

砂質地山トンネルの切羽の安定解析法

STABILITY ANALYSIS OF CUTTING FACE OF SHALLOW TUNNEL IN SANDY GROUND

福島 伸二*・香川 和夫**

Shinji FUKUSHIMA and Kazuo KAGAWA

Face stability is one of most important factors to excavate safely a shallow tunnel by NATM in a sandy ground. In this study, a series of model tests simulated the cutting face of tunnel was performed on unsaturated sand to investigate the failure mechanism of tunnel face in plane strain condition.

It was found the following from the test results.

- 1) The slip surface generated by face failure is straight plane in the vertical face, but a curved slip or circular arc in the inclined face. Hence, it is necessary to consider this failure modes to apply to the stability analysis.
- 2) Stability analysis using the limit equilibrium concept is more useful to evaluate the face stability of cutting face.

Keywords: face stability, sandy ground, shallow tunnel, NATM, model test

1. まえがき

最近都市部において土被りの浅い砂質地山中に NATM でトンネルを掘削する例が多くなってきた。このようなトンネルの地表には住宅・事務所等の構造物、また地中にもライフライン等の地中構造物があるのが普通である。トンネルを掘削する時にはこれらの地表・地中の構造物に悪影響を及ぼさないよう切羽を安定させて地表面沈下・地中変位を最小限に抑える必要がある。このため切羽の安定性を何らかの方法により評価することが重要である。切羽の安定性評価法として切羽部分を図-1 に示すように2次元の(平面ひずみ条件)にモデル化すれば通常の斜面安定などで採用される極限平衡法が適用できるものと考えられる¹⁾。その理由として以下のことが考えられる。

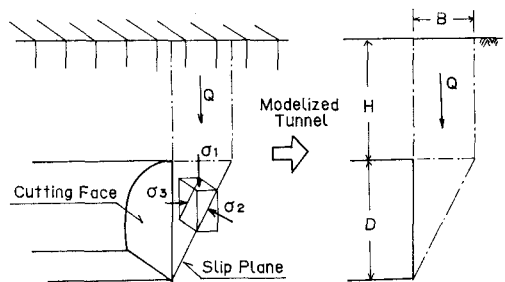


図-1 トンネル切羽部のモデル化
(平面ひずみ条件)

- (1) 都市部のトンネルの地山は多層地盤であっても連続性があり比較的一様である、適切な土質試験を実施すれば安定解析に必要な地山の強度パラメータ (c , ϕ) が求められる。
- (2) 地山各層の強度特性の違いは簡単に分割法により安定計算に考慮できる。

* 正会員 (株)フジタ 技術研究所土木研究部

** 正会員 (株)フジタ 土木本部技術部

本報告ではこのような土被りの浅い砂質地山トンネルの切羽部をモデル化した模型試験を実施し切羽の破壊特性（すべり面の発生状況、切羽面の傾斜の有無の影響）の調査とその試験結果の安定計算を実施し、円弧すべり面法などの安定計算法の適用性について調べた結果をまとめたものである。

2. 模型試験結果とその安定計算

使用した試験装置は2次元的にモデル化して切羽部を再現したもので、図-2に示す深さ600mm、幅200mm、長さ1000mmの土槽内に壁面を持つ地盤を作製しこの地盤の壁面側の法肩部に土被り荷重(Q)に相当する荷重を加えられるようにしたものである。壁面を持つ地盤は土槽底面にヒンジを持つ鋼板を切羽面の角度 β だけ傾けて土留め板として、不飽和状態にある豊浦砂（含水比 $w \approx 10\%$ ）を所定の密度（ $\rho_d \approx 1.53\text{g/cm}^3$, $\rho_e \approx 1.68\text{g/cm}^3$ ）を目標にして1層当たりの仕上り層厚が5cmになるよう

