 、式(3)における回帰係数  $a, b$  の値としては、 $a = 0.5(m^3/t)$ 、 $b = -0.225$  を用いる。この  $a, b$  の値は、筆者らが行なった不飽和のシルト質砂に関する一面せん断試験の結果<sup>6)</sup> から推定した平均的な値である。

## (2) 切土斜面の勾配と破壊確率

図-2は、case-1に関し、切取斜面勾配  $m_c$  と設計係数  $\bar{F}_s^*$  の関係を、 $B_c$  をパラメーターにして示したものである。実線は  $c \sim \phi$  系、破線は  $\phi=0$  系の場合である。 $\phi=0$  系では式(3)において、 $\bar{F}_s^* = (p_1 * \mu_c) / (q * \mu_r)$  となるから、幾何学的に決まる  $p_1^* / q^*$  のみを示した。図からわかるように、 $B_c / H_c < B_0 / H_c = (1 / \tan i) - m_c$  の範囲では、同一の  $m_c$  に対し、 $B_c$  が小さいほど  $\bar{F}_s^*$  は大きい。一方、 $B_c / H_c \geq B_0 / H_c$  の範囲では、 $B_c$  の値によらず  $\bar{F}_s^*$  は同一の  $m_c$  に対し一定値となる。このことは以下の点を考えれば当然の結果として説明される。すなわち、図-2に示したように、 $B_c \leq B_0$  の範囲では、斜面形状は  $B_c$  の影響を受けるとともに、 $B_c$  が

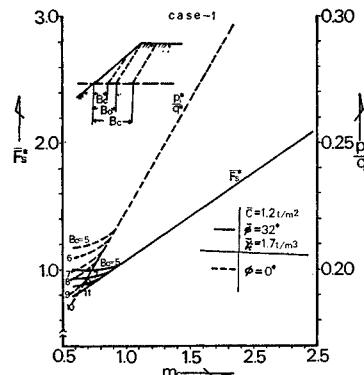


図-2  $m_s \sim \bar{F}_s^*$  関係

大きくなるにしたがって斜面として不安定な形状に近づく。さらに、 $B_c \geq B_0$  になれば、斜面そのものの形状は  $B_c$  の値にかかわらず一定の形状となる。以上のことを考えれば、 $F_{s^*}$  が  $B_c \leq B_0$  の範囲で  $B_c$  の影響を受け、 $B_c \geq B_0$  では  $B_c$  の影響を受けない理由が理解できる。

さて、多くの便宜のため、 $(m_c)_{\min} = 0.577$  に対応する  $\bar{F}_{s^*}$  を  $\bar{F}_{s_0^*}$  と記して基準値とし、これより勾配を緩かにすることによる  $\bar{F}_{s^*}$  の上昇率を求めたのが図-3, 4 である。図-3 は case-1、図-4 は case-2 の場合であり、それぞれ図中の実線は  $c \sim \phi$  系、破線は  $\phi = 0$  系を示す。これらの関係をもとに、式(4)を用いて、 $\bar{F}_{s_0^*}$  に対応する破壊確率を  $P_{F0}$ 、任意勾配  $m_c$  に関して得られる  $\bar{F}_{s^*}$  に対応する破壊確率を  $P_F$  とすると、

と  $m_c$  の関係が求められる。こうして求めた  $c \sim m_c$  関係を両対数紙上に描いた例が図-5, 6 である。図 (a) は  $c \sim \phi$  系で  $B_c$  をパラメーターにとり、また図 (b) は  $\phi=0$  系に関して各  $B_c$  に対して  $F_{so}^*$  をパラメーターに示してある。図 (a), (b) でパラメーターの数が

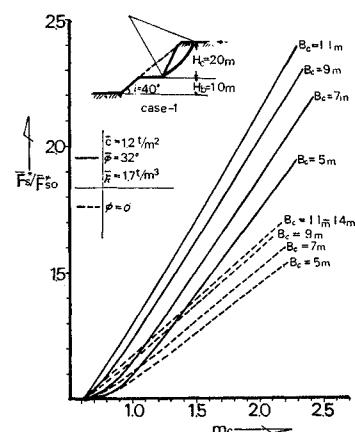


図-3  $m_c \sim \bar{F}_s^*/\bar{F}_{s_0}^*$  関係

異なる理由は以下のとおりである。すなわち、 $c \sim \phi$  系土質の場合(図(a))では、式(4)からわかるように、 $P_F$  は  $\bar{F}_s^*$  以外に幾何学的条件  $p_1^*/q^*$  の影響を受ける。したがって、 $m_c \sim \zeta_c$  関係は  $B_c$  の値によって異なる。一方、 $\phi=0$  系の場合(図(b))、 $P_F$  は  $\bar{F}_s^*$  によってのみ一義的に決定され、かつ  $\bar{F}_s^*$  は幾何学的条件  $p_1^*/q^*$  と土質条件  $\mu_c/\mu_t$  の値の組み合せで与えられる。そのため、 $B_c$  の影響と同時に、ある  $B_c$  で

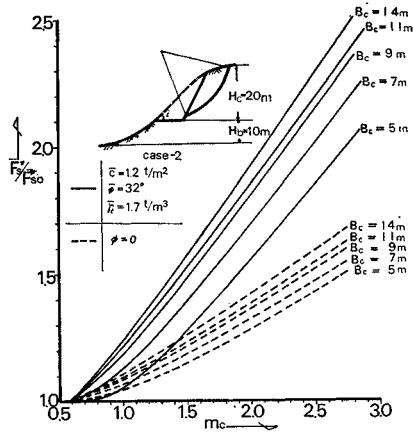
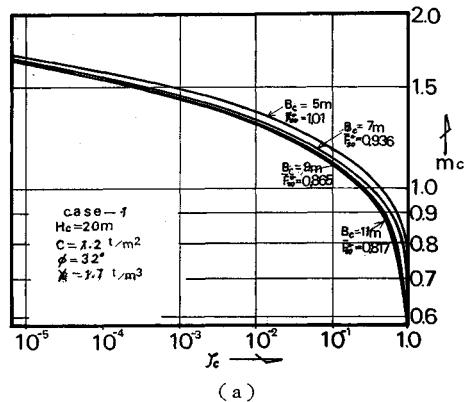


図-4  $m_c \sim \bar{F}_s^*/\bar{F}_{s0}^*$  関係



( a )

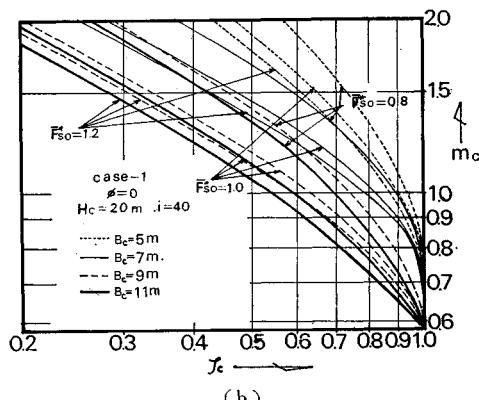
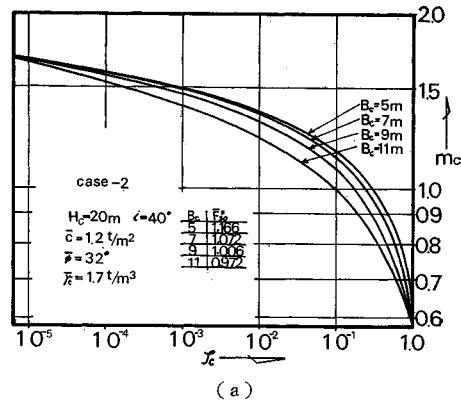


図-5  $m$ - $\zeta$  関係



(a)

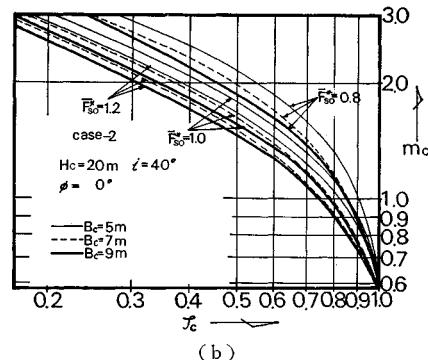


図-6  $m_c \sim \zeta$  関係

求まる  $p_i^*/q^*$  に対し  $\mu_c/\mu_r$  の値を変えることによって容易に数種類の土質条件に対する  $P_F$  が求まる。以上の点を考え、 $\phi=0$  系の場合は  $B_c$  のほかに、各  $B_c$  に対して  $F_{so}^*=0.8, 1.0, 1.2$  になるような 3 種類の土質条件で  $m_c \sim c_c$  関係を求めた。すでに示したように<sup>5)</sup>、両対数紙上でのこのような曲線関係は、次式の指數関数で精度よく近似できる。

