

切羽補強工法の先行変位抑制効果 に関する解析的検討

Numerical Estimation for Stabilizing Effect of
Facebolts against Tunnel-drive-induced deformation

横田泰宏¹・李済宇¹・伊達健介¹・山本拓治¹・畝田篤志²

Yasuhiro Yokota, Jeawoo Lee, Kensuke Date, Takuji Yamamoto and Atsushi Uneda

¹正会員 鹿島建設(株) 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

E-mail:yokotaya@kajima.com

²正会員 鹿島建設(株) 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

Although the application of face bolts, which are supposed to ensure tunnel stability during an excavation in poor rocks, has been gradually expanded in Japan on these days, the assessment of their reinforcing effect has been mostly relied on three-dimensional analysis that may lead to excessive time and effort consuming so far. The authors have focused attention to a rather simple estimating procedure for reinforcing effect of facebolts in the two-dimensional numerical model by the employment of the load relaxation factor. For the proper estimation, a set of ground reaction curves reflecting various conditions of a tunnel in extremely poor rock mass have been obtained based on three-dimensional analyses. This paper presents a quantitative estimation of reinforcing effect of facebolts against a horse-shape tunnel regarding variation of overburden, length of facebolts, and length of lapped portion.

Key Words : Facebolts, 3D numerical analysis, ground reaction curve, overburden

1. はじめに

近年、都市部の低土被り地帯においても、主に山岳地帯のトンネル掘削工法として用いられてきた山岳トンネル工法を適用するケースが増加している。さらに、トンネル掘削に伴って生じる地盤変位を抑制する補助工法の発展に伴い、変形量が生じやすい未固結地山に低土被りのトンネルを掘削したケースも報告されている。このようなトンネル施工においては、坑内から行う地山先行補強工の一つである長尺鏡ボルトを使用した切羽補強工に注目が集まっている。ところが、実設計を行う際に最適な鏡ボルト仕様を求める設計フローを示している研究成果は数少なく、限界平衡法に基づいた簡易計算法若しくは三次元数値解析手法を用いることが提案されている程度である。しかし、簡易計算法では鏡ボルトによる切羽周辺地盤の変位抑制効果を定量的に評価し難

く、また、近来高性能パーソナルコンピュータの開発に伴い三次元数値解析の実施がより容易になってきたとはいえ、計算時間、コスト等の理由で、地盤物性値や支保パターンをパラメトリックに変化させて、数多くのケースを比較解析して実設計に供することは困難である。そこで、著者らは切羽補強工を施工するトンネルの実設計を二次元問題として取り扱うことを想定し、切羽通過時の応力解放率を求めることを最終目的に、まずは三次元数値解析手法を用いてパラメトリックスタディを実施し、想定される低土被りのトンネル掘削条件を対象に、補助工法仕様が先行変位率に与える影響について検討を実施してきた。本稿では、未固結地山においてGFRP鏡ボルトを採用した馬蹄形トンネルを想定し、土被り、ボルト長、ボルトのラップ長、鏡ボルトと地山の付着強度等の変化による先行変位率の変化に注目し、切羽補強効果を定量的に述べる。

2. 数値解析概要

数値解析には、三次元有限差分法(FLAC3D)を用いた。図-1に解析モデルを示す。解析境界については、解析結果に大きな影響を与えないよう、トンネル断面からそれぞれ2D～3D程度の離隔を設定した。また、地表面を自由面とし、他の5面をローラー境界とした。トンネル縦断方向は60mとし、実施工におけるトンネル掘削、支保の設置および切羽補強工の打設を、下記の①～⑤の順序に従い、解析によるモデル化を行った。詳細を図-2に示す。

- ① 1m ピッチで掘削
- ② 1m 前方を掘削
- ③ 1m 後方の支保設置
- ④ 既に打設した鏡ボルトとオーバーラップさせ、新しい鏡ボルトの打設
- ⑤ ②③④の繰り返し