に合計10層をタンパーにより締め固めて作製した。そしてこの土留め鋼板は地盤作製後に取り除いた。この状態の模型地盤の強度は拘束圧 $\sigma_3 = 0.2, 0.5, 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ における排水（気）三軸圧縮試験により求め、見掛けの粘着力 $c \approx 0.03\text{kgf/cm}^2$ 、内部摩擦角 $\phi \approx 38.7^\circ$ を得ている。この時試料は不飽和状態にあるため供試体に作用している応力成分は全応力表示である。この土槽の前・後面は透明なアクリル板（厚さ20mm）からなっており、このアクリル板と地盤との間には摩擦除去のために厚さ0.1mmのゴムシートをシリコングリースにより張り付けてある。地盤の壁面側の端部に幅(B)の載荷板により切羽部に作用する土被り荷重(Q)に相当する荷重を載荷装置により変位一定（変位速度0.3mm/min）で加えた。

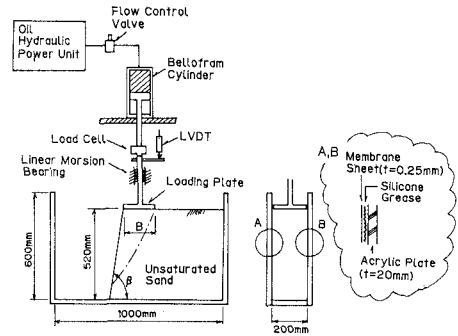


図-2 切羽の安定性に関する
模型試験装置

3. 試験結果

図-3に幅B=20cmの載荷板を用いて切羽面角度を $\beta = 90^\circ, 80^\circ, 85^\circ, 70^\circ$ と変えて実施した試験から得られた荷重(Q)～載荷板変位(δ)関係を示してある。ここで荷重Q (kgf/cm)は単位奥行当たりの値として表示してある。ま

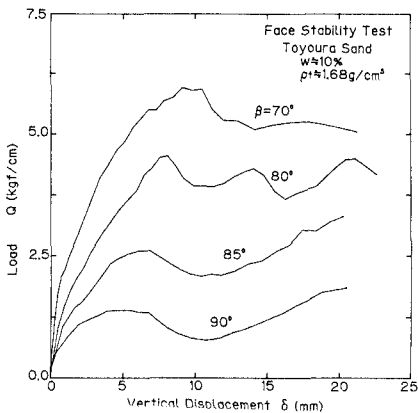


図-3 荷重～変位曲線

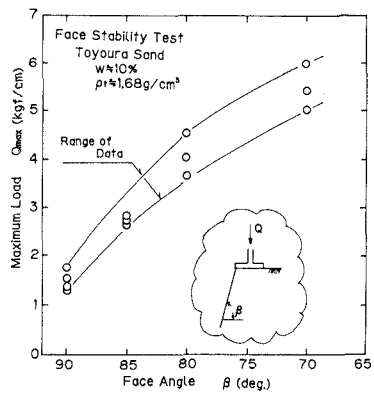


図-4 Q_{max} ～切羽傾斜角(β)

た図-4にこれらの荷重～変位曲線から読み取った最大荷重 Q_{max} を切羽面の傾斜角 β に対してプロットしてある。これらの図より切羽面を傾斜させるとより大きな荷重に地盤が耐えられること、つまりより大きな土被り荷重に切羽が耐えられることがわかる。このことから切羽を傾斜させて掘削すること（鏡部の押さえとして核を残す場合もこれに相当しよう）が切羽の安定性を得る上で有効であることが分かる。さらに試験後の地盤の変形状況（ $\delta = 20\text{mm}$ ）を写真撮影をしてゴムシートに付けたほぼ5cmx5cmの格子状の標点の座標値を読み取り、変位ベクトルと最大・最小主ひずみ（ ϵ_1 、 ϵ_3 ）の大きさと方向を傾斜角 $\beta = 90^\circ, 80^\circ$ の場合について求めたのが図-5(a)(b)である。これらの図から切羽の傾斜角により破壊モードが異なり、切