例示した解析結果に関する係数  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$  の値は表一  
2 に示した。

### (3) 切土斜面勾配と崩壊土量の関係

すべり面を円弧と仮定する安定計算法を1つの仮定として検討する。実際の崩壊面の位置や形状に関しては議論の多いところであるが、ここでは円弧すべり面法による試行法で検討できるものと考えれば崩壊土量は以下のように求められる。ここでいう崩壊土量とは、地山をある勾配 $m_0$ で切取った場合、もしすべりが発生するとしたらそのときに期待される崩壊土量のことである。すべりが起こると、そのすべり面内の土が崩壊土であることはいうまでもないが、その後の再度のすべり防止のためや、再建のために、一般には、ある程度余分に排土する必要が生じる。経済的な見地からは、これをも考慮した

表-2  $m_c \sim \zeta$  関係係数一覧表

	$B(m)$	$\bar{F}_{s0}^*$	$A_1$	$B_1$	$C_1$
case-1	5	0.800	-1.77250	1.30816	2.45300
		1.000	-2.11400	0.71554	2.78800
		1.200	-2.72800	0.45640	3.40100
	7	0.8	-1.94000	1.07527	2.59900
		1.0	-2.74900	0.48200	3.40100
		1.2	-3.29300	0.34530	3.94100
	9	0.8	-4.23400	0.31266	4.84200
		1.0	4.30000	-0.18246	-3.69600
		1.2	2.53200	-0.26529	-1.93200
	11	0.8	-30.85300	0.02796	31.47600
		1.0	2.52300	-0.27584	-1.93200
		1.2	1.70800	-0.34927	-1.12100
$c \sim \phi$	5	1.010	-1.25300	0.15947	1.95600
		0.936	-1.34100	0.13139	2.03600
		0.865	-1.38800	0.12315	2.06900
		0.817	-1.39500	0.12230	2.06900
	7	0.800	-3.23000	0.99607	3.91830
		1.0	-3.57330	0.64187	4.25420
		1.2	-3.82130	0.44770	4.88692
		0.8	-3.56800	0.77965	4.25400
	9	1.0	-5.35100	0.37408	5.99600
		1.2	-9.45000	0.16455	10.10600
		0.8	-4.18700	0.41394	4.88700
		1.0	-9.57700	0.17109	10.10600
	11	1.2	-74.63400	0.01749	75.24300
		0.8	-6.49800	0.30138	7.16600
		1.0	-46.30500	0.02878	46.94600
		1.2	-48.01900	-0.02492	-47.39500

上で崩壊土量を見積っておく必要がある。この点を考えて以下のようにして求めた。

図-7 のように地山を  $m_c$  なる勾配で切取ったときの  $\bar{F}_{s0}^*$  を求め、これに対応するすべり円弧を描く。次に、すべり円弧が斜面内に含まれる部分の弦  $\overline{BE}$  を求め、この弦の勾配を崩壊勾配  $m'_c$  と定義する。さらに、すべり円弧に接して勾配  $m'_c$  なる接線  $\overline{CD}$  を引き、地山との交点 D を求める。そして、斜線を付した面積 ABCD を単位奥行き当たりの崩壊土量  $Q$  と考えるのである。計算は式(9)で与えられる。

$$Q = \int_{x_1}^{x_4} \left\{ \frac{1}{m_c} (x - B_c) - y_0^* + \sqrt{R^*{}^2 - (x - x_0^*)^2} \right\} dx \\ + \int_{x_1}^{x_5} \{ f(x) - y_0^* + \sqrt{R^*{}^2 - (x - x_0^*)^2} \} dx \\ + \int_{x_5}^{x_4} \left\{ f(x) - \frac{1}{m'_c} (x - x_4) - Y_4 \right\} dx \dots (9)$$

上式の積分を実施するために、 $m_c$  と  $m'_c$  の関係が明らかになっていれば便利である。そのために、多くの  $B_c$  と  $m_c$  の組合せに対し、図-7 と同様の図を描き、崩壊勾配  $m'_c$  を図上から求め、 $B_c$  をパラメーターにし

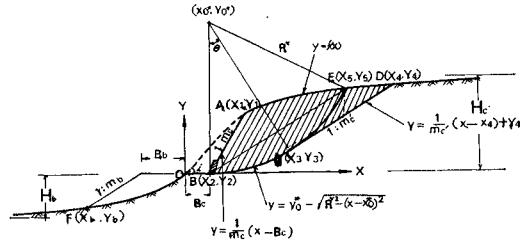
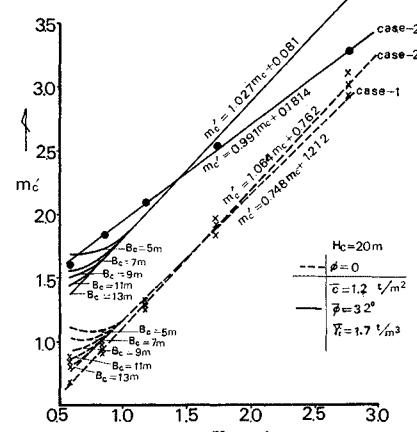
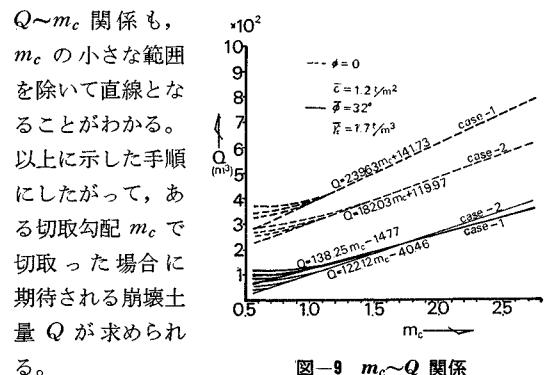


図-7 切土斜面の崩壊例

図-8  $m_c \sim m'_c$  関係

て  $m_c$  と  $m'_c$  の関係を図示した例が図-8 である。実線はいすれも  $c \sim \phi$  系、破線は  $\phi=0$  系の場合であり、他の  $B_c$  に関しても同様の関係が得られている。case-1 の  $m_c$  が小さい部分を除き、きれいな直線関係となることは重要であり、解析上好都合である。すなわち、case-1 の場合は  $B_c \geq B_0$  の範囲で  $B_c$  に無関係に、また case-2 の場合は全領域にわたって、 $m_c \sim m'_c$  は直線関係にあると考えてよい。参考のため、例示した場合の直線式を図中に示しておく。さて、図-8 のような関係を式(9)に用いること  $Q \sim m_c$  関係が求められるわけである。図-8 に対応する場合を例にあげると、図-9 のようになる。図から

図-9  $m_c \sim Q$  関係

#### (4) 切土斜面勾配と斜面長および崩壊斜面長の関係

費用との関連をつけていこうとする場合、たとえば、斜面保護費は斜面長に関係しているから、まず  $m_c$  と斜面長  $L_c$  の関係を求めておくことが基本である。 $m_c$  とそのときの斜面長  $L_c$  (図-10 参照) の関係は、土質条件にかかわらず、case-1 の場合は式 (10) で、case-2 の場合は式 (11) で与えられる (図-7 参照)。

$$\left. \begin{aligned} B_c/H_c &\leq B_0/H_c = (1/\tan i) - m_c; \\ L_c &= B_c \tan i \sqrt{m_c^2 + 1}/(1 - m_c \tan i) \\ B_c/H_c &> B_0/H_c = (1/\tan i) - m_c; \\ L_c &= H_c \sqrt{m_c^2 + 1} \\ L_c &= (X_1 - B_c) \sqrt{m_c^2 + 1}/m_c \end{aligned} \right\} \dots \quad (10)$$

$L_c \sim m_c$  関係は、case-1 の場合、式(10)からわかるように、 $m_c$  が大きい範囲では直線関係に近づく。一方、case-2 の場合、式(11)の  $X_1$  が解析的に求められず、 $L_c \sim m_c$  関係の定性的な傾向がわかりにくく。そこで、この例題の場合について電子計算機によって求めた  $L_c \sim m_c$  関係を例示すると図-10 のようになる。このことから、case-2 の場合も、 $L_c \sim m_c$  関係は  $m_c$  の大きい範囲で直線的関係にあることがわかる。