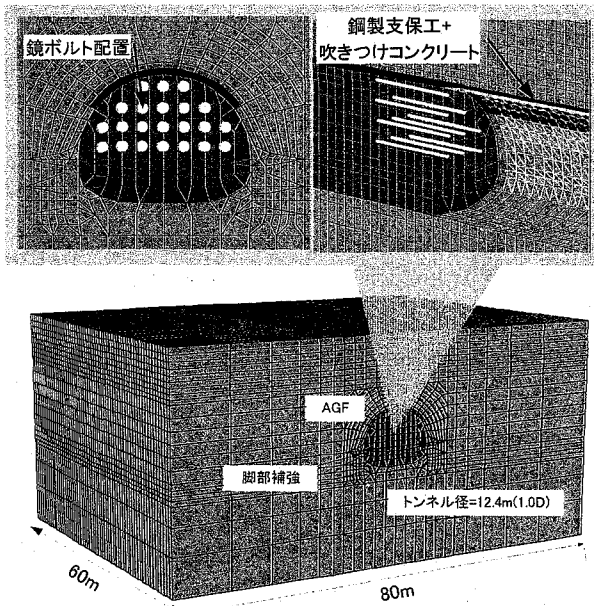


図-1 解析メッシュ

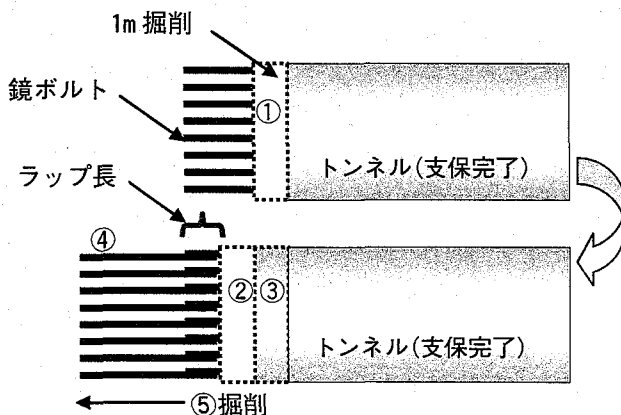


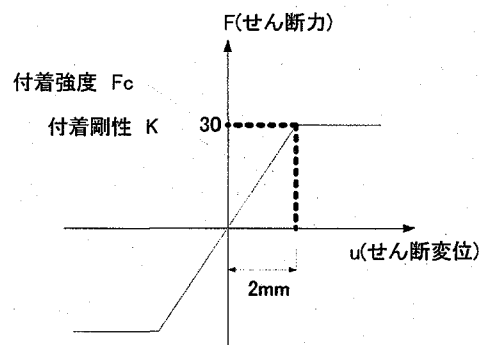
図-2 掘削のモデル化

地盤の構成則についてはMohr-Coulomb則を採用し、全応力解析を実施した。

数値解析に用いた物性値は表-1のとおりである。地盤については、鏡ボルトや先受け工等の補助工法の適用が多い未固結な砂質土を対象とし、地盤の解析用物性値については、文献¹⁾²⁾を参考に設定した。先受け工は適用範囲に相当する地盤要素を等価物性値に変換し、脚部補強工は粘着力の増加により簡便にモデル化した。先受け工の施工仕様については12mの鋼管をまず打設し、9m掘進後、残長3mをオーバーラップさせて次の鋼管を施工することとした。脚部補強工は、掘削面より1～2m前方を先行改良することとした。支保工の物性値については、吹付けコンクリートと鋼製支保工の等価物性値とし、弾性シェル要素でモデリングした。また、鏡ボルトはケーブル要素でモデリングし、GFRPボルトの一