羽の安定計算をするには破壊モードの違いを考慮して鉛直切羽の場合には直線すべり面を仮定した方法で、傾斜切羽の場合には円弧すべり面を仮定した方法を採用するなど使い分ける必要があろう。

次に図-6 (a) (b)に示すように鉛直切羽面では直線すべり面を仮定し、また傾斜切羽面では円弧すべり面を仮定した分割法 (Bishop法、簡便法) により土槽の模型地山の安定計算を行ない地山に加えられる荷重 (支持力) を求め、安定計算法の検討を行なう。先ず模型試験における荷重 Q は直線すべり面法では次式で与えられる。

$$Q = (c \cdot l + W \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi - W \cdot \sin \alpha) / (\sin \alpha - \cos \alpha \cdot \tan \phi) \quad (1)$$

また円弧すべり面の分割法 (Bishop 法 (静定化仮定 $\Delta V=0$)) による荷重は以下のように求める。分割片に作用する力の多角形についての鉛直方向の力のつり合いから $\Delta W + \Delta Q = \Delta N \cdot \cos \alpha + \Delta T \cdot \sin \alpha$ となり、

$$\Delta N = (\Delta W + \Delta Q) / \cos \alpha - \Delta T \cdot \tan \alpha \quad (2)$$

$$\Delta T = \tau_r \cdot \Delta s = (c + \sigma_n \cdot \tan \phi) \cdot \Delta s = c \Delta s + \Delta N \cdot \tan \phi \quad (3)$$

(2) (3) 式から分割片のすべり面上のせん断抵抗力 ΔT は

$$\Delta T = \{ c \cdot \Delta x + (\Delta W + \Delta Q) \cdot \tan \phi \} / \cos \alpha \cdot (1 + \tan \alpha \cdot \tan \phi) \quad (\text{a-b区間})$$

$$\Delta T = (c \cdot \Delta x + \Delta W \cdot \tan \phi) / \cos \alpha \cdot (1 + \tan \alpha \cdot \tan \phi) \quad (\text{b-c区間})$$

円の中心 O に関するモーメントのつり合いから荷重は次式から求める。

$$Q_B = \left[\sum_a^c (c \cdot \Delta x + \Delta W \cdot \tan \phi) / \cos \alpha (1 + \tan \alpha \cdot \tan \phi) - \sum_a^b \Delta W \cdot \sin \alpha \right] / \left[\sum_a^b \Delta x \cdot \sin \alpha / B - \sum_a^b (\Delta x / B) \cdot \tan \phi / \cos \alpha (1 + \tan \alpha \cdot \tan \phi) \right] \quad (4)$$

また円弧すべり面の分割法のうち簡便法 (静定化仮定 $\Delta V = \Delta H = 0$) による荷重 Q_F は

$$Q_F = \left[\sum_a^c (c \cdot \Delta s + \Delta W \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi) - \sum_a^b \Delta W \cdot \sin \alpha \right] / \left[\sum_a^b \Delta x \cdot \sin \alpha / B - \sum_a^b (\Delta x / B) \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi \right] \quad (5)$$

となる。計算結果を図-7 (a) (b)に示す。図中の斜線部は模型試験の結果である (模型地山の強度パラメータは $C=0.03 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi=38.7^\circ$)。図-7 (a) は粘着力 $C=0.03, 0.05 \text{ kgf/cm}^2$ の場合を示している。切羽角度が鉛直 $\beta=90^\circ$ に近い範囲では試験結果と

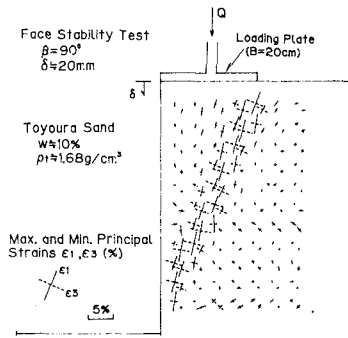


図-5 (a) 最大・最小主ひずみ ($\beta=90^\circ$)

