

トンネル切羽の安定性に関する遠心力模型実験

Centrifugal model tests on the stability of the tunnel face

真下英人*・猪熊 明**

Hideto Mashimo, Akira Inokuma

In order to excavate a tunnel in safety, it is important to keep the tunnel face stable. But now there are no criteria to evaluate the stability of the tunnel face easily, so some accidents of the tunnel face collapse have happened owing to the lack of the countermeasures for the tunnel face collapse.

In this paper, centrifugal model tests on unsaturated sand were carried to investigate the ground condition when the tunnel face collapse happens and the results of the model tests were analyzed by the three-dimensional stability analysis. From the model tests and the analysis, the author could obtain a criterion to evaluate the face stability.

Keywords: tunnel face, stability, centrifugal model test, three-dimensional analysis

1. まえがき

山岳トンネル工法によりトンネルの掘削を行う場合は、切羽の安定性の確保が掘削時における最大の課題となる。切羽の安定性が確保できない場合には切羽から先受工や鏡ボルト、鏡吹付けコンクリート等の補助工法を実施して切羽の安定を図ることになるが、これら切羽の安定対策のための補助工法の採用の可否、選択については現在のところは基準となるものがなく、主に切羽の観察記録を利用して現場の地質状況や施工事例等を勘案しながら実施しているのが現状である。このため、切羽の安定対策を施すタイミングが遅れたり、適切な規模の対策が実施できずに、天端や切羽の崩壊を招いた事例が報告されており、切羽の安定性を定量的に簡便に評価する方法の確立が望まれているところである。

このような問題に対応するため、筆者らは、切羽の崩壊が発生するときの地山の条件を明らかにし、切羽の安定性を評価するための指標を得ることを目的とした1gの重力場での模型実験¹⁾および安定解析を行い、トンネル径程度の土被りがあれば切羽の安定性に及ぼす土被りの影響は少ないこと、切羽の安定には地山の粘着力が重要であり、粘着力 c 、トンネル径 D 、地山の単位体積重量 γ から求まる無次元量 $c/\gamma D$ が切羽安定の指標となり得ることなどを明らかにした。しかし、これらの実験結果は実物(現場)よりもはるかに低い応力状態で実施されたものであり、現場への適用に当たっては現場により近い応力状態での実験を行ってその妥当性を確認する必要があるものと考え、本研究では遠心力载荷模型実験を実施したのでその結果について報告する。なお、トンネル切羽の崩壊メカニズムは、地山の岩質、亀裂の状況、湧水の有無等種々の条件によって大きく異なるものと考えられるが、本研究では亀裂、湧水が存在しない土砂地山を対象にした。

* 正会員 建設省土木研究所 トンネル研究室

** 正会員 通産省工業技術院

2. 遠心力载荷装置による切羽安定模型実験

(1) 実験装置と実験方法

図-1に実験装置の概要を示す。実験には寸法が140×500×400(mm)で前面が透明なアクリル板の砂箱を使用しており、砂箱にはアクリル製の半円筒と切羽を押さえる半円形の押さえ板からなる径D=80mmのトンネル模型が設置されている。実験はトンネル模型を埋め込んで作成した模型地盤を遠心载荷し、所定の遠心加速度に達した段階でトンネル模型の押さえ板を引き抜いて切羽での応力解放を行い、その際の切羽の安定状態を調べた。なお、トンネル先端に素掘部分を設けるため押さえ板を半円筒から0.1Dだけ地山側に出した状態でトンネル模型を設置した。

(2) 実験条件

実験条件は、地盤材料として表-1に示す物性値を持つ豊浦標準砂と洪積世の相模層群に掘削されたトンネル施工現場から採取した砂(相模砂)の2種類を使用し、それぞれについて土被りHとトンネル径Dとの比で定義される土被り比H/Dを1,2,3と変化させた。内部摩擦角および粘着力は、模型地盤と同一の含水比および単位体積重量を有する供試体に対して一面せん断試験を実施して求めた。

(3) 実験結果

写真-1は標準砂、土被り比H/Dが2の場合について応力解放により切羽の崩壊が発生したケースの実験土槽壁面における崩壊状況を示したものであり、図-2は標準砂および相模砂それぞれの土被り比について崩壊が発生したケースの実験土槽壁面における崩壊形状を示したものである。