表-1 物性値一覧

地盤		先受け工	
構成則	Mohr-Coulomb	構成則	Mohr-Coulomb
弾性係数(MPa)	50	弾性係数(MPa)	2160
密度(g/cm^3)	1.8	ポアソン比	0.35
ポアソン比	0.35	内部摩擦角($^{\circ}$)	35
内部摩擦角($^{\circ}$)	35	粘着力(kPa)	20
粘着力(kPa)	20	引張耐力(kPa)	4
引張耐力(kPa)	4	ダイレタンシー角	0
ダイレタンシー角($^{\circ}$)	0		
脚部補強		支保工(吹付けコン+鋼製支保工)	
構成則	Mohr-Coulomb	構成モデル	Shell
弾性係数(MPa)	50	弾性係数(MPa)	9300
ポアソン比	0.35	密度(g/cm^3)	2.45
内部摩擦角($^{\circ}$)	35	ポアソン比	0.25
粘着力(kPa)	100	厚さ(m)	0.25
引張耐力(kPa)	20		
ダイレタンシー角($^{\circ}$)	0		
鏡ボルト			
構成モデル	Cable	補強材円周長(m)	0.157
弾性係数(MPa)	3.4×10^4	付着強度(kN/m)	①27.8 ②150
断面積(m^2)	2.4×10^{-3}	付着剛性(MN/m ²)	①13.9 ②75



$$F_c = \frac{\pi}{2} D \gamma H (1 + K_0) \tan K \phi$$

D: ボルトの直径(m), γ : 地盤の単位体積重量
H: ボルトの中心までの距離(m)
 Φ : 地盤の内部摩擦角($^{\circ}$)
 K_0 : 静止土圧係数
K: ボルトの表面状態とハードネスによる低減係数

図-3 付着強度と付着剛性

一般的な物性値を用いた。鏡ボルトと地盤の付着強度及び付着剛性は、

① 図-3 中の理論式より算出する手法

(砂質地山における摩擦特性)

② 現場での原位置引抜き試験結果を用いる手法

(補強工周囲のグラウトを考慮した物性)

の2パターンについて検討した。手法①では、対象が砂地盤の場合、まず付着強度を求め、付着強度を発揮するまでの地盤とボルトの相対変位 2mm で付着強度を除すことによって付着剛性を得る(図-3 参照)。手法②では、実際の原位置引抜き試験結果を利用した。試験時は図-4 に示すようにボルトの引抜き荷重と頭部変位を測定し、付着強度および付着剛性を求めた(図-5 参照)。

3. 解析結果及び考察

三次元数値解析に用いたパラメーター一覧を表-2 に示す。本研究では、補助工法の違いや地盤条件が先行変位率に与える影響を定量的に評価することを目的としている。先行変位率とは図-6 に示した地山変位特性曲線中の①の②に対する比率で定義され、鏡ボルトを打設することによって、地山特性曲線が図中の上方へ移動する。それを鏡ボルトによる先行



図-4 現場引抜き試験状況

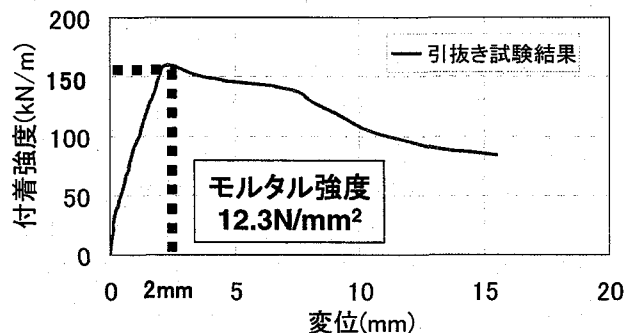


図-5 引抜き試験結果

変位の抑制効果と定義し、先行変位率の低減度合を指標に切羽補強工の補強効果を評価する。

(1) 鏡ボルトの補強効果

まず鏡ボルト長(無補強, 0.25D, 0.5D, 1.0D, D: トンネル径)をパラメータにした場合の、切羽近傍の水平変位分布図, セン断ひずみ分布図, 鉛直変位分布図を、図-7, 8, 9 に示す。

表-2 解析パラメーター一覧

土被り(m)	鏡ボルト長(m)	Lap長(m)
0.5D	0.25D	1
1.0D	0.5D	2
1.5D	1.0D	3
2.0D		4
付着強度(kN/m)	先受け工	
27.8	有り	
150	無し	