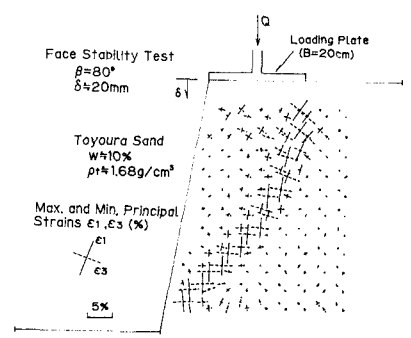


図-5 (b) 最大・最小主ひずみ ($\beta=80^\circ$)

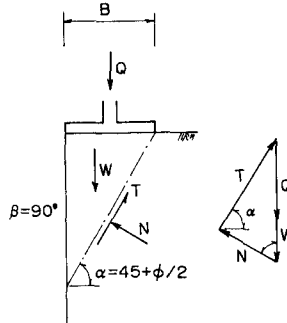


図-6 (a) 安定計算 (直線すべり面)

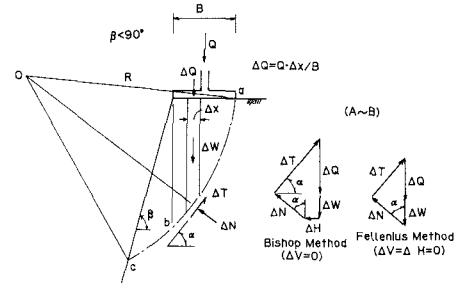


図-6 (b) 安定計算 (円弧すべり面)

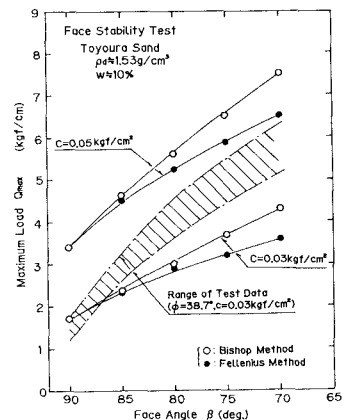


図-7 (a) 安定計算結果 (粘着力の影響)

よい一致を示している。計算値は切羽角度が小さくなると一致度は悪くなるが、試験結果の角度～荷重関係の傾向をよくとらえていることがわかる。また簡便法よりBishop法による計算値の方が大きいこと、わずかな粘着力の差により計算値が大きく変わることが分かる。図-7 (b) には内部摩擦角の影響を示しているが、粘着力に比べて内部摩擦角の影響は小さいことがわかる。これらのことから切羽の安定計算は切羽の傾斜角による破壊モードを考慮した直線すべり面法（鉛直切羽）と円弧すべり面法（傾斜切羽）が有効であることがわかる。

4. 切羽の安定解析法

以上の結果から切羽の安定計算として直線すべり面法と円弧すべり面法が十分な合理性を有していることがわかったので、ここでは一様な地山からなるトンネル切羽の安定性評価法として直線すべり面法と円弧すべり面法による安定解析法について述べる。

（直線すべり面法：鉛直切羽）

図-8 (a) に示すような切羽下端を通る傾き α ($=45^\circ + \phi/2$) の直線すべり面を仮定する。安定性を3.と同様にこのすべり面とトンネル天端部を通る水平面とがなす切羽の三角形(abc) について考えると安全率は次式で与えられる。

$$F_s = \{c \cdot D + (Q+W) \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi\} / (Q+W) (\sin \alpha)^2 \quad (4)$$

（円弧すべり面法切羽：傾斜・鉛直切羽）

図-8 (b) に示すような切羽下端を円弧すべり面を仮定し、安定性はこのすべり面とトンネル天端部を通る水平面とがなす切羽部(abcd)を分割して考えるものとする。この分割片に作用する力は地山荷重 ($\Delta Q = (Q/B) \cdot \Delta x$)、自重 (ΔW) とすべり面上に作用する垂直力 (ΔN) とせん断抵抗力 (ΔT)、そして側面の鉛直・水平不静定内力 ΔV と ΔH である。3.と同様な手順により安全率を求めると以下ようになる。

