

切羽安定化のための鏡ボルトの効果

THE EFFECT OF FACEBOLT ON FACE STABILITY

池口正晃¹⁾, 真下英人¹⁾

Masaaki IKEGUCHI, Hideto MASHIMO

When tunnels are excavated under bad condition, auxiliary methods such as forepoling, face bolt, shotcrete are often used to keep the tunnel face stable. To use the auxiliary methods appropriately, it is necessary to clarify the mechanism of its effect and to evaluate its effect correctly.

In this paper, centrifugal model tests and three-dimensional Finite Element Method were carried out to verify the effect of face bolt for the tunnel face stability and to investigate the influence of face bolt length and position on the face stability.

Key Words : auxiliary method, face stability, face bolt, centrifugal model test, 3-D FEM

1. はじめに

道路トンネル建設の需要の増大, 利用者のニーズの多様化に伴い, 都市部等の軟弱地盤における建設や, サービスレベル向上のための断面拡大化など, 今までではあまり例のないトンネルの建設が求められており, その結果, 切羽が安定しない条件におけるトンネル建設が必然的に増加してきている. 切羽が自立しない場合は, 自立させるための安定対策工等の補助工法が必要であるが, 対策工を適切に設計するには, 補助工法の効果, 補助工法が効果的とされる地山条件, また地山の変形を抑制するメカニズムの解明が必要である.

本研究では, 鏡ボルトが切羽に与える安定性の効果を検証するために, 遠心力載荷模型実験と弾性 FEM モデルによる数値解析を行った. 模型実験では, 遠心力載荷装置による遠心加速度を切羽模型の土槽に加えることによって, 地山内に実物大スケールの応力を発生させて切羽崩壊を起こし, 鏡ボルトの有無, ボルト長, ボルト設置位置の条件と崩壊状態との関係を比較した. 数値解析では, 遠心力模型実験をモデルとして解析を行い, 地山の安定度を Mohr-Coulomb の降伏条件から定まる降伏曲面に対する応力の破壊接近度で評価し, 実験における切羽の崩壊形状と, 解析結果とを比較した.

2. 模型実験

(1) 実験方法

図-1 に実験土槽の概要を示す. 実験土槽は, 内寸 $140 \times 500 \times 400(\text{mm})$ の鋼材で作られた土槽で, 全面には透明なアクリル板がボルトによって取り付けられている. 土槽内には, アクリル製の覆工モデルと切羽を押さえる半円形の押さえ板からなる直径 $D=80\text{mm}$ のトンネル模型が設置されている. 押さえ板は, 電動

を押さえる半円形を押さえ板からなる直径 $D=80\text{mm}$ のトンネル模型が設置されている。押さえ板は、電動モータによって内空方向に後退する機能を持っており、後退させることによって掘進長 $0.1D$ の掘削を模擬することができる。

土槽中の地山材料は、豊浦標準砂を使用して、土被り比は $H/D=1$ とした。標準砂の物性値を表-1に示す。作成方法は、目標とする含水比に調整した地山試料を、深さ方向 2cm ごとに人力によって転圧しながら1層づつ積み重ねていった。また均一な単位体積重量とする管理の方法として、深さ 2cm 分に相当する試料重量を算定し、それを深さ 2cm になるまで転圧した。

鏡ボルトの設置位置を図-2に示す。鏡ボルトの設置方法は、ボルトの設置箇所が模型地山試料を積み上げていくときの層の境界部分に相当するので、地山試料を積み上げる段階で所定の位置にボルトを順次設置していった。鏡ボルト模型は $\phi 1.2\text{mm}$ のリン青銅棒を使用し、鏡ボルトと地山材料の摩擦力を増加させるために、あらかじめ鏡ボルトの表面に砂を接着させた。

実験ケースは、ボルトの長さや打設位置をパラメータとして条件を決定し、ボルトの長さを $0.25D$, $0.5D$, $1D$, $1.5D$ の4種類、また各長さについて打設位置を全断面、上半断面、下半断面と3種類変化させた。表-2に各実験ケースのボルトの条件を示す。ただし「全断面」の場合は図-2に示したボルト位置の全箇所、10本、「上半断面」の場合は上半部のみに5本、「下半断面」の場合は下半部のみに5本打設している。

また本実験は、鏡ボルトが埋め込まれた模型地山を遠心力载荷し、重力加速度の25倍(25G)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。