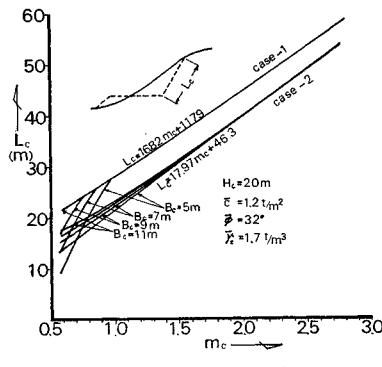


図-10  $m_c \sim L_c$  関係

ところで、崩壊斜面(図-7のBCD面)の長さ $L_c$ は、図中の記号を用いて次式のようにかける。

$$L_c' = R^* \theta + (X_4 - X_3) \sqrt{m_c'^2 + 1} / m_c' \dots \dots \dots (12)$$

$R^*$  や  $\theta$ , あるいは  $B, C, D$  点などの座標は試行的に求めなければならないから,  $L_c' \sim m_c'$  関係の定性的傾向を調べておくことは重要である。試行法で求めた円弧に対し式(12)を用いて,  $L_c' \sim m_c$  の関係を計算した例を図-11に示す。 $\phi=0, c \sim \phi$  系のいずれにおいても, case-1 の場合は先の  $Q \sim m_c$  関係の場合と同様,  $B_c$  が小さいほど  $L_c'$  は大きい傾向にあり,  $B_c$  が大きくなれば直線に近づく。図示した例では  $B_c \geq B_0$  になると完全に直線と一致する。また, case-2 に関する  $L_c' \sim m_c$  関係は, 少しばらついてはいるが, 直線で近似できることがわかる。後章の試算に用いるために直線の式を図中

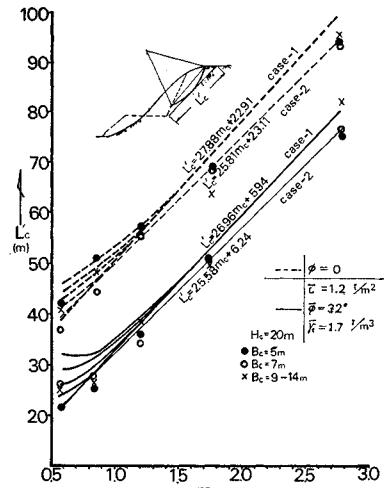


図-11  $m_c \sim L_c'$  関係

に示した。

### (5) 切土斜面勾配と買収すべき地山面積の関係

切土をしようとする場合、当初必要な用地を買収しなければならない。また、もし崩壊したら、そのための賠償費や追加の買収用地費などは 当然、崩壊の範囲と関係してくる。そこで、ここでは当初の切土実施段階と、切土斜面が崩壊した場合の両者について、 $m_c$  と買収地山面積との関係を求める。なお、慣例によれば、地山は平面図上の面積で買収される。買収すべき地山の面積を  $S_c$ 、もし崩壊したら、さらに追加して買収しなければならない面積を  $S'_c$  とすると、case-1, 2 に関して  $S_c$  は式 (13), (14) で与えられる。

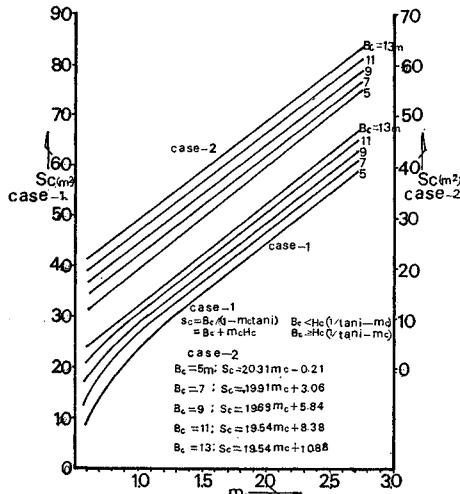
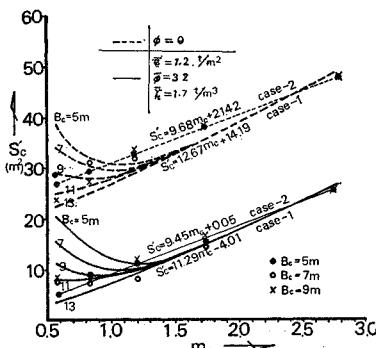
$$\left. \begin{array}{l} B_c/H_c \leq B_0/H_c = (1/\tan i) - m_c; \\ S_c = \{B_c/(1-m_c \tan i)\} + S_{c0} \\ B_c/H_c > B_0/H_c = (1/\tan i) - m_c; \\ S_c = B_c + m_c H_c + S_{c0} \end{array} \right\} \dots \dots \dots (13)$$

ここに、 $S_{c0}$  は、当初、切土斜面上端付近で少し余分に買収しておかなければならぬ用地面積で、現在のところ、 $B_c$ 、 $m_c$  とは無関係にほぼ一定面積買収する方法がとられているようであるから、ここでは定数として取扱う。図-10 の場合と同様の理由により、 $S_c \sim m_c$  の定性的な傾向をみるために、例題の場合について計算した結果を示すと 図-12 のようになる。

一方,  $S_c'$  は, case-1, 2 に関してそれぞれ, 式 (15), (16) で表わされる。

$$\left. \begin{array}{l} B_c/H_c \leq B_0/H_c = (1/\tan i) - m_c; \\ S_0' = X_4 - B_c/(1-m_c \tan i) \\ B_c/H_c > B_0/H_c = (1/\tan i) - m_c; \\ S_0' = X_4 - B_c - m_c H \end{array} \right\} \dots\dots\dots(15)$$

$$S_c = \alpha_4 B_c m_c r_{lc} \quad . \quad (16)$$

図-12  $m_c \sim S_c$  関係図-13  $m_c \sim S'_c$  関係

$S'_c \sim m_c$  関係の定性的傾向をみるために、例題の場合につき、多くの試行計算によって求めた結果を示せば図-13 のようになる。case-2 の場合、図-7 と同様の図を多数描いて図上から  $X_1$  を読み取り、式(16)より  $S'_c$  を求めたので、多少ばらついているが、全領域にわたってほぼ直線となることがわかる。また、case-1 では、 $B_c \leq B_0$  の場合に  $B_c$  の影響は非常に顕著であるが、 $B_c$  がこれ以上になると精度よく直線で近似できる。なお、後の計算のために、例示した場合についての直線式を図中に記入した。

#### (6) 破壊確率と費用との関係

2.(1) で述べたように、本論文においては、施工後道路開通前の期間を対象にして設計信頼度を考えていく。いま、切土斜面の建設に必要な単位奥行当たりの期待総費用を  $C_T^e$  とすると、 $C_T^e$  は次式で与えられる。

$$C_T^e = C_E^e + C_c^e + P_F C_F^e \dots \dots \dots (17)$$

上式の各項はいずれも  $P_F$  の関数であり、 $C_E^e$  は切取りに先立つ土質調査費、 $C_c^e$  は切土斜面の初期建設費、

$C_F^e$  はもし斜面が崩壊した場合の破壊損失費である。すでに示したように<sup>5)</sup>、 $P_F$  そのものを用いるよりも、式(7)で定義した  $P_F$  の上昇率  $\zeta$  を用いるほうが便利である。そこで、式(17)を  $\zeta$  を用いて書き直すと次式のようになる。

$$C_T^e(\zeta) = C_E^e(\zeta) + C_c^e(\zeta) + \zeta C_F^e(\zeta) \dots \dots \dots (18)$$

さらに、上式を無次元化するため、 $\zeta = 1.0$ 、すなわち、 $P_F = P_{F0}$  のときの期待総費用  $C_T^e$  を  $C_{T0}^e$  として、上式の両辺を  $C_{T0}^e$  で除した関数  $\eta_e(\zeta)$  を用いると次式のようにかける。

$$\eta_e(\zeta) = \frac{C_T^e}{C_{T0}^e} = \frac{C_E^e(\zeta) + C_c^e(\zeta)}{C_{T0}^e} + \zeta \cdot \frac{C_F^e(\zeta)}{C_{T0}^e} \dots \dots \dots (19)$$