各ケースとも切羽底盤に近い位置に端を発する滑り面が切羽前方上部にかけて発生し、この滑り面が天端よりも高い位置で閉じてドーム状の崩壊が発生しているのが認められる。また、切羽の崩壊が発生している領域は切羽前方0.2Dから0.24D程度までであり、これらの

崩壊形状は土被り比、地盤材料にかかわらずほぼ同一のものとなっている。なお、これらの結果は1gの重力場で実施した実験結果とも比較的一致している。

図-3のプロットは標準砂、土被り比H/Dが2の場合の切羽の崩壊が発生したケースについて、実験終了後の模型地盤をスライスし、鉛直断面の崩壊形状を天端より下部についてトンネルセ

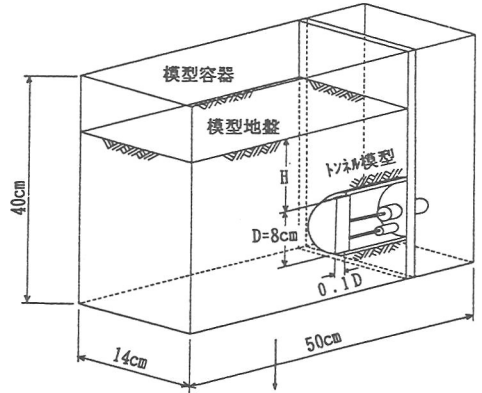


図-1 実験装置概要図

表-1 模型地盤の物性値

	標準砂	相模砂
単位体積重量 γ (gf/cm ³)	1.50	1.54
含水比 w (%)	10.8	10.8
粘着力 c_e (gf/cm ²)	5.8	11.6
内部摩擦角 ϕ_e (deg)	33.5	24.2

* C_e , ϕ_e は一面せん断試験(垂直応力 $\sigma = 30 \sim 150 \text{ gf/cm}^2$)により算定

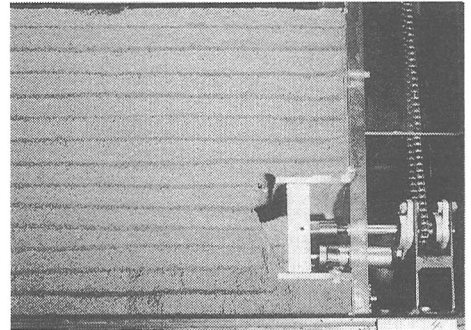


写真-1 切羽の崩壊状況(標準砂、H/D=2)

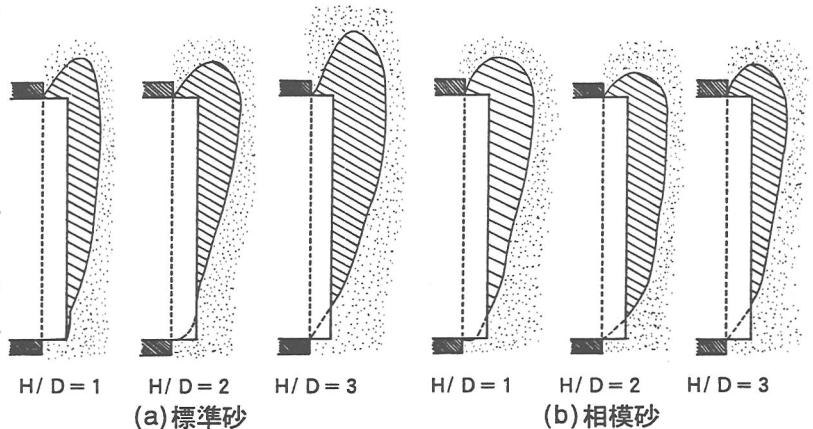


図-2 切羽の崩壊形状

ンターからの距離ごとに示したものである。崩壊形状はトンネル横断方向の位置によって異なり、トンネルセンターから離れるに従って滑り面の深さが浅くなり、側壁部近くではほとんど滑り面が認められなくなる。また、図-3の点線は崩壊土塊を図-4に示すような天端を通る水平面内においてy軸に平行な回転軸をもつ回転体に近似することにより得られる崩壊形状を示したものであるが、このような回転体によって崩壊形状がある程度近似できることがわかる。