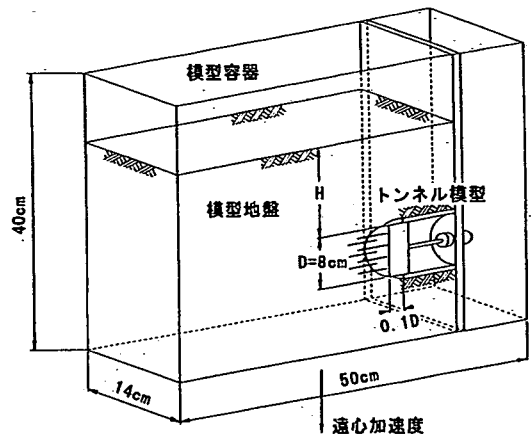


図-1 実験装置

表-1 模型地山の物性値

単位体積重量 γ (gf/cm ³)	1.54
含水比 $w(\%)$	6.5
粘着力 $c(\text{gf/cm}^2)$	47
内部摩擦角 $\phi(\text{degree})$	34.5

表-2 実験ケース

		打設位置			
		無対策	全断面	上半のみ	下半のみ
打設長	無対策	○			
	0.5D		○		
	1D		○	○	○
	2D		○		

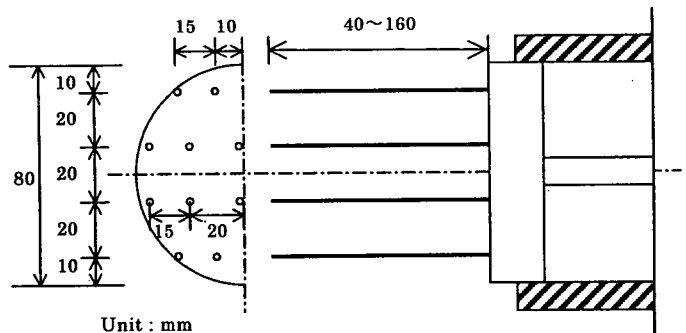


図-2 鏡ボルトの設置位置

(2) 実験結果

図－3に遠心力実験における鏡ボルトの打設長別の切羽崩壊状況を、図－4に実験における鏡ボルトの打設位置別の切羽崩壊状況を示す。

まず、鏡ボルトを設置しない場合の切羽の崩壊形状については、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、切羽の崩壊が発生している領域は切羽前方 $0.2D$ から $0.3D$ 程度であることがわかる。

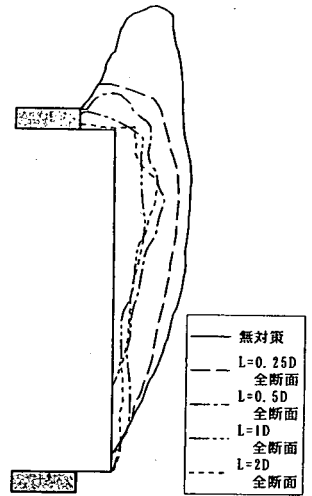
図－3における鏡ボルトを設置した場合の、切羽の安定に必要なボルトの長さの影響については、ボルトの長さが $0.25D$ の場合は天端より上方の崩壊高さが若干低くなる効果は認められたものの、切羽の安定性に対する顕著な効果が認められないが、 $0.5D$ 以上打設したケースにおいては、天端上方に発生するドーム状の滑りが発生しなくなり、格段に切羽崩壊時の土量が押さえられ、切羽の安定性が向上する。よって全断面に打設する場合は、 $0.5D$ 程度の長さ以上のボルトを切羽から前方に打設すれば、切羽の崩壊を最小限に押さえる効果が認められるが、 $0.5D$ 以上あればボルトの長さを長くしてもあまり効果の向上は期待できないことがわかる。 $0.25D$ の打設長のケースにおいても対策工がないケースとほぼ同様な切羽崩壊が起こるのは、前述の通り対策工がない場合には切羽前方 $0.2D \sim 0.3D$ 程度までの範囲におよぶ滑りが発生しており、ボルト長が $0.25D$ の場合には鏡ボルトが効果を発揮するために必要な定着長が確保できないことが考えられる。