前節までに検討した関係を基にして、式(19)右辺各項の関数形を決定していくことになるが、これについては以下に示す。なお、調査費  $C_E^e(\zeta)$  の関数形については、 $P_F$  に影響する土質諸係数が  $c, \phi, r$  があるので、力学および物理試験の個数と  $P_F$  の関係を明確にしなければならない。この関係を求めるることは非常に困難であることに加えて、全建設費に占める  $C_E^e(\zeta)$  の割合が小さいという 2 つの理由から一応、第一段階として、本論文では  $C_E^e$  を一定値として取扱うこととする。なお、 $\phi_u = 0$  法による急速せん断破壊の確率  $P_F$  と一軸圧縮強度試験の費用との関係はすでに示した<sup>5)</sup> とおりである。

#### a) 切土斜面の初期建設費 $C_c^e(\zeta)$

$C_c^e(\zeta)$  は、図-7 を参照にして、一般に次式で与えられる。

$$C_c^e(\zeta) = c_1^e \left[ \int_0^{X_1} f(x) dx + \int_{B_c}^{X_1} \left\{ -\frac{1}{m_c} (x - B_c) \right\} dx \right] + c_2^e L_c + c_3^e S_c + C_{c0}^e \dots \dots \dots (20)$$

上式において、右辺第 1 項は切土の土工費で  $c_1^e$  は土工単価、第 2 項は切土斜面の保護費で  $c_2^e$  は単位面積当たりの費用、第 3 項は地山買収費で  $c_3^e$  は単位面積当たりの用地費、第 4 項は管理費や準備工費その他の経費である。式(20)が  $\zeta$  の関数となるのは、式(8)、(10)、(11)、(13)、(14) からわかるように、 $m_c$  が  $\zeta$  の関数で、 $L_c, S_c$  がそれぞれ  $m_c, B_c$  などを介して  $\zeta$  の関数となっているからである。

第 4 項の  $C_{c0}^e$  は、一見  $\zeta$  に直接関係のない費用項目のようにみえるが、一般に直接工事費と関係があるから、 $\zeta$  と無関係ではなく、直接工事費の  $\alpha_c$  倍として見積られるのが普通である。すなわち、次式で与えられる。

$$C_{c0}^e = \alpha_c \left[ c_1^e \left\{ \int_0^{X_1} f(x) dx - \frac{1}{m_c} \int_{B_c}^{X_1} (x - B_c) dx \right\} + c_2^e L_c + c_3^e S_c \right] \dots \dots \dots (21)$$

#### b) 切土斜面の破壊損失費 $C_F^e(\zeta)$

切土斜面の破壊損失費  $C_F^e(\zeta)$  は一般に次式で与えら

れる。

$$C_F^c(\zeta) = C_{Er}^c + C_{rm}^c + C_{cr}^c + C_{F0}^c \dots \dots \dots (22)$$

ここに、右辺第1項は切土斜面が破壊した場合の原因調査費、第2項は崩壊土の排土工費で排土工の単価を  $c_1^c$  とすれば次式で与えられる。ただし、 $\beta_{c1}$  は排土工のための管理費や準備工費を考慮した係数で一定値である。

$$C_{rm}^c = c_1^c(1+\beta_{c1})Q \dots \dots \dots (23)$$

また、第3項は、崩壊面の保護費および地山の追加買収費で、それぞれの単価を  $c_2^c$ ,  $c_3^c$  および  $\beta_c$  を定数として、次式で与えられる。 $\beta_{c2}$  は一般管理費や準備工費を考慮した係数である。

$$C_{cr}^c = (c_2^c L_c' + c_3^c S_c')(1+\beta_{c2}) \dots \dots \dots (24)$$

すでに明らかなように、 $Q$ ,  $L_c'$ ,  $S_c'$  は  $\zeta$  の関数であるから、式(22)の右辺第3項までは  $\zeta$  の関数となる。さらに、第4項  $C_{F0}^c$  は式(24)に含まれない他の損害賠償費であり、もし、切土斜面が破壊した場合に被害を受ける範囲に対して、物件補償をするもので、原則として原形復旧、生産物補償として考える。この費用は、破壊の規模と建設地点の環境条件によって決定されてくる。前者は厳密には破壊が生じてみなければわからないわけであるが、費用計算の段階では、この範囲を推定した上で  $C_{F0}^c$  を見積ることになる。なお、前にも述べたように<sup>5)</sup>、筆者らは人命の損失はあってはならないという立場に立っている。このことは数学的に表現すれば、 $C_F^c \rightarrow \infty$  となることと同値である。式(20)～(24)を式(18)に用い、 $C_T^c(\zeta=1.0)=C_{T0}^c$  として、式(19)の形に書くと、結局、切土斜面の経済的評価モデルとして次式が得られる。なお、前述したように、調査費は一定値として考えており、かつ  $C_E/C_{T0}^c$  は非常に小さいので式(25)ではこれを省略している。

$$\begin{aligned} \eta_c(\zeta) &= (1+\alpha_c) \left[ c_1^c \left\{ \int_0^{X_1} f(x) dx - \frac{1}{m_c} \right. \right. \\ &\quad \cdot \int_{B_c}^{X_1} (x-B_c) dx \Big\} + c_2^c L_c + c_3^c S_c \Big] / C_{T0}^c \\ &\quad + \zeta [C_{Er}^c + c_1^c(1+\beta_{c1})Q + (1+\beta_{c2}) \\ &\quad \cdot (c_2^c L_c' + c_3^c S_c') + C_{F0}^c] / C_{T0}^c \dots \dots \dots (25) \end{aligned}$$

#### 4. 盛土の信頼度分析

3. と同様の手順で、各要因間の関係を以下に検討する。

##### (1) 安定解析に用いた仮定と数値

2. で示した全般的な仮定以外に、本章の盛土の安定解析に用いた仮定と数値について示すと以下のとおりである。

(i) 図-7に示すように、盛土側の道路幅員を  $B_b$ 、天端高を  $H_b$ 、斜面勾配を  $m_b$  とする。実際に解析に用

いた諸数値は、表-1に示した。片盛土の施工可能な最急勾配は、通常  $m_b=1.25$  程度であるので、この値を基準とした。また切土の場合と同様の理由から、 $B_b \geq 5$  m とした。

(ii) 盛土材料は切土した土砂を転用するのが一般的であるが、転用不可能な場合は客土によつてもよい。表-1に示すように、盛土施工直後の土質係数を2種類に選んで解析したのは、この点を考慮した結果である。

(iii)  $\tan \phi$  と  $r_b$  に関する式(3)の回帰係数としては、地山の場合と同様、 $a=0.5(m^3/t)$ ,  $b=-0.225$  を用いる。

(iv) 地山は十分安定であり、盛土を施工することによって、すべり面が地山内を通過するような破壊は生じないものとする。

(v) もし破壊したら、盛土の再建は客土によって行なうものとする。再建後の斜面の勾配  $m_b'$  は  $m_b' \geq m_b$  となるようとする。

#### (2) 盛土の斜面勾配と破壊確率

$\bar{F}_{s*}$  と  $P_F$  は式(3), (4)で与えられるから、 $m_b$  と

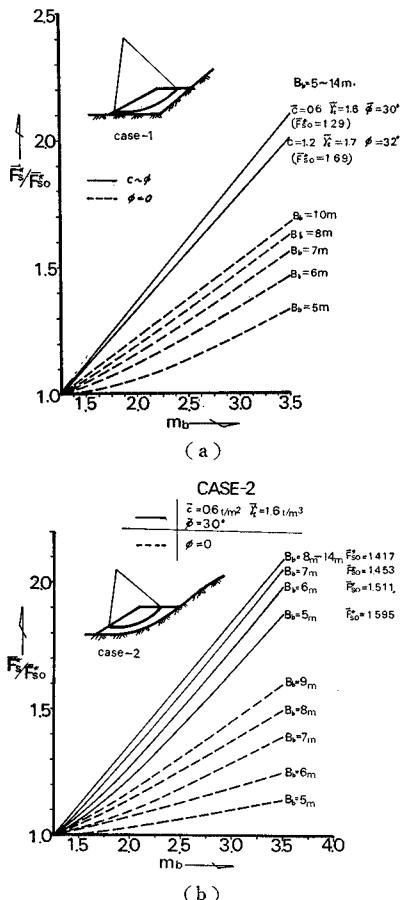


図-14  $m_b \sim \zeta$  関係

この関係は切土斜面に関して示した方法とまったく同様にして求められる。すなわち、 $m_b=1.25$  および任意の  $m_b$  に対する設計係数をそれぞれ  $\bar{F}_{so^*}$ ,  $\bar{F}_s^*$  とし、case-1, 2 に関して  $(\bar{F}_s^*/\bar{F}_{so^*}) \sim m_b$  関係を求めた一例を示すと 図-14 のようである。case-2 の場合、 $\mu_c=0.6$  t/m<sup>2</sup>,  $\mu_r=1.6$  t/m<sup>3</sup>,  $\mu_\phi=30^\circ$  の場合についてのみ示したが、他の土質条件の場合も傾向は同様であった。ここで注目すべきことは、 $c \sim \phi$  系の case-1 および case-2 の  $B_b \geq 8$  m の場合、切土斜面(図-3, 4)の場合と異なり、 $\bar{F}_s^*$  が  $B_b$  の影響を受けない点である。これは、上記の場合には、すべり面がすべて斜面内の浅い位置に発生し、 $B_b$  が大きくなてもすべり円弧の深さがほとんど変わらず  $m_b$  のみの影響を受けるからである。しかし、 $\phi=0$  系の場合は、すべり面が地山斜面に接する位置に生ずる。この位置は、 $B_b$  と  $H_b$  の両者によって影響されるので、一般に、 $\bar{F}_s^*$  は  $B_b$  によって左右される。ただし、case-1 では  $H_b$  が一定であるので、 $B_b$  がある値(この例では  $B_b=10$  m)以上になると、すべり円弧の深さが一定となり、 $B_b$  の影響は受けなくなる。