図-5は、各実験ケースのトンネル径を実験を行った遠心加速度を用いて実物寸法に換算し、各土被り比に対してトンネル径と切羽の安定状態を示したものである。図中の崩壊は図-2に示した形状の崩壊が、また、肌落ち崩壊は発生しなかったものの天端の無支保区間で肌落ちが発生したことを示す。切羽が崩壊する時のトンネル径は、地山材料が同一であれば今回実験を行った土被り比が1以上の範囲では土被り比にかかわらずほぼ同一の値を示している。また、相模砂と標準砂との比較では相模砂の場合が約5.6m、標準砂の場合が約2.5mの時にそれぞれ切羽の崩壊が発生しており、標準砂に比べて約2倍の粘着力を有する相模砂は、切羽が自立する最大トンネル径も標準砂の約2倍となっていることがわかる。

図-6は、切羽の安定に必要な粘着力 c を単位体積重量 γ とトンネル径 D の積で除した無次元量 $c/\gamma D$ と土被り比との関係を示したものであり、図中には直径が10.1, 16.0, 21.6, 31.9cmのトンネル模型を用いて実施した1gの3次元模型実験結果も併せて示した。1gの重力場、遠心力場での実験結果はともにトンネル径、土被り比の大きさに関係なく $c/\gamma D$ の値として0.13~0.16付近に切羽の安定と崩壊の境界領域が見られ、湧水がない場合にはこのような無次元量 $c/\gamma D$ を用いることにより切羽の安定性の評価が可能となることを示している。

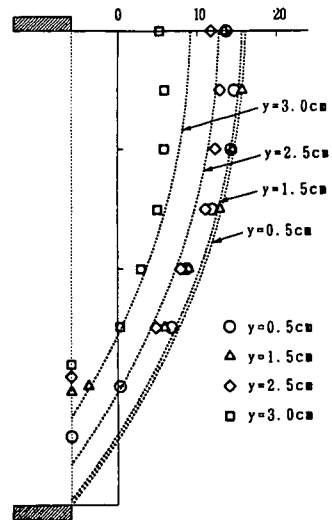


図-3 切羽の崩壊形状の横断方向変化 (標準砂、 $H/D=2$)

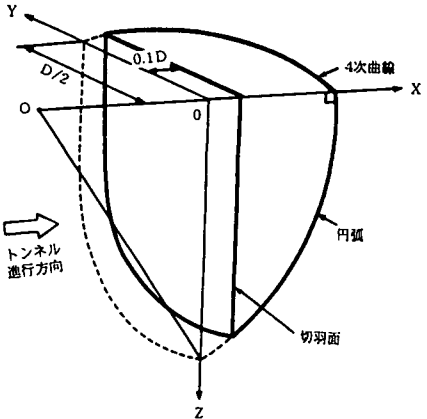


図-4 崩壊土塊の近似

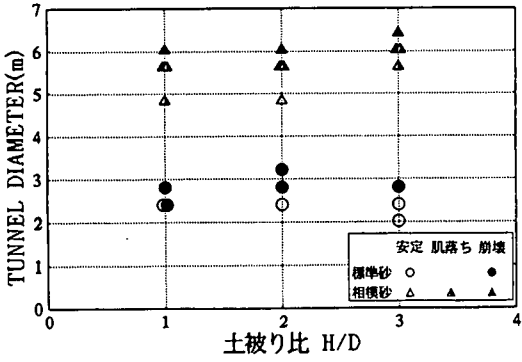


図-5 トンネル径と切羽の安定状況

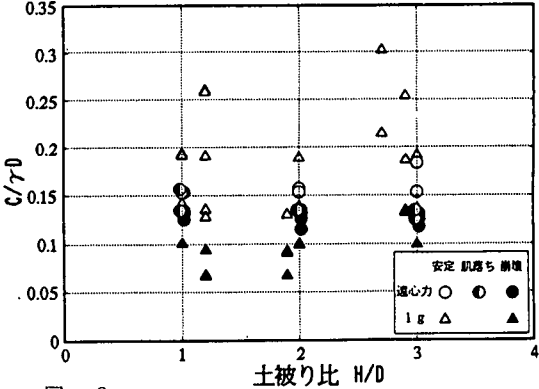


図-6 切羽安定に必要な $c/\gamma D$ と土被り比との関係

4. 切羽の安定解析

(1) 解析方法

切羽の安定解析は、これまではトンネル横断方向に同一の破壊形状を有するものと仮定した2次元解析が行われてきているが、前述したように実験結果によれば切羽の崩壊形状はトンネル横断方向に対しても変化する事が確認されている。このため、本研究では切羽の安定解析をトンネル横断方向の破壊形状を考慮した3次元解析により行うこととし、一部のケースについては併せて2次元解析を行い、解析結果の比較を行った。