図－4における、鏡ボルトの打設位置が切羽の安定効果におよぼす影響については、打設位置によって大きく異なり、下半断面に打設した場合は、下半部において若干の安定効果が認められるものの、打設しない場合と同様に天端の上方に至るドーム状の滑りが発生し、トンネル切羽の崩壊を抑制する効果は認められない。一方、上半断面に打設した場合は、下半部に滑りが発生するものの天端より上方に至る大きなドーム状の滑りは発生しなくなる。これは、上半断面に打設した場合は下半部に発生する滑りの発展を上半断面のボルトが抑制するのに対して、下半断面に打設した場合は下半部に発生していた滑りの抑制効果は期待できるものの、ボルトがない上半断面の下端を始点とする新たなドーム状の滑りが発生し、トンネル天端よりも上方に至る崩壊が発生するためと考えられる。よって実際の施工において鏡ボルトを切羽の全断面に設置する場合、下半からではなく、上半から設置を開始する方が設置中の天端崩落の危険性が少なくなることから、切羽の安定化に効果的であることが考えられる。

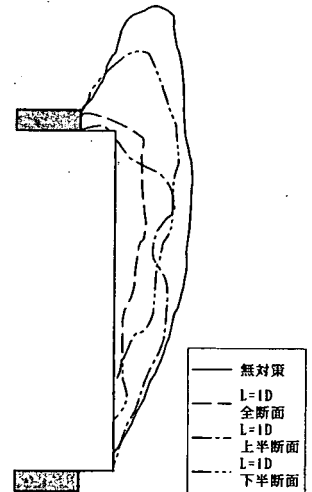
3 数値解析

(1) 解析方法

三次元弾性有限要素法の数値解析によって模型実験の検証を行った。解析領域は、土被り $H=1D$ とした



図－3 鏡ボルトの打設長別
崩壊形状（実験）



図－4 鏡ボルトの打設位置別
崩壊形状（実験）

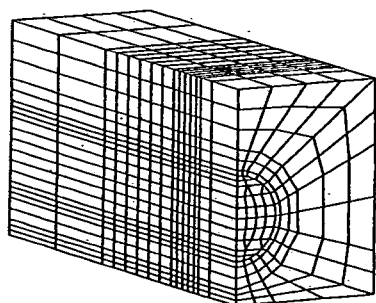


図-5 解析領域

表-3 解析時の物性値

地山 (標準砂)	弾性係数 $E(\text{gf/cm}^2)$	2.0×10^5
	ポアソン比 ν	0.3
	単位体積重量 $\gamma(\text{gf/cm}^3)$	38.25
	粘着力 $c(\text{gf/cm}^2)$	47.0
	内部摩擦角 $\phi(\text{degree})$	34.5
	側圧係数 k_x, k_z	0.429
鏡ボルト	弾性係数 $E(\text{gf/cm}^2)$	1.2×10^9
	断面積 $A(\text{cm}^2)$	1.13×10^{-2}

実験土槽内の模型地山を再現するため、図-5に示すとおり模型と同じ形状(140×500×400(mm))の直方体とし、断面の接点数を381、奥行き方向の分割数を15、全体の節点数8091、要素数1740とした。解析時に入力する物性値を表-3に示す。ただし、遠心力実験はある一定の遠心加速度を土槽の鉛直方向に付加させるので、解析に用いる単位体積重量には、表-1に示す本来の模型材料の単位体積重量に(遠心加速度/重力加速度)=25を乗じた値を適用している。解析ステップ数は2とし、STEP1では初期応力解析を行い、STEP2では鏡ボルトを模型実験のときに配置した通りに入力して、0.1Dを掘削した。

切羽の安定性を評価する方法としては、Mohr-Coulombの降伏条件から定まる降伏曲面に対する応力の破壊接近度を用いた。破壊接近度が1より小さい($R_f < 1$)場合は地山の応力状態が降伏曲面と交わっていない状態であり、1より大きい($R_f \geq 1$)場合は降伏曲面と交わり、塑性化が起こる状態である。よってここでは、 $R_f \geq 1$ の領域を崩壊の危険性が高い領域(以下崩壊領域と呼ぶ)であると考え、鏡ボルトの打設長または打設位置という実験パラメータによって変化する、崩壊領域の分布と遠心力模型実験による崩壊形状の変化の傾向に着目することによって、両者の結果から鏡ボルトが切羽に与える安定性の向上について論じることにした。

(2) 解析結果

図-6に、解析から得られた鏡ボルトにおける、打設長別の破壊接近度 $R_f=1$ のコンターラインを、図-7に設置位置別の $R_f=1$ のコンターラインを示す。