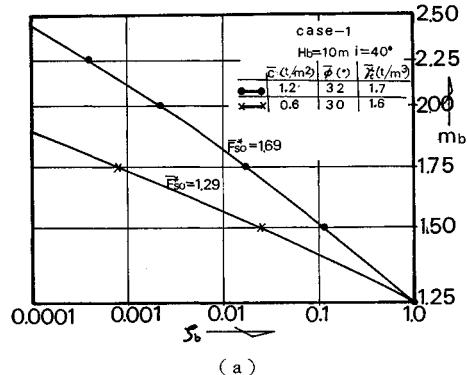
さて、式(3)、(4)を用いて図-14の関係を  $m_b$  ～  $c$  の関係に直し、これを両対数紙上に示すと図-15、16のようになる。このような関係は、切土斜面の場合と同

表-3  $m_c \sim \zeta$  関係係数一覧表

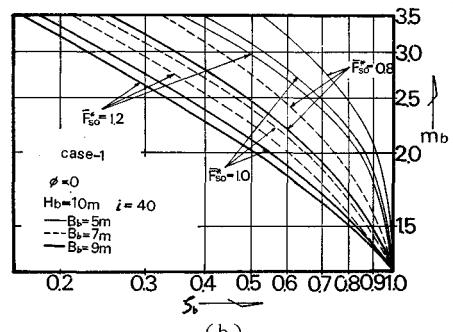
	$B(m)$	$F_{s0}^*$	$A_2$	$B_2$	$C_2$	
case-1	$\phi = 0$	5	0.800	-2.70500	1.94506	4.21000
			1.000	-2.91500	1.23073	4.38000
			1.200	-2.98300	1.05636	4.43000
		7	0.800	-4.97500	0.50346	6.29000
			1.000	-8.59600	0.20317	9.86000
			1.200	-127.67000	0.01114	128.94000
		9	0.800	-8.57500	0.21594	9.86000
			1.000	12.97000	-0.09353	-11.71000
			1.200	6.35400	-0.16778	-5.11000
		11	0.800	-8.57500	0.21594	9.86000
			1.000	12.97000	-0.09353	-11.71000
			1.200	6.35400	-0.16778	-5.11000
	$c \sim \phi$	5~14	1.289	10.23300	-0.00681	-8.99000
case-2	$\phi = 0$	5	0.800	-2.44340	6.94542	3.75000
			1.000	-2.62630	3.66133	3.94000
			1.200	-2.77290	2.78987	4.09000
		7	0.800	-2.62110	1.94519	3.94000
			1.000	-2.99290	1.09199	4.29000
			1.200	-3.37630	0.80596	4.67000
		9	0.800	-4.21660	0.57810	5.51000
			1.000	-11.80500	0.13174	13.08000
			1.200	-26.38700	0.05155	27.65000
		11	0.800	-3.39400	0.62291	4.67000
			1.000	-11.81200	0.10993	13.08000
			1.200	-77.43200	0.01458	78.69000
	$c \sim \phi$	5	1.595	-1.47800	0.09586	2.74000
		7	1.453	-14.42000	0.00606	15.69000
		9~14	1.417	13.69200	-0.00618	-12.44000

様、次式のような関数で近似できる。

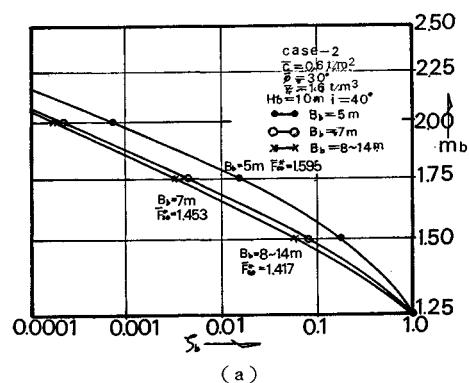
係数  $A_2, B_2, C_2$  の計算例は表-3 に一括して示してある。



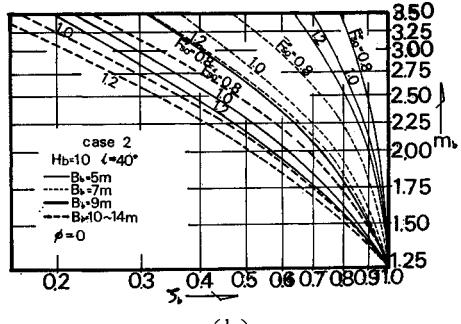
( a )



(B) 図 15  $m - \ell$  関係



( a )



(b) 圖 18-15 開佈

る。

### (3) 盛土の斜面勾配と斜面長および買収すべき地山面積の関係

$m_b$  とそのときの斜面長  $L_b$  の関係は、case-1, 2についてそれぞれ式 (27), (28) で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} B_b/H_b &\leq (1/\tan i) - m_b; \\ L_b &= \left| \left( 1 + \frac{1}{m_b \tan i - 1} \right) B_b \right| \sqrt{1+m_b^2}/m_b \\ B_b/H_b &> (1/\tan i) - m_b; \\ L_b &= H_b \sqrt{1+m_b^2} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

$$L_b = |B_b + X_b| \sqrt{1+m_b^2}/m_b \quad (28)$$

ここに、式 (28) の  $X_b$  は地山と盛土斜面の交点の  $x$  座標である(図-7 参照)。式 (27), (28) を用いて  $L_b \sim m_b$  関係を計算した結果を図-17 に示す。

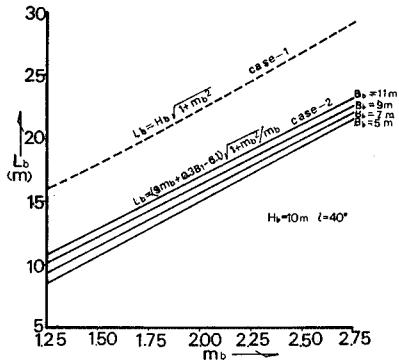


図-17  $m_b \sim L_b$  関係

一方、盛土建設に際し必要な地山の面積  $S_b$  は、case-1, 2 についてそれぞれ、式 (29), (30) で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} B_b/H_b &\leq (1/\tan i) - m_b; \\ S_b &= |B_b/(m_b \tan i - 1)| + S_{b0} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

$$\left. \begin{aligned} B_b/H_b &> (1/\tan i) - m_b; \\ S_b &= B_b + m_b H_b + S_{b0} \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

上式において  $S_{b0}$  は、切土の場合と同様、余分に買収しておく面積である。式 (29), (30) を用いて  $S_b \sim m_b$  関係を計算した例を図-18 に示す。ただし、計算は  $S_{b0}=0$  としてある。

### (4) 破壊確率と費用との関係

盛土部分の期待総費用  $C_T^b$  は、切土の場合と同じように、 $\zeta$  を用いて以下のように書ける。

$$C_T^b(\zeta) = C_E^b(\zeta) + C_C^b(\zeta) + \zeta C_F^b(\zeta) \quad (31)$$

上式において、右辺第1項は土質調査費、第2項は初期建設費、第3項は破壊損失費である。 $\zeta=1.0$  ( $P_F=P_{F0}$ ,  $m_b=1.25$ ) に対する  $C_T^b(\zeta)$  を基準費用  $C_{T0}^b$  と考え