1) 3次元解析モデル

図-7は、3次元解析に用いた地山のモデルを示したものである。本研究では、切羽前方の崩壊土塊をトンネル天端を通る水平面で分離し、水平面より上部の土塊の影響を水平面に作用する土圧 q に置き換え、水平面より下部の土塊の滑りに対する安全率を分割法(簡便法)により求めた。具体的には、切羽の崩壊形状は前述したように実験結果から図-7に示すような回転体に近似できる事が確認されたため、崩壊土塊を xz 面、 yz 面により鉛直な柱に分割し、土柱間に働く内力の伝達を無視して、

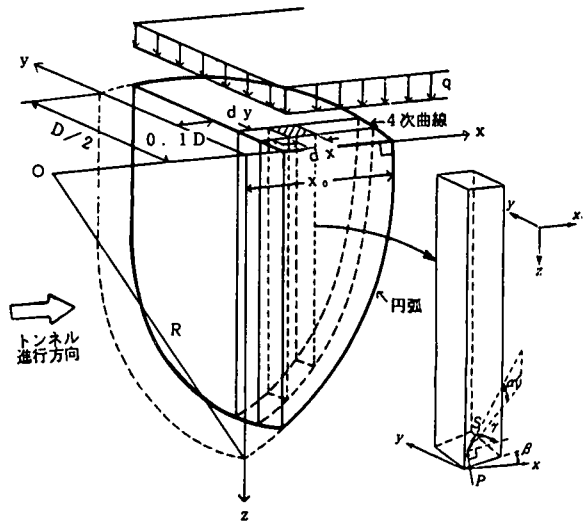


図-7 3次元解析モデル

各分割土柱の底面に垂直方向の釣合条件

$$(W + q \, dx \, dy) \cos \alpha = P \quad \dots (1)$$

各分割土柱の破壊条件式

$$F s = (P \tan \phi + c A) / S \quad \dots (2)$$

崩壊土塊全体のモーメントの釣合条件

$$\Sigma (W + q \, dx \, dy) \cdot R \sin \beta = \Sigma R \cdot S \cos \gamma \quad \dots (3)$$

の3つの式を連立させて次式により安全率 $F s$ を求めた。

$$F s = \frac{\Sigma R \cdot (c A + (W + q \, dx \, dy) \cos \alpha \tan \phi) \sin \beta / \sin \alpha}{\Sigma R \cdot (W + q \, dx \, dy) \sin \beta} \quad \dots (4)$$

ここに、 P ：分割土柱底面に作用する垂直力、 S ：分割土柱底面に作用するせん断力

W ：分割土柱の重量、 A ：分割土柱の底面積、 α ：底面中心における接平面と水平面のなす角度

β ：底面中心における接平面と xz 面との交線が x 軸となす角度、

γ ：底面中心における法線を含み xy 平面に垂直な平面と接平面との交線が底面中心における接平面と xz 面との交線となす角度 ($= \cos^{-1}(\sin \beta / \sin \alpha)$)

c, ϕ ：地盤の強度定数

また、 q はトンネル天端を通る切羽前方の水平面に作用する土圧で次式で示されるTerzaghiの緩み荷重とし、次式中 K は1.0、想定される緩み幅 B はこれまでの実験結果を参考に $B = 0.7 \sim 1.0D$ で与えた。

$$q = B (\gamma - 2c/B) \cdot \{1 - \exp(-2 \cdot H \cdot K \cdot \tan \phi / B)\} / (2 \cdot K \cdot \tan \phi) \quad \dots (5)$$

$F s$ の計算に当たっては、崩壊面の位置 x_0 を変化させ、繰り返し計算により求まる最小安全率の値を $F s$ とした。

2) 2次元解析モデル

2次元解析は、3次元解析で用いた簡便法を2次元に縮小した方法とシールドトンネルの切羽安定計算に用いられる村山の式²⁾と同様に切羽の崩壊形状を対数螺旋線で近似した方法(対数螺旋線法)の2通りの方法により実施した。