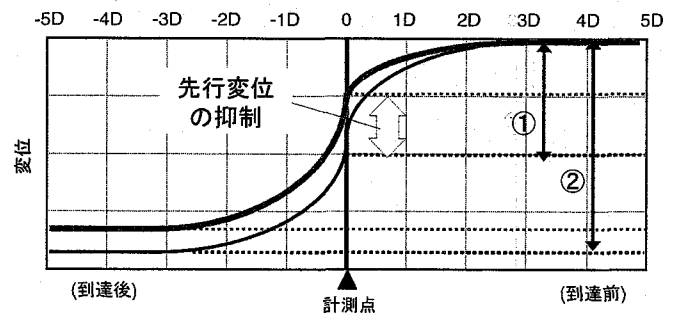
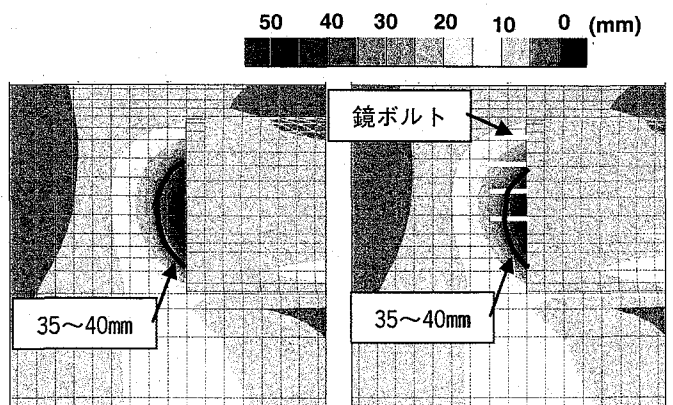
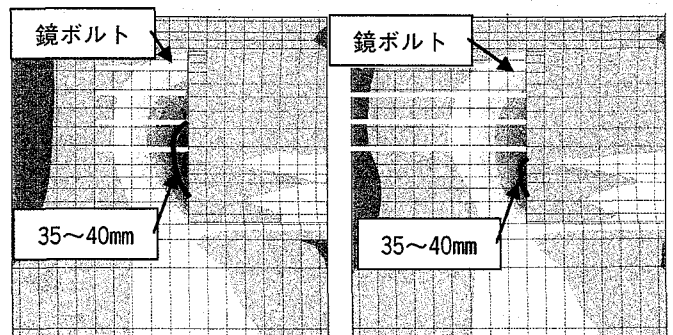