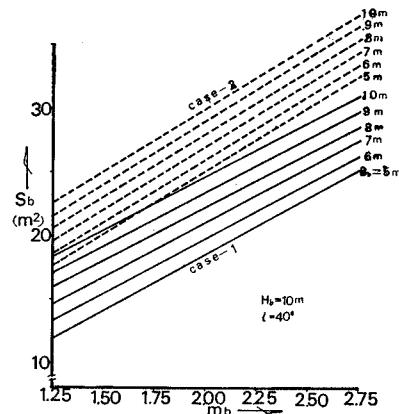


図-18  $m_b \sim S_b$  関係

ると、式 (31) は次式のようにかける。

$$\eta_b(\zeta) = \frac{C_E^b(\zeta) + C_C^b(\zeta)}{C_{T0}^b} + \zeta \cdot \frac{C_F^b(\zeta)}{C_{T0}^b} \quad (32)$$

なお、切土に関して述べたのと同じ理由によって、盛土のための土質調査費  $C_E^b(\zeta)$  も、ここでは一定値として取扱う。

#### a) 盛土の初期建設費 $C_C^b(\zeta)$

盛土の単位奥行当たりの建設費は、図-7 を参照にして次式で与えられる。

$$\begin{aligned} C_C^b(\zeta) &= c_1^b \left\{ \frac{1}{m_b} \int_{X_b}^{-B_b} (x + B_b) dx - \int_{X_b}^0 f(x) dx \right\} \\ &+ c_2^b L_b + c_3^b S_c + C_{c0}^b \end{aligned} \quad (33)$$

上式右辺各項の意味は、切土斜面に関する式 (20) の場合と同じである。すなわち、第1項は盛土の土工費で  $c_1^b$  は土工単価、第2項は盛土斜面の保護費で  $c_2^b$  は斜面保護単価である。また、第3項は地山の買収費で  $c_3^b$  は買収単価、第4項は管理費、準備工費その他の費用を盛土の単位長さ当たりに換算したものである。 $m_b$ ,  $B_b$ ,  $X_b$ ,  $L_b$ ,  $S_b$  などが  $\zeta$  の関数であるから、 $C_C^b(\zeta)$  が  $\zeta$  の関数となることは明らかである。なお、 $C_{c0}^b$  は、通常、第1, 2, 3 項までの直接費用の  $\alpha_b$  倍という形で積算されるので、次式のように書くことができる。

$$\begin{aligned} C_{c0}^b &= \alpha_b \left[ c_1^b \left\{ \frac{1}{m_b} \int_{X_b}^{-B_b} (x + B_b) dx - \int_{X_b}^0 f(x) dx \right\} \right. \\ &\quad \left. + c_2^b L_b + c_3^b S_b \right] \end{aligned} \quad (34)$$

#### b) 盛土の破壊損失費 $C_F^b(\zeta)$

破壊の原因調査費を  $C_{Er}^b$ 、排土や整地工費を  $C_{rm}^b$ 、再建費を  $C_{cr}^b$ 、損害賠償費を  $C_{F0}^b$  とすると、破壊損失費  $C_F^b(\zeta)$  は一般に次式のように書ける。

$$C_F^b(\zeta) = C_{Er}^b + C_{rm}^b + C_{cr}^b + C_{F0}^b \quad (35)$$

$C_{Er}^b$  は、すでに示したように<sup>5)</sup>、厳密には  $\zeta$  と密接な関係がある。しかし、 $c \sim \phi$  系土質に関して調査規模と費用との関連が定量化できていないこと、本論文の主

目的が切盛土の設計信頼度決定の方法論の確立であること、さらに、筆者らの調査によると  $C_{Er}^b$  が全再建費の数パーセントという例が多いなどの理由により、ここでは簡単のため、 $\beta_{bi}$  を定数として次式のようにおく。

$C_{rm}^b$  は、明らかに当初建設の盛土規模と破壊の規模によって決定される。ここでは盛土が破壊した場合は、客土を利用して全面的に再建することをたてまえにしているので、当初の盛土建設に必要であった土量は排土、整地しなければならないと考え、 $C_{rm}^b$  を次式で与える。

$$C_{rm}{}^b = c_4{}^{b\prime} \left[ \frac{1}{m_b} \int_{x_b}^{-B_b} (x + B_b) dx - \int_{x_b}^0 f(x) dx \right] \dots \quad (37)$$

ここに、 $c_4^{(b)}$  は排土と整地のための土工単価である。

当初斜面勾配が  $m_b$  であった盛土が破壊したときは、新たに、 $m_b'$  なる斜面勾配で再建するものとして、これに要する建設費を  $C_{cr} b$  とする。ただし、再建は常に  $m_b' \geq m_b$  で行なうものとする。このとき  $C_{cr} b$  は次式で与えられる。

$$C_{cr}^{\quad b} = c_1^{\quad b'} \left[ \frac{1}{mb'} \int_{X_{b'}}^{-B_b} (x + B_b) dx - \int_{X_{b'}}^0 f(x) dx \right] \\ + c_2^{\quad b'} L_{b'} + c_3^{\quad b} (X_{b'}' - X_b) + C_{cro}^{\quad b} \dots \dots \quad (38)$$

ここに、 $c_1^{b'}$  は再建時の土工単価で、一般には客土を利用するから、式(33)の  $c_1^b$  とは異なる。 $c_2^{b'}$  は再建時の盛土の斜面保護単価で、 $L_b'$  は保護斜面長であり、式(27)、(28)の  $m_b$  を  $m_b'$  で置き換えた式で与えられる。また、 $X_b'$  は  $m_b'$  なる斜面勾配の盛土と地山との交点の  $x$  座標であり、 $c_3^b$  は再建時の追加の用地買収単価である。なお、 $C_{cor}^{b'}$  は再建時に必要な準備工費、一般管理費などで、通常、建設費  $C_c^b$  に関して次式で与えられるものとする。ただし、 $\beta_{b'}$  は係数である。

$$C_{cr0}{}^b = \beta_{b2} \left[ c_1{}^{b_1} \left\{ \frac{1}{m_{b'}} \int_{X_{b'}}^{-B_b} (x + B_b) dx \right. \right. \\ \left. \left. - \int_{X_{b'}}^0 f(x) dx \right\} + c_2{}^{b_1} L_{b'} + c_3{}^{b_1} (X_{b'} - X_b) \right] \quad (39)$$

$C_{F_0}^b$  は損害賠償費で、切土に関して述べた  $C_{F_0}^c$  の内容とまったく同じものである。

式(36)～(39)を式(35)に用いると、 $C_E^b(\zeta)$ は

$$\begin{aligned}
 C_F^b(\zeta) = & (1 + \beta_{b1} + \beta_{b2} + \beta_{b1}\beta_{b2}) \\
 & \cdot \left[ c_1^{b'} \left\{ \frac{1}{m_{b'}} \int_{X_{b'}}^{-B_b} (x + B_b) dx \right. \right. \\
 & - \int_{X_{b'}}^0 f(x) dx \left. \right\} + c_2^{b'} L_{b'} + c_3^b (X_{b'} - X_b) \Big] \\
 & + c_4^{b'} \left\{ \frac{1}{m_b} \int_{X_b}^{-B_b} (x + B_b) dx - \int_{X_b}^0 f(x) dx \right\} \\
 & + C_{F_0}^b ..... \quad (40)
 \end{aligned}$$

となり、上式と式 (33) を式 (32) に代入すれば、無次

元化した盛土の全期待費用についての費用関数  $\eta_b(\zeta)$  は式 (41) のようになる。ただし、 $C_{T_0} b$  は式 (40) において、 $\zeta=1.0 (m_b'=m_b=1.25, X_b=X_b')$  として得られる。

$$\begin{aligned} \eta_b(\zeta) = & (1 + \alpha_b) \left[ c_1 b \left\{ \frac{1}{m_b} \int_{X_b}^{-B_b} (x + B_b) dx \right. \right. \\ & - \int_{X_b}^0 f(x) dx \left. \right\} + c_2 b L_b + c_3 b S_b \left. \right] / C_{T_0} b \\ & + \zeta \left[ (1 + \beta_{b1} + \beta_{b2} + \beta_{b1}\beta_{b2}) \left\{ c_1 b' \int_{X_b'}^{-B_b} \frac{1}{m_{b'}} \right. \right. \\ & \cdot (x + B_b) dx - c_1 b' \int_{X_b'}^0 f(x) dx + c_2 b' L_{b'} \\ & + c_3 b' (X_b' - X_b) \left. \right\} + c_4 b' \left\{ \frac{1}{m_b} \int_{X_b}^{-B_b} (x + B_b) dx \right. \\ & \left. \left. - \int_{X_b}^0 f(x) dx \right\} + C_{F_0} b \right] / C_{T_0} b \dots \dots \dots (41) \end{aligned}$$