対数螺旋線法は図-8に示すようにトンネル天端を通る水平面より上部の土塊については簡便法と同様にTerzaghiの緩み荷重で置き換え、下部の崩壊土塊についてはトンネル下端部に端を発する滑り面を次式で近似し、

$$r = r_0 \cdot \exp(\theta \tan \phi) \quad \dots (6)$$

崩壊土塊の滑りに対する安全率 F_s をO点に対する土塊全体のモーメントの釣合条件から次式により求め、

$$F_s = \frac{\int_{r_0}^{r_b} r \cdot c \cdot \cos \phi \, ds}{W \cdot l_w + q \cdot l_q \cdot (l_s + l_q / 2)} \quad \dots (7)$$

ここに、 W : 崩壊土塊の重量、 l_w : 点Oから W までの距離、 l_s : 点Oから切羽までの距離

l_q : 切羽から崩壊領域先端までの距離、 ds : 滑り面の微小長さ

O点の位置を変化させたときの最小安全率を繰り返し計算により求めた。

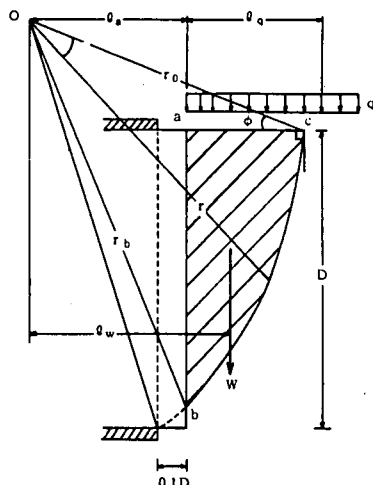


図-8 2次元解析モデル(対数螺旋線法)

(2) 解析結果

1) 解析方法の比較

表-2は標準砂、土被り比が2の場合について、2次元解析および3次元解析を行って最小安全率が1となる時の粘着力の大きさ(切羽の安定に必要な粘着力)および崩壊が発生する滑り面の位置(天端の高さにおける切羽から滑り面までの距離)を求め、実験値との比較を行ったものである。ただし、内部摩擦角については強度試験から得られた値を用いた。

表-2 解析結果の比較(標準砂、 $H/D=2$)

	解析結果				実験結果	
	粘着力(gf/cm^2)		滑り面の位置		粘着力(gf/cm^2)	滑り面の位置
	$B=0.7D$	$B=1.0D$	$B=0.7D$	$B=1.0D$		
2次元解析						
対数螺旋線法	67	80	0.37D	0.37D		
簡便法	67	79	0.35D	0.35D	58	0.21D
3次元解析	57	68	0.37D	0.37D		

2次元解析の簡便法と対数螺旋線法との比較では切羽の安定に必要な粘着力および滑り面の発生位置については明確な差は認められない。また、2次元解析から得られる切羽の安定に必要な粘着力は、Terzaghiの緩み荷重を与えるときの緩み幅を $0.7D$ とした場合においても実験値よりも2割程度大きな値を示しており、滑り面の位置についても実験値よりかなり大きな値を示している。一方、3次元解析と2次元解析の比較では、滑り面の発生位置については2次元解析と明確な差は認められないが、切羽の安定に必要な粘着力については2次元解析よりも15~20%程度小さな値を示しており、Terzaghiの緩み荷重を与えるときの緩み幅を $0.7D$ としたときの値は比較的实验値に近い値を示している。したがって、本解析方法から得られる滑り面の位置に関しては課題が残るものの、切羽の安定に必要な粘着力に関しては緩み荷重を与えるときの緩み幅を $0.7D$ とした3次元解析により実験値に比較的近い値が得られるものと考えられる。

2) 切羽安定評価指標としての $c/\gamma D$

図-9は、3次元解析による最小安全率が1となる時の粘着力 c の大きさを標準砂と相模砂について求め、 $c/\gamma D$ と H/D との関係について遠心力実験結果との比較を行ったものである。ただし、Terzaghiの緩み荷重を与えるときの緩み幅については上述したように標準砂、土被り比が2の場合の解析結果によれば $0.7D$ 与えたときに最も実験値に近い値が得られたが、ここでは安全側の値として $1.0D$ とした時の値も与えた。