図-6 地山変位特性曲線



(a) 鏡ボルト無し

(b) ボルト長=0.25D



(c) ボルト長=0.5D

(d) ボルト長=1.0D

図-7 鏡ボルト長による水平変位分布の違い

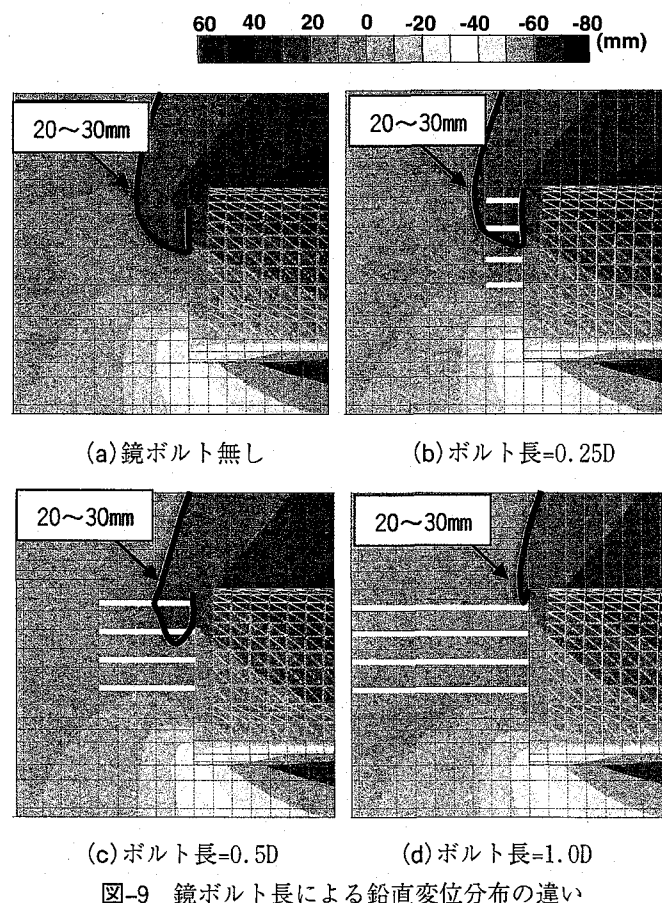
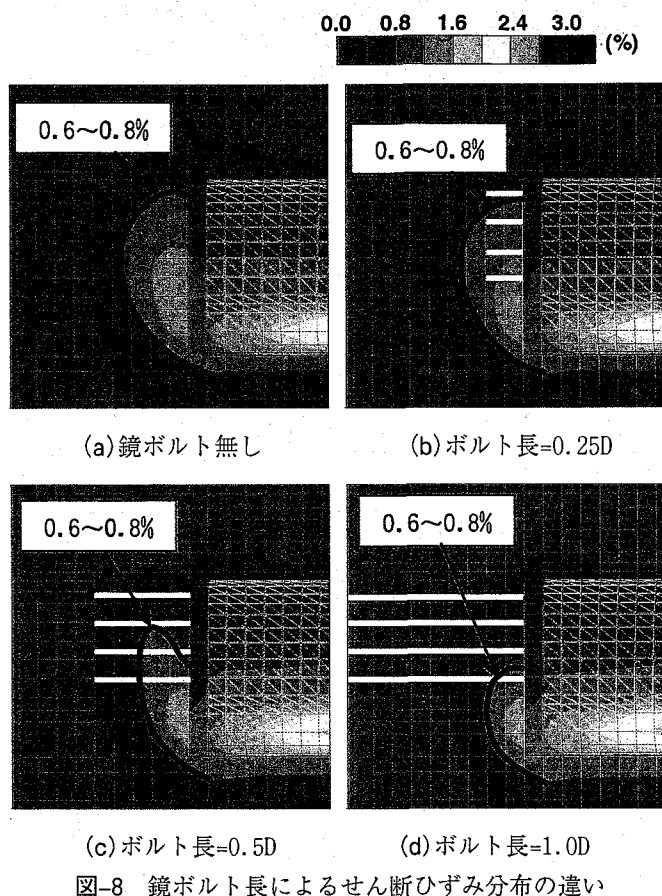


図-7に示した水平変位分布図では、トンネル押出し変位 35~40mm の範囲が、鏡ボルト長が増加するにつれて小さくなっていることが分かる。また、図-8に示すように、切羽近傍のせん断ひずみ分布図に着目した場合においても、水平変位分布と同様に、鏡ボルト長が増加するにつれて、トンネル前方に発生していた 0.6~0.8% のひずみ分布領域が縮小していくことが確認できる。

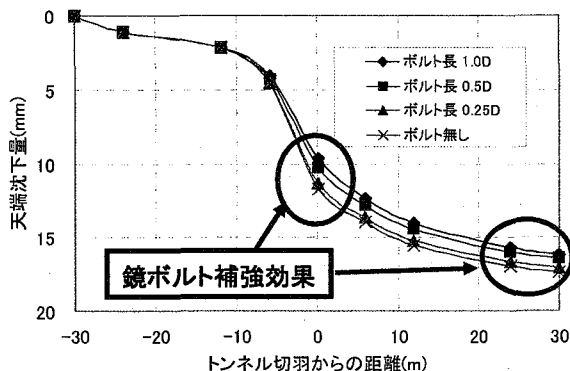
一方、図-9に示した切羽近傍の鉛直変位分布について見てみると、鏡ボルト無しの場合には、鉛直変位 20~30mm の範囲がトンネル切羽前方から上部にかけて発生しているのに対し、鏡ボルト長が増加するにつれて、徐々に切羽へ近づくように小さくなっていくことがわかる。例えば、ボルト長が 1.0D の場合には、切羽上部のみに、その領域が見られるようになる。これは、鏡ボルトの打設によって切羽前方が一体となって補強され、補強した領域より上部の鉛直変位を抑制することができたと考えられ、鏡ボルトの補強効果は切羽前方のせん断ひずみや水平変位の抑制だけでなく、天端沈下量や地表面沈下量といった鉛直変位についても抑制効果があるということがわかった。