1) Bishop 法

$$F_s = \left\{ \sum_a^b \{ c \cdot \Delta s \cdot \cos \alpha + (\Delta Q + \Delta W) \cdot \tan \phi \} / \{ \cos \alpha + (1/F_s) \cdot \tan \phi \cdot \sin \alpha \} + \sum_b^c \{ c \cdot \Delta s \cdot \cos \alpha + \Delta W \cdot \tan \phi \} / \{ \cos \alpha + (1/F_s) \cdot \tan \phi \cdot \sin \alpha \} \right\} / \left[\sum_a^b (\Delta Q + \Delta W) \cdot R \cdot \sin \alpha + \sum_b^c (\Delta W \cdot R \cdot \sin \alpha) \right] \quad (5)$$

2) 簡便法(Fellenius法)

$$F_s = \left\{ \sum_a^b \{ c \cdot \Delta s + (\Delta W + \Delta Q) \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi \} + \sum_b^c \{ c \cdot \Delta s + (\Delta W + \Delta Q) \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi \} \right\} / \left[\sum_a^b (\Delta Q + \Delta W) \cdot R \cdot \sin \alpha + \sum_b^c (\Delta W \cdot R \cdot \sin \alpha) \right] \quad (6)$$

すべり円の中心を変えて繰返し計算を実施して最小の安全率を捜す。

（切羽上端面に作用する土被り荷重）

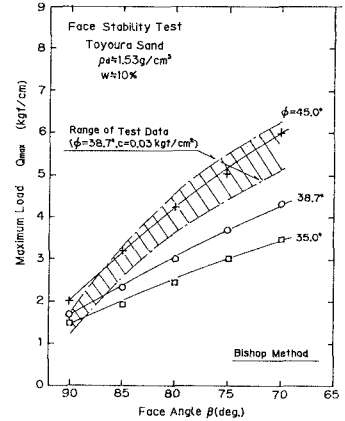


図-7 (b) 安定計算結果
（内部摩擦角の影響）

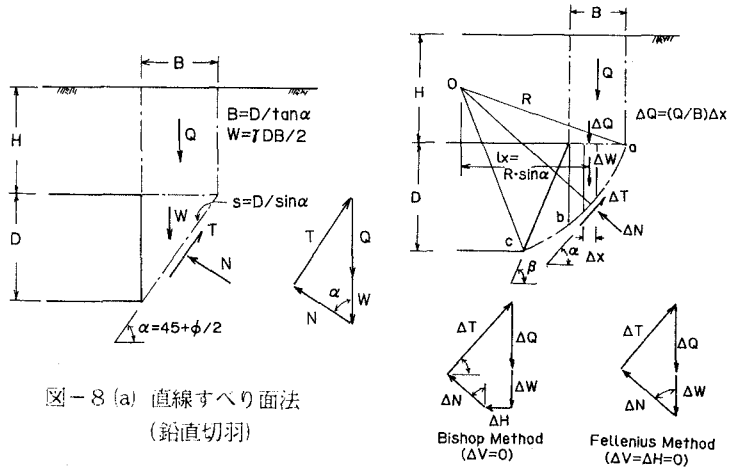


図-8 (b) 円弧すべり面法
（鉛直・傾斜切羽）

切羽上端面に作用する土被り荷重を以下の2法により計算する。

1) Terzaghiの式

これは切羽上部に幅Bの領域の地山が沈下する時に、この沈下する地山の自重の一部が両端のせん断面から周辺の地山に伝達されるとして導かれたものである。

$Q_T = (\gamma_c - 2 \cdot c_c / B) \cdot B^2 \cdot \{1 - \exp(-2 \cdot K \cdot H \cdot \tan \phi_c / B)\} / (2 \cdot K \cdot \tan \phi_c)$
 この式は地山の変形が地表面まで及ぶような場合を対象としているので、土被りが浅い場合には適用できるが、粘着力が存在する場合には土被りが深くなると計算値が負になるなど不合理な面がある。

