

ケーブルボルトの付着抵抗特性と解析モデルに関する研究

STUDIES OF BOND STRENGTH BEHAVIOR AND NUMERICAL MODEL OF FULLY GROUTED CABLE BOLTS

石塚与志雄¹⁾・安部 透²⁾

Yoshio ISHIZUKA and Tohru ABE

The behavior of bond strength of five types of bolts is investigated by laboratory pull-out test. In steel bar, bond stress is transferred by mechanical interlocking between knots of steel bar and grout. On the other hand, bond strength behavior of cable bolts is mainly governed by friction between PC strand and grout. Bond strength of tested cable bolts are lower than those of steel bar, but it showed that indented PC strand cable bolts are useful bolts to have twice bond strength compared with ordinary PC strand. On the influence of grout type (cement and mortar) on bond strength, it seems that bond strength of cable bolts are independent on two grout types. Numerical simulations of laboratory pull-out test and excavations and prereinforcement by cable bolting of large span tunnel are carried out to study the application of cable bolt element in FLAC to bond strength behavior.

Keywords: tunnel, cable bolts, pull-out test, bond strength, support, reinforcement, cable element

1. はじめに

PC鋼より線や新素材より線などのケーブルボルトは、通常のロックボルトと比較して、「非常にフレキシブルで、狭い施工スペースからの施工が可能」であるなどの理由から、大断面トンネルや地下空洞掘削時の先行補強やロックボルトの代替として期待されている。我が国の土木トンネル工事においてはケーブルボルトの使用実績が少ないことから、ケーブルボルトの挙動が把握されておらず、地山に適合したボルトの径、耐力、強度特性の把握、最適削孔径とグラウト材の強度特性や長尺削孔と孔壁の自立性の確保などの課題が挙げられている⁽¹⁾。ケーブルボルトの補強機構に関する既往の研究では、異形棒鋼などの通常のロックボルトでは異形部分(節など)での力学的結合が支配的であるのに対して、ケーブルボルトではケーブルとグラウト間の摩擦によってケーブルからグラウトに付着応力が伝達する機構が主であること等が報告されている⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。

ケーブルボルトの付着特性は、ボルト自体の機械的性質、ボルトとグラウト間の付着特性、グラウト材の変形・強度特性削孔径とボルト径の関係に加えて、拘束圧やグラウトと地山の付着特性など地山条件に大きく影響される。硬岩地山ではケーブルボルト補強の破壊はケーブル/グラウト間に生じるが、強度の低い地山では地山内やグラウト/地山間で生じる可能性がある⁽⁵⁾。このため、最終的には現場での試験、実証が必要になるが、ケーブルボルトの種類、グラウト材などが付着抵抗特性に与える影響を定量的に検討するには、試験条件を整えることができる室内試験で十分検証しておく必要がある。特に、ケーブルボルトはロックボルトと比較して付着強度が低いとの指摘⁽²⁾があるため、付着力を増加させる工夫も必要になるものと考えらる。

そこで、本研究では、室内付着抵抗試験で、付着力増加を狙って新たに試作したインデント付PC鋼より線ケーブルボルトを含む5種類のボルトの付着特性について検討を行うとともに、ケーブルの付着特性の解析モデル(FLACのケーブル要素)の検討を行った。続いて、大断面トンネルにおける導坑からの先行補強について解析的な検討(ケーススタディ)を行い、ケーブルボルトによる先行補強効果について考察した。

1) 正会員 工博 清水建設(株)技術研究所

2) 正会員 清水建設(株)技術研究所

2. ケーブルボルトの付着抵抗特性

2. 1 室内付着抵抗試験概要

図-1に示すようなボルトの補強効果を模擬した二重定着軸方向試験(図-2参照)により、全面定着ボルトの付着抵抗特性を把握する試験を行った。供試体は孔径をφ50mmとした鋼管(厚肉10.5mm)を地山と模擬し、ボルトを鋼管中央部に設置して、グラウト材を充填して作成した。490mmの固定部は引抜きによるケーブルボルト回転の影響を除去して定着部に引張力を作用させるために設けたものであり、付着を大きくするため試験部分より長くするとともに、グラウトを十分硬化(4週間以上)させた後、試験定着部(定着長は300mm)にグラウト材を充填し、所定の日数経過後、試験を行った。試験制御は、変位制御とし、0.5mm/minの変位速度で引張荷重を作用させた。

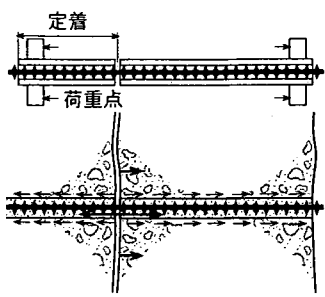


図-1 二重定着軸方向試験

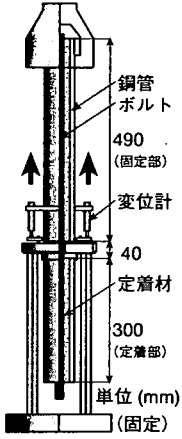


図-2 試験概念図

2. 2 ボルト、グラウト種類

(1)ボルト種類

表-1に示すような形状、機械的性質および特徴を有する5種類のボルトについて試験を行った。通常のケーブルボルトは②のJIS規格