## 5. 数値計算による検討

本章では、切土および盛土をそれぞれ単独に評価する場合と、切盛土を同時に評価する場合の3者について検討を加える。ただし、 $\phi=0$  系の場合の理論の妥当性についてはすでに発表した<sup>5)</sup>ので、ここでは、紙数の都合上、実際的な場合の例として  $c \sim \phi$  系についての例を示すに止める。

費用計算に用いた諸数値は一括して表-4に示されている。なお、 $\alpha_c$ 、 $\alpha_b$ 、 $\beta_{c1}$ 、 $\beta_{c2}$ 、 $\beta_{b1}$ 、 $\beta_{b2}$ などは総工事費の大きさによって多少変化するが、ここでは、実際の場合の平均的な値として表中の値を用いた。

### (1) 切土斜面を単独に評価する場合

この場合の数値計算は式(25)を用いて行なうことができる。紙数の都合上、 $B_c$  は 5, 7, 9, 11(m) の 4 種類についてのみ示す。case-1 については、図-3 からもわかるように、 $\bar{F}_s^*/F_{s0}^*$  は  $B_c \geq 11(m)$  では  $B_c$  の影響をほとんど受けない。図-19 はその計算結果である。

さて、前述したように、 $\eta_c(z) \sim z$  関係を明白にする

表-4 コスト計算に用いた諸数値

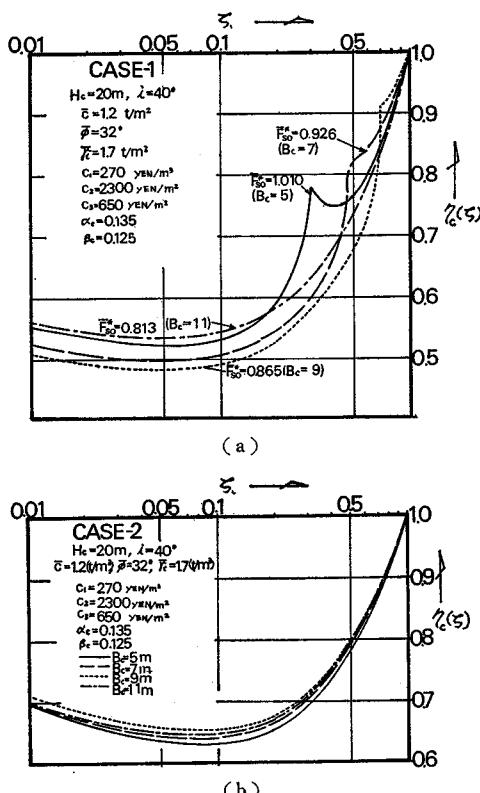
		土工単価 $c_1$ (YEN/m <sup>3</sup> )	斜面保護 単価 $c_2$ (YEN/m <sup>2</sup> )	地山買収 単価 $c_3$ (YEN/m <sup>2</sup> )	平地買収 単価 $c_4$	係数	
切	初期建設時	270	2,300 <sup>(*)2</sup>	650	—	0.135	0.125
土	再 建 時	270	2,300	650	—	0.135	0.125
盛	初期建設時	270	200 <sup>(*)3</sup>	650	3,000 <sup>(*)4</sup>	0.135	0.125
土	再 建 時	980 <sup>(*)1</sup>	200	650	3,000	0.135	0.125

\*1) 盛土の場合破壊後の再建には寄土によるものと工事用砂(高)

\*1) 盛土の場合は破壊後の再建には各土によるので工事単価が高い。  
 \*2) 切土の斜面保護として標準的なセメントモルタルの吹付けを考慮する。

\*3) 盛土の斜面保護として植生を導入した。

\*4) 片盛土の斜面こう配が平地部に広がるとき地山買収費として平地買取単価（水田地帯を想定）を用いた。

図-19  $\zeta \sim \eta_c(\zeta)$  関係

こと自体が筆者らの最大の目的であるが、以下の点は注目するに値する。すなわち、第1点は  $\eta_c(\zeta)$  が図のように最小点を有することである。このことは、少なくとも、 $\eta_c(\zeta)$  が最小になる  $\zeta$  よりも右側の位置で設計することは不適当である、という意味において重要である。第2点は  $\eta_c(\zeta)_{\min}$  に対応する  $m_c$  がほぼ 1.0 ～ 1.2 になっていることである（表-5 参照）。このような  $m_c$  は土質条件や工事費の単価として常識的な値を採用した結果の値であり、通常の土砂部の切土に適用されている斜面勾配 1.2° に近似している。すなわち、慣用の方法で設計に採用している  $m_c$  が、長い経験からほぼ妥当な値を定めてきたことを裏付けている点で重要なである。なお、図-19 の (a) と (b) を比較して気付くことは、(a) 図 (case-1) の場合費用関数に突起部が見られ、(b) 図にはそれが見られない点である。これは case-1 の場合、斜面を不連続な曲線で近似したことによる。したがって case-1 の場合でも  $B_c$  が 11 m 程度より大きくなると斜面が不連続なために起因する諸性質の不連続性は顕著に出てこないのである（図-2、図-10 等 参照）。

## (2) 盛土を単独に評価する場合

この場合、数値計算は式 (41) を用いて行なう。片

表-5 切土・盛土単独の費用計算結果

形 状	土質	$B$ (m)	$\eta(\zeta)=1.0$ に対応する			$\eta(\zeta)_{\min}$ に対応する		
			$P_F$ (%)	$\bar{F}_{s0}^*$	$m$	$\zeta$	$P_F$ (%)	$\bar{F}_{s0}^*$
盛 土	case-1	5	1.2	1.29	1.25	0.05	0.06	1.42
		7	1.2	1.29	1.25	0.04	0.05	1.42
		9	1.2	1.29	1.25	0.03	0.04	1.43
切 土	case-1	5	0.5	1.60	1.25	0.10	0.05	1.70
		7	0.7	1.45	1.25	0.08	0.06	1.58
		9	0.8	1.42	1.25	0.08	0.06	1.56
切 土	case-2	5	48	1.01	0.58	0.05	2.4	1.21
		7	80	0.94	0.58	0.05	4.0	1.20
		9	90	0.87	0.58	0.05	4.5	1.19
		11	77	0.82	0.58	0.05	4.9	1.19
切 土	case-2	5	10	1.17	0.58	0.09	0.9	1.28
		7	27	1.07	0.58	0.08	2.2	1.22
		9	47	1.01	0.58	0.08	3.8	1.21
		11	62	0.97	0.58	0.08	5.0	1.19
								0.98

盛土の場合、当初建設に際する斜面勾配  $m_b$  と破壊後の再建勾配  $m_b'$  とは一般に等しくなる必要はない、 $m_b' \geq m_b$  とする。このような条件のとき、 $\eta_b(\zeta)$  は  $m_b'$  と  $m_b$  の2つの独立変数の関数となるから、この点を考慮に入れ、三次元的に  $\eta_b(\zeta) \sim \zeta$  関係を検討する。計算では簡単のため切盛土の土工量が平衡している場合を想定する。計算に用いた条件は、表-4 中に合せて示したが、盛土の場合、斜面勾配が大きくなつて平地にかかるときは地山の買収単価を変えて計算した。 $B_b=5.0$  m の場合で、 $c=0.6$  t/m<sup>2</sup>、 $\phi=30^\circ$ 、 $f_t=1.6$  t/m<sup>3</sup> の条件下で、case-1 の結果のみを示すと図-20 のようである。図中、 $\zeta$  は当初建設時の斜面勾配  $m_b$  に対応する  $\zeta$  で、 $\zeta'$  は再建時の斜面勾配  $m_b'$  に対応する  $\zeta$  を表わしている。費用曲面  $\eta_b(\zeta)$  の最小値は、図のように、 $\zeta=\zeta'$  ( $m_b=m_b'$ ) 面上に表われるが、このことは他のすべての計算例について確認された。すなわち、再建時の斜面勾配を初期建設時の勾配と等しくするのが費用の面では最も効率がよいといえる。紙数の都合上、すべての費用曲面を示すことはできないので、参考のため、case-2