2) ゆるみ領域法

図-9に概念的に示すように、土被りが深くなると掘削により地山内にグラウンドアーチが形成されやすくこれより上の地山部分は地山自身で支えられるが、下にできるゆるみ領域部分の地山が土被り荷重として作用するものと考えられる。そこでゆるみ領域を簡単のため切羽上部の両端(A,B)でそれぞれ傾きが $\tan \alpha$ ($\alpha = 45 + \phi_c / 2$)、 $-\tan \alpha$ となる二次曲線で与える。これはグラウンドアーチの支点部に相当するゆるみ領域の両端部では最大主応力方向が鉛直方向になるものと考えられるので、この部分の破壊面は最大主応力方向に対して角度 α の方向に発生するとしていることになる。この二次曲線はA点を原点とすれば $y = (\tan \alpha / B) \cdot (B \cdot x - x^2)$ で与えられる。そして土被り荷重となるゆるみ領域内の地山の重さは次式で与えられる。

$$Q_L = \gamma_c \cdot \int y dx = \gamma_c \cdot \tan \alpha \cdot B^2 / 6$$

ここではこれらのTerzaghiの式による Q_T とゆるみ領域法による Q_L を計算し、そのうち大きい方を土被り荷重(Q)とする。

$$Q = [Q_T, Q_L]_{\max} \tag{9}$$

5. 各安定計算法の比較

図-10に地山の土質パラメータを図中にしめたように与えたモデル切羽について5. で述べた土被り荷重 $Q = [Q_T, Q_L]_{\max}$ を加えた場合の安定計算結果を比較してある。この図から粘着力が小さい領域においてはBishop法による安全率が最も大きな値を与え、例えば $C < 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ では粘着力の影響を受けなくなり $C = 0.0 \text{ kgf/cm}^2$ でも $F_s = 0.9$ 程度であることがわかる。これは不静定内力を考慮しているためと考えられるが、粘着力の影響がなくなるというのは砂質土のように小さい粘着力について切羽の安定性を議論する場合に問題があるのではないだろうか。また簡便法と直線すべり面法は鉛直切羽でも直線すべり面法と簡便法による円弧すべり面法は全体的によい一致を示していることがわかる。以下ここでは粘着力が小さい領域で安全率が粘着力に依存した形をとり、かつ鉛直あるいは傾斜地山にも適用できる円弧すべり面法のうち簡便法により切羽の安定解析を行うことにする。

図-11(a)(b)に切羽の安定性に及ぼす内部摩擦角と切羽面の傾斜角(β)の影響を示してある。この図より内部摩擦角の影響は粘着力の影響に比較して小さいことが分かる。これは切羽付近の拘束圧が掘削による地山のとり除かれるため非常に低い状態になるためと考えられる。このことは砂質地山のトンネルの切羽の安定を評価する時には地山の強度特性のうち特に粘着力が重要であることを示している。粘着力の小さい

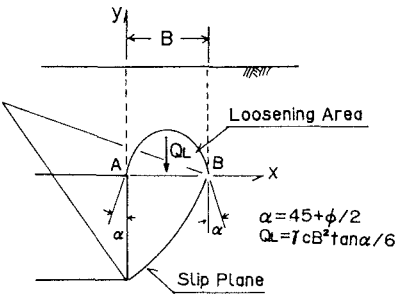


図-9 土被り荷重の計算 (ゆるみ領域法)