まず、鏡ボルトを設置しない場合の $R_f=1$ のコンターラインについては、S.L.付近が最も切羽奥まで進行し、天端または底盤へいくにつれてコンターライン位置の深度が浅くなっていて、ほぼS.L.を軸とする線対称形である。この形状は実験結果における崩壊形態とは異なり、滑り面の傾斜が緩やかで切羽の奥深くまで入っており、かつ天端より高い位置におけるドーム状の崩壊も見られない。

図-6の鏡ボルト長の影響については、鏡ボルトの打設長が0.5D以上の場合は、 $R_f=1$ のコンターラインが大きく手前にシフトして崩壊領域が減少して大きな抑制効果があるが、打設長をそれ以上の長さにしても、コンターラインの位置は大きく変化はせず、抑制効果は大きくならないこと、また0.25Dの場合は $R_f=1$ のコンターラインが無対策の時とほとんど変わらないため、切羽崩壊に対する抑制効果がほとんど変化しないことから、ほぼ模型実験と同様の結果が得られたといえる。また、無対策での切羽面から $R_f=1$ のコンターラインまでの距離は最大で約32mmであり、鏡ボルトの打設長は、0.25Dが20mm、0.5Dで40mmであることから、鏡ボルトが地山の $R_f=1$ に相当する部分まで挿入されているかどうかが大きく影響していることが見受けられた。実験結果においても、定着長が確保されているかどうかは鏡ボルトの効果の程度に影響を与えることが考察されたことも考慮すると、上記の解析結果から、切羽面を押し出そうとする力に対し

て鏡ボルトが抵抗して切羽面を安定させる場合には、その地山に適合する定着長を確保することが重要であるといえる。

図-7の鏡ボルト設置位置の影響については、下半断面のみを設置した場合、下半部分の $Rf=1$ のコンターラインが切羽奥から手前にシフトし、また上半断面のみを設置した場合も同様に、上半部分のラインがシフトし、鏡ボルトを設置している箇所のみにおける崩壊領域は減少する。模型実験においても、設置した箇所のみにおける切羽面の安定性は向上するので、その点では模型実験と同様である。しかし上半断面のみと下半断面のみのケースで切羽安定性を比較した場合、数値解析では、両ケースの $Rf=1$ のコンターラインが S.L. に対して線対称の形状であるように、崩壊領域の面積がほぼ同じであり、すなわち両ケースは同等程度の抑制効果があると評価されるが、前述の通り実際の模型実験では、下半断面のみ設置のときに、天端上方に崩壊が発生し、切羽全体の安定性を考慮すると、下半のみのケースの方が切羽は不安定となる。今回の解析手法では、地山を連続的なソリッド要素としている等、モデルの上で切羽面の滑り等の崩壊現象を表現できないことが両結果の相違の要因であると考えられるが、下半断面のみに鏡ボルトを設置したときの安定効果を評価する際には、模型実験の結果を考慮した上で注意が必要である。

なお、図-8、図-9に、解析によって得られた切羽面における縦断方向の変位量、すなわち地山が内空へ押し出す変位量を示す。この図から、鏡ボルトを設置した箇所で無対策時と比較して変位が抑制され、その抑制の程度は鏡ボルトの打設長が長いほど大きく、一方で崩壊領域にみられた 0.5D 以上打設しても変化しないという傾向とは異なること、同じ長さの鏡ボ

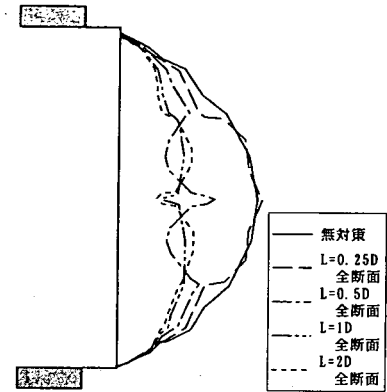


図-6 鏡ボルトの打設長別
崩壊形状 (解析)

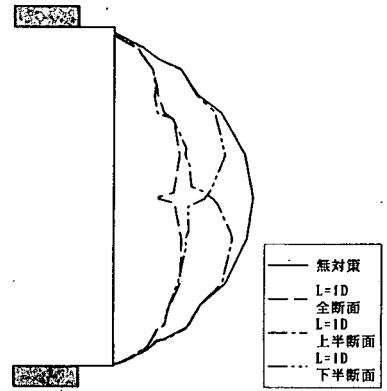


図-7 鏡ボルトの打設位置別
崩壊形状 (解析)