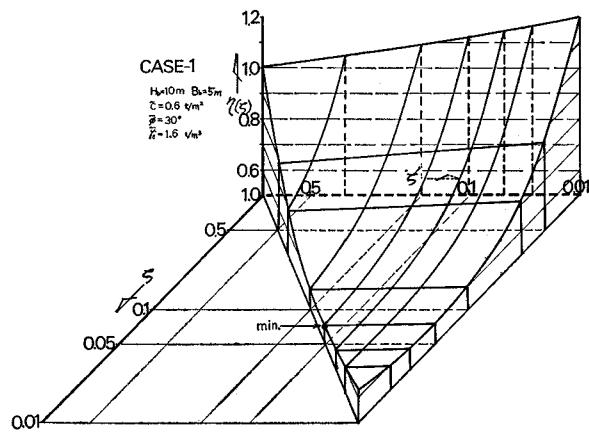
図-20  $\zeta, \zeta' \sim \eta_b(\zeta)$  関係

表-6 切盛土同時費用計算

$\eta_{bc}(\zeta)$	B (m)	B <sub>b</sub> (m)	B <sub>c</sub> (m)	$\eta_{bc}(\zeta)_{\min}$ に対応する								
				盛 土				切 土				
				$\zeta$	$P_F (\%)$	$\bar{F}_s^*$	$m_b$	$\zeta$	$P_F (\%)$	$\bar{F}_s^*$	$m_c$	
case-2	0.61124	10	5	5	0.06	0.03	1.73	1.61	0.09	0.9	1.28	1.11
	0.61850	12	5	7	0.06	0.03	1.73	1.61	0.09	2.4	1.21	1.08
	0.58775	7*	5	0.05	0.035	1.61	1.53	0.09	0.9	1.28	1.11	
	0.62815	14	5	9	0.04	0.03	1.75	1.65	0.09	4.2	1.20	1.04
	0.59573	7	7	0.05	0.035	1.61	1.53	0.09	2.4	1.21	1.08	
	0.58871	9*	5	0.05	0.04	1.59	1.51	0.09	0.9	1.28	1.11	
	0.62188	16	5	11	0.06	0.03	1.73	1.61	0.08	5.0	1.19	0.98
	0.60436	7	9	0.05	0.035	1.61	1.53	0.09	4.2	1.20	1.04	
	0.59652	9	7	0.05	0.04	1.59	1.51	0.09	2.4	1.21	1.08	
	0.59228	11*	5	0.05	0.04	1.59	1.51	0.09	0.9	1.28	1.11	
	0.60021	18	7	11	0.05	0.035	1.61	1.53	0.08	5.0	1.19	0.98
	0.60500	9	9	0.05	0.04	1.59	1.51	0.09	4.2	1.20	1.04	
	0.59983	11*	7	0.05	0.04	1.59	1.51	0.09	2.4	1.21	1.08	
	0.60089	20	9*	11	0.05	0.04	1.59	1.51	0.08	5.0	1.19	0.98
	0.60810	11	9	0.05	0.04	1.59	1.51	0.09	4.2	1.20	1.04	
	0.60485	22	11	11	0.05	0.04	1.59	1.51	0.08	5.0	1.19	0.98

注: \* 印は  $\eta_{bc}(\zeta)_{\min}$  を与える  $B_b, B_c$  の組合せを意味する。

の場合も含めて、  $\eta_b(\zeta)$  の最小値に対応する  $\bar{F}_s^*$ ,  $P_F$ ,  $m_b$ などを表-5に一括して示した。この表からわかるように、 盛土の場合、  $c \sim \phi$  系として実際的な値を用いた結果、  $\eta_b(\zeta)$  の最小値に対応する  $m_b$  はだいたい 1.5 程度であり、 常識的な値を示している。

### (3) 切盛土を同時に評価する場合

切盛土を同時に評価する場合の経済的評価モデルとしては、 式 (18), (31) を用いて、 次式のように表わされる。

$$\eta_{cb}(\zeta) = \frac{C_{T^c}(\zeta) + C_{T^b}(\zeta)}{C_{T_0^c} + C_{T_0^b}} \quad \dots \dots \dots (42)$$

実際的な場合を考え、 計算は  $c \sim \phi$  系、 case-2 についてのみ実施した。計算結果の一例を示すと 図-21 のようである。図中  $\zeta_c$  は切土に対応する  $\zeta$ ,  $\zeta_b$  は盛土に対応する  $\zeta$  を表すが、 前節で述べたように、 盛土に関しては、  $\zeta_b = \zeta_b'$  で  $\eta_b(\zeta)$  が最小になることを考慮に入れ、 ここでは、  $\zeta_b = \zeta_b'$  として計算した。当然、 予測されることであるが、 切土、 盛土を別個に評価した場合の結果と切盛土を同時に評価した場合とでは一般に異なってくる。試みに最小値で検討してみても、 図-21 の場合では  $\eta_{cb}(\zeta)_{\min}$  に対応する  $\zeta_b$  は  $\zeta_b = 0.06$  となり、 表-5 の結果と異なる。 $\zeta_c$  については、  $\zeta_c = 0.09$  で図-19 (b) の結果と一致しているようにみえるが、  $\zeta$  を小数点以下 3 衔まで計算すれば結果は異なってくる。他の計算例について、  $\eta_{cb}(\zeta)_{\min}$  に対応する  $\zeta_c, \zeta_b, m_c, m_b, P_F, \bar{F}_s^*$ などを参考のため示せば表-6のようである。図-21 および表-6 からわかるように、  $\eta_{cb}(\zeta)_{\min}$  に対応する  $\zeta_c$  は切土単独の場合に非常に近い。また、

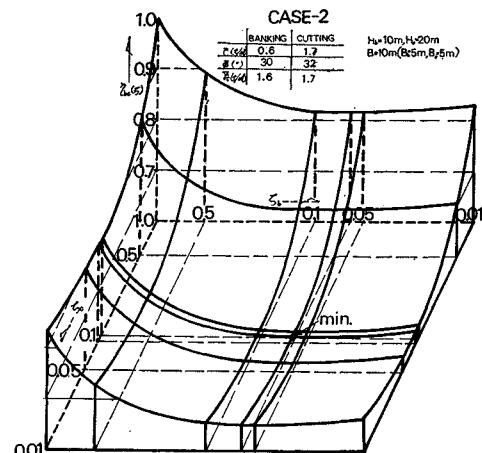
図-21  $\zeta_b, \zeta_c \sim \eta_{cb}(\zeta)$  関係

表-6 で示したように、 道路の全幅員  $B$  を固定して  $B_c$  と  $B_b$  を変えて（中心線を動かす）みても、  $B_b$  の幅を大きく、  $B_c$  の幅を小さくするほうが経済的な面からは有利であることがわかる。この主な理由は、  $\eta_{cb}(\zeta)$  に占める  $\eta_c(\zeta)$  の割合が非常に大きいからである。

以上の検討から、 切盛土は単独で評価するよりも、 式 (42) のように、 一体として評価するのが一般的に妥当である。

## 6. む す び

本研究では、 山岳道路の一つの構造としての切盛土に關して、 その信頼度分析を行ない、 合理的な設計信頼度の決定法について考察した。

終りに臨み、計算のための各種資料を提供して下さいました日本道路公団、京都市、兵庫県の関係各位に深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) Freudenthal, A.M. : The Safety of Structures, Proc. of A.S.C.E., Vol. 71, pp. 1157~1191, 1945.
- 2) Freudenthal, A.M. : Safety and the Probability of Structural Failure, Proc. of A.S.C.E., Vol. 80, pp. 468-1~468-46, 1954.
- 3) 松尾 稔・黒田勝彦：盛土建設のための土質調査と盛土の安定性に関する研究、土木学会論文報告集、第196号、pp. 75~86, 1971.
- 4) 松尾 稔・黒田勝彦：盛土の破壊確率を考慮した土質調

査の規模決定法について、土木学会論文報告集、第198号、pp. 69~81, 1972.

- 5) 長尾義三・松尾 稔・黒田勝彦：盛土の設計安全率決定に関する研究、土木学会論文報告集、第203号、pp. 71-85, 1972.
- 6) 松尾 稔・黒田勝彦：不飽和土の土質諸係数と破壊確率に関する一考察、土木学会論文報告集、第208号、pp. 65~75, 1972.
- 7) 久保村圭助・小橋澄治：国鉄の斜面崩壊の実態と対策、土と基礎、Vol. 20, No. 2, pp. 49~50, 1972.
- 8) 奥園誠元：切土ノリ面の崩壊とノリコウ配、土と基礎、Vol. 20, No. 2, p. 33, 1972.

(1972.8.3・受付)