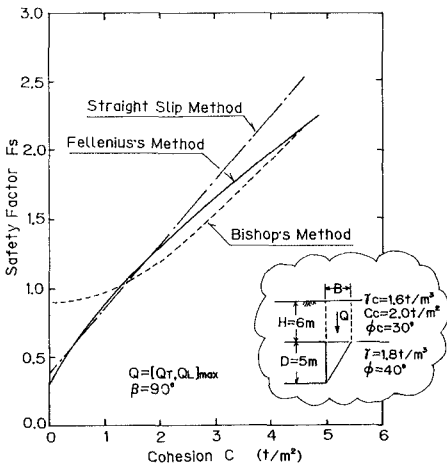


図-10 安定計算法の比較

未固結な砂質地山であることが多い都市NATMトンネルでは、土被りも浅く対象となる拘束圧領域も低いので、この領域における砂質土の粘着力を正確に求めることのできる土質試験法の確立が必要であろう。

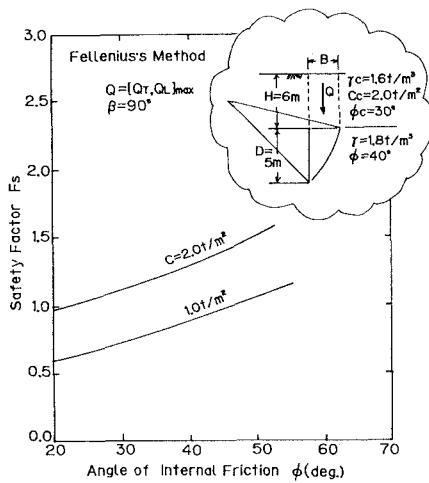


図-1 1 (a) 内部摩擦角の影響

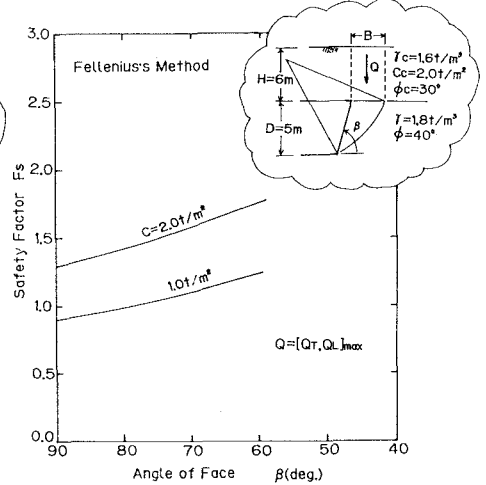


図-1 1 (b) 切羽傾斜角の影響

6. あとがき

土被りの浅い砂質地山トンネルの切羽の安定解析法の妥当性を検討するために実施した模型試験と、この模型試験の安定計算を行ったところ以下のことがわかった。

- 1) 切羽の破壊はその傾斜角により破壊モードが異なり、鉛直切羽の場合には直線すべり面、あるいは傾斜切羽の場合には円弧すべり面に近い形状をしている。したがって切羽の安定計算をする時にはこの違いを考慮した方法を採用すべきである。
- 2) 模型試験における切羽の安定解析結果によると直線すべり面（鉛直切羽）と分割法による円弧すべり面（傾斜切羽）を用いた方法が有効である。
- 3) 切羽の安定計算法のうち切羽の傾斜の有無に関係なく適用できる円弧すべり面法の中の簡便法が実用的である。
- 4) 切羽の安定性には地山強度は重要な要因であるが、この地山強度（内部摩擦角と粘着力）のうち内部摩擦角よりも粘着力がより重要である。これは掘削により地山が取り除かれ切羽付近の拘束圧が非常に低い状態になり、地山安定に寄与する粘着力成分の割合が相対的に高くなるためである。
- 5) 都市NATMトンネルでは、粘着力の小さい未固結な砂質地山である場合が多く、また土被りも浅いので対象となる切羽付近の拘束圧領域も低い。このため信頼性の高い切羽の安定性の評価には低拘束圧領域における砂質土の粘着力を正確に求めることのできる土質試験法の確立が必要である。

参考文献

- 1) 福島伸二・川畑則雄・熊谷光雄・増田幸三：土被りの浅い軟弱地山トンネルにおける切羽安定化のための薬液注入の効果、土と基礎、Vol. 38, No. 12, pp47-52, 1990.