解析においても土被り比が $c/\gamma D$ に及ぼす影響は実験結果と同様に今回対象とした土被り比が1程度以上の範囲であれば比較的小さく、標準砂については土被り比が大きい場合でも緩み幅を0.7Dとした時の解析結果は実験値に比較的近い値を示している。相模砂については実験では標準砂とほぼ同程度の値が得られているが、解析では内部摩擦角が標準砂よりも小さいことの影響を受けて標準砂よりも大きな $c/\gamma D$ が得られている。相模砂の場合は強度試験結果がばらついており、実験値の強度が低く評価されていることも考えられるが、この点についてはデータの蓄積を行って今後さらに検討を行っていききたい。

以上のように標準砂および相模砂を用いた模型実験では $c/\gamma D$ の値としてともに0.16程度の値がある場合に切羽が安定する結果が得られたが、解析から得られる切羽の安定に必要な $c/\gamma D$ は相模砂と標準砂では内部摩擦角の影響を受けてわずかであるが異なる。図-10は、解析から得られる切羽の安定に必要な $c/\gamma D$ の値を各内部摩擦角に対して示したものである。内部摩擦角の影響については今後の検討課題となるが、現場で切羽の安定を判断する一つの目安として $c/\gamma D$ を用いる場合、特に内部摩擦角が小さい場合には、安全側の値としてこのような各内部摩擦角に対して求めた値を用いた方がよいものと考えられる。

5. 結論

本研究では、トンネル掘削時における切羽の安定に関して遠心力载荷模型実験を行うとともに実験結果に対する切羽の安定解析を行った。本研究より得られた主要な結果をまとめると、以下のようになる。

(1) 切羽の安定に必要な地盤の粘着力 c はトンネル径 D の影響を受け、トンネル径が大きくなるにともない切羽の安定に必要な粘着力は大きくなる。一方、土被り比が1程度以上ある場合には切羽の安定性に及ぼす土被り比(土被り/トンネル径)の影響は比較的小さい。

(2) 模型実験結果によれば、湧水がない場合には無次元量 $c/\gamma D$ (γ は単位体積重量)が切羽の安定性を評価する一つの指標となり、 $c/\gamma D$ として0.13~0.16程度の値があれば切羽は安定する。ただし、切羽の安定に必要な $c/\gamma D$ は内部摩擦角の影響を受ける可能性が十分考えられるため、内部摩擦角が小さい地山に適用する場合にはこれらよりも高い値を考慮する必要がある。

(3) 簡便法を用いた切羽の安定解析結果によれば、3次元解析から得られる切羽の安定に必要な $c/\gamma D$ は2次元解析結果より15~20%程度小さな値を示し、緩み荷重を与えるときの緩み幅を0.7Dとした場合には比較的实验値に近い値が得られる。

6. 参考文献

- 1) 真下 英人・猪熊 明：トンネル切羽の安定性に関する研究、トンネル工学研究発表会論文・報告書 VOL. 4, pp323~328, 1994
- 2) 村山朔郎、遠藤正明、橋場友則：機械化シールドの掘進性能に関する土質力学的考察、第1回土質工学研究発表会、pp75~79, 1966

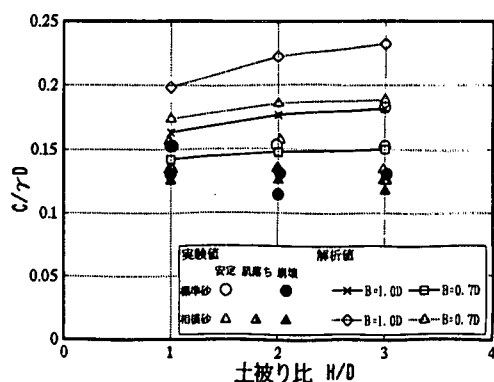


図-9 3次元解析結果と実験値の比較

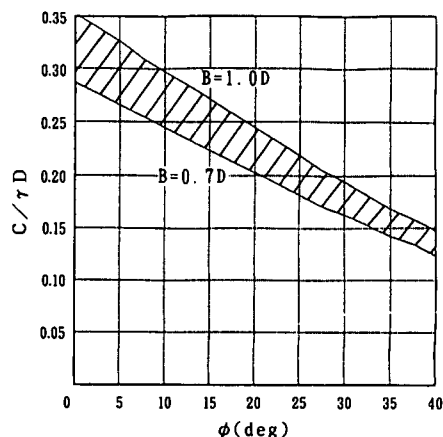


図-10 内部摩擦角と切羽安定に必要な $c/\gamma D$ との関係