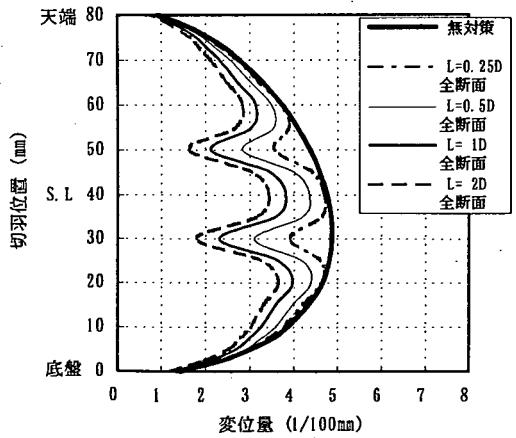


図-8 鏡ボルトの打設長別
切羽面押し変位量 (解析)

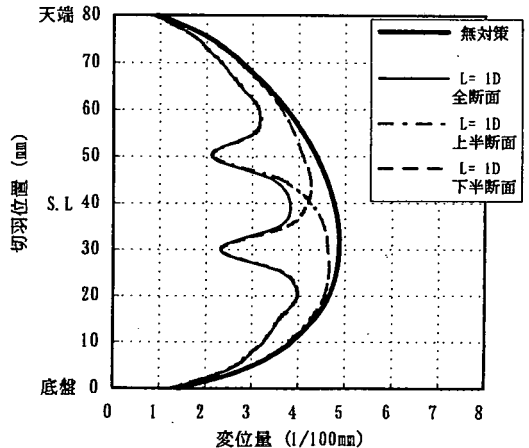


図-9 鏡ボルトの打設位置別
切羽面押し変位量 (解析)

トを設置した場合、ボルトを全断面に設置しても一部の断面に設置しても、ボルトを設置した箇所の変位量は同じであることから、上半に設置した鏡ボルトは下半の変位抑制にほとんど効果がなく、同様に下半に設置した鏡ボルトも上半の変位抑制に効果がないことがわかる。

4. 結 論

以上の鏡ボルトの効果に関する遠心力裁荷模型実験、および弾性 FEM モデルによる解析結果から、以下のことがわかった。

- (1) 鏡ボルトを設置しない場合の切羽の崩壊形状については、模型実験では切羽底盤に近い位置に端を発生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する。これに対して FEM の弾性解析結果を用いて、切羽前方地山の崩壊領域を、Mohr-Coulomb の降伏条件から定まる降伏曲面に対する破壊接近度が 1 より大きい領域により評価した場合は、下半断面については、模型実験結果よりもやや切羽の奥深くまで崩壊領域が広がるものの、比較的模型実験と近い崩壊形状となるが、上半断面については、模型実験のような天端上方に至るドーム状の崩壊形状は再現できない。
- (2) 鏡ボルトの打設長と切羽の安定性の関係については、模型実験、数値解析ともに、ボルト長が $0.25D$ (D : トンネル径) の場合は切羽崩壊に対する抑制効果がほとんど現れないのに対し、 $0.5D$ 以上の場合は抑制効果が見られ、また打設長が $0.5D$ 以上長くしても切羽崩壊の抑制効果の程度は変わらない。無対策時には切羽前方 $0.2 \sim 0.3D$ の位置まで切羽が崩壊することから、切羽面を安定させるためには、無対策時の崩壊領域よりも深い領域まで鏡ボルトを挿入し、定着長を確保することが重要である。
- (3) 鏡ボルトの打設位置と切羽の安定性の関係については、上半断面または下半断面に設置した場合、実験および解析結果ともに、ボルトを設置した切羽の箇所においては安定効果が見られ、さらに実験では、上半断面のみに設置した場合でも天端上方に発生するドーム状の崩壊の抑制効果が見られた。したがって鏡ボルトを切羽の全断面に設置する場合においても、下半からではなく、上半から設置する方が、作業中の天端崩落の危険性が少なくなり、切羽の安定化に効果的であるといえる。

5. おわりに

今回は補助工法の種類を鏡ボルトに限定したが、今後も鏡ボルトはもとより、鏡吹付けコンクリート等の切羽安定工や天端安定工が地山に与える効果についても、模型実験等で解明していく予定である。