次に、ボルト長に着目してみると、鏡ボルト長が長くなるにつれて、補強効果が大きくなる傾向であるが、ボルト長が 0.25D のケースでは無補強のケースとの差は小さく、鏡ボルト打設による大きな補強効果はない。このことから、切羽補強工に関して、最低限確保しなければならない長さがあるということがわかる。鏡ボルト長については(2)で後述する。

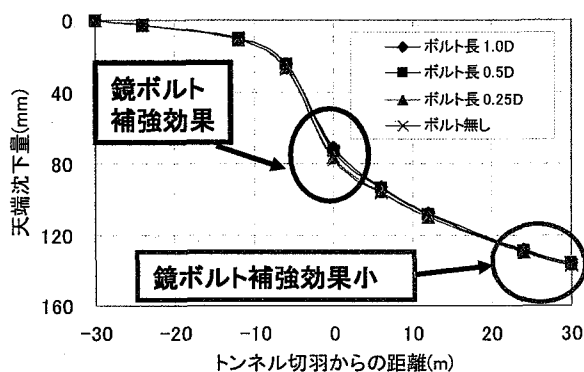
(2) 土被り、鏡ボルト長の影響

土被り、鏡ボルト長の違いに注目したパラメトリックスタディ結果を図-10に示す。図-10(a)(b)は、トンネル掘削全長 60m の中央 30m 地点(以後、変位測定点)における切羽進行に伴う天端沈下量を土被り別に示した地山特性曲線である。これらのグラフより、切羽面が変位測定点手前 1.0D 程度まで近づくときの鏡ボルト長のケースにおいても沈下量が急増しており、さらに掘削が進み、切羽面が変位測定点近傍まで達すると、鏡ボルト長の差異により、天端沈下量に大きく差が生じるということがわかった。また、土被り 0.5D では、得られた鏡ボルトの補強効果は最終的な沈下量においても抑制効果が見られるのに対し、土被り 2.0D では、切羽面が測定点に到達した段階では抑制効果が見られるものの、掘削の進行に伴って徐々にその差はなくなり、最終的にはほぼ同じ沈下量になってしまうことが確認された。この傾向は土被り 1.0D、1.5D でも同様であり、これ

らのケースと土被りが 0.5D のケースの傾向の違いは、上載圧の大小による影響と考えることができ、土被りが 0.5D 以外のケースであっても、設置した支保の剛性を大きくすることや、他の補助工法との併用を考慮することによって、切羽近傍で得られた鏡ボルトの補強効果が最終的な変位においてもその差異が保たれた状態になるのではないかと考えられる。



(a) 天端沈下変位(土被り 0.5D)



(b) 天端沈下変位(土被り 2.0D)

図-10 鏡ボルト打設による地山特性曲線の変化

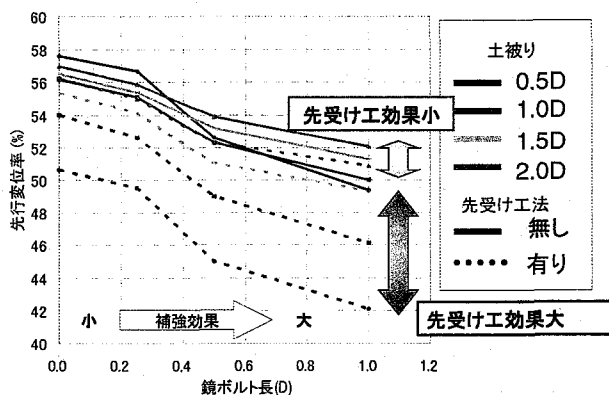


図-11 AGF の有無による補強効果の違い

(3) 先受け工の影響

次に、先受け工の有無による先行変位率の違いを、鏡ボルト長、土被り別に示したものを図-11 に示す。まず、鏡ボルト長が増加するにしたがって、先受け工の有無に関係なく先行変位率は小さくなるのが確認できる。例えば、鏡ボルト長が 1.0D 付近では、先行変位率を約 10% 低減できている。また、鏡ボルト長が 0.3D から 0.5D の時に、先行変位率の低減効果が急に増加している。この傾向は土被りの大小に関係なくほぼ一様となるのが分かった。

次に先受け工による先行変位率の変化に着目する。鏡ボルト長が 1.0D のケースでは、先受け工が無いとき、先行変位率が 50~52% であるのに対し、先受け工有りの場合には、先行変位率は 42~50% となることがわかった。このことから、先受け工が有る場合には、土被りによる影響が大きいということがわかる。また、土被り別に、先受け工による先行変位率の低下幅に着目すると、土被り 0.5~1.0D では約 5~10%、1.5D 以上では 2% 程度となり、0.5~1.0D の場合では、先受け工と鏡ボルトを併用することで、非常に大きな補強効果が得られている。これらの結果から、特に土被りが 1.0D 以下の場合には、先受け工による先行変位率の低減幅を積極的に考慮すべきであると考えられる。

(4) 付着強度の影響

次に、鏡ボルトと地山の付着強度の差異に伴う先行変位率の低下幅を図-12 に示す。同図から、鏡ボルトの補強効果は、付着強度が 150kN/m より大きい値になると大きくは向上しないものと予想される。また、付着強度が小さい範囲では、ボルト長をパラメータとして、先行変位低下幅を評価することで、

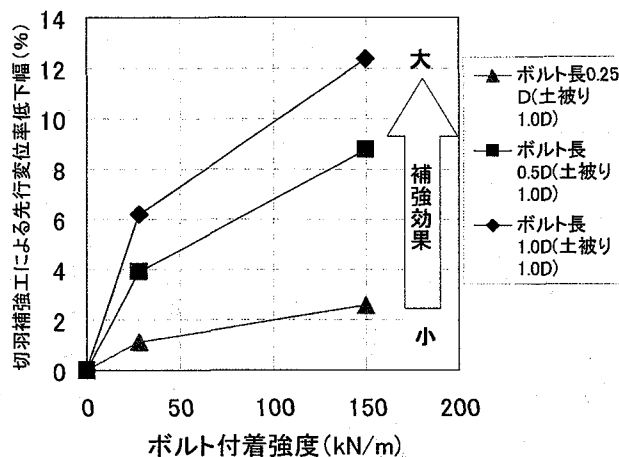


図-12 付着強度と先行変位低下幅の関係

先行変位率を評価することが可能であると思われる。これを、実設計の視点から考察すると、原位置引き試験のような現場試験を用いて付着強度、及び付着剛性をできるだけ正確に求めることが非常に重要であるといえる。一方、施工の観点からは、適当な付着強度を有する合理的なモルタルやボルトの開発の可能性のあるものと思われる。

(5) ラップ長の影響

次に、ラップ長と先行変位率との関係を図-13に示す。ここで、ラップ長0mの結果は、ボルト無補強時の解析結果から算出した先行変位率である。この図からラップ長が増加するにしたがって、先行変位率は低下することがわかる。ただし、ある値を超えると、ラップ長を大きくしても、その補強効果は大きく増大しなくなる。また、ボルト長が1.0Dのケースにおいて、ラップ長3mとその半分である1.5mの先行変位率を比較すると約4%の差が見られるのに対し、ボルト長を半分の0.5Dとした場合の先行変位率には約1.5%の違いしか見られない。これはすなわち、先行変位率に及ぼす影響は、ボルト長の影響よりもラップ長の方が大きいということがいえる。

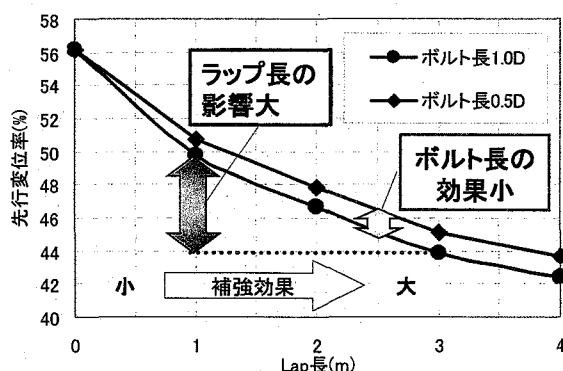


図-13 ラップ長と先行変位率との関係

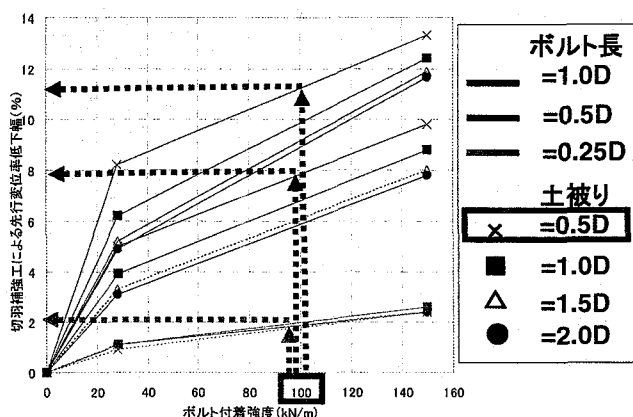


図-14 土被り・ボルト長・付着強度と先行変位率との関係

(6) 解析結果まとめ

三次元数値解析によるパラメトリックスタディから得られた知見を以下に挙げる。

- ・鏡ボルト長の影響：ボルト長0.25Dの補強効果は小さいが、鏡ボルト長1.0Dまでは、ボルト長は長いほど、補強効果が得られる。
- ・土被りの影響：土被り0.5Dの場合は、先行変位で得られた補強効果が最後まで見られる。土被りが1.0Dを超えると、先行変位で得られた補強効果が、切羽が進行するにつれて小さくなる。
- ・先受け工の影響：土被りが小さいほど先受け工と鏡ボルト工との併用による補強効果は大きい。
- ・付着強度の影響：付着強度が大きくなれば、大きな補強効果が得られるが、付着強度が150kN/m以上では大きく増加しないことが予想できる。
- ・ラップ長の影響について：ラップ長が長い程、補強効果が大きく、ボルト長よりも補強効果に与える影響が大きい。

今回、得られた結果を、まとめて図-14に示した。図-14は土被り、ボルト長、付着強度と先行変位率低下幅との関係を示したグラフである。同図では、たとえば土被りが0.5D、付着強度を100kN/mとした場合、鏡ボルト長が1.0Dであれば、先行変位を11%抑制できるということがわかる。また、同時にボルト長が0.5Dのときは8%、0.25Dであれば2%と、非常に小さい効果しか与えられないということがわかる。このように図表化を行うことで、補助工法の違いや地盤条件が、先行変位率に与える影響を定量的に把握することができることを考えている。

4. おわりに

今回、三次元数値解析によるパラメトリックスタディにより、補助工法の違いや地盤条件が先行変位率に与える影響を検討した。今後は、鏡ボルトの配置や本数などの影響についても検討し、各パラメータが先行変位率や地山特性曲線に及ぼす影響を把握する予定である。また、これらの結果を二次元問題として取り扱うことを想定し、二次元数値解析における応力解放率との相関関係を評価していくことが重要であると考え、検討を進めていくつもりである。

参考文献

- 1) 日本道路公団試験研究所：トンネルの標準設計に関する研究報告書，1986。
- 2) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構：NATM 設計施工指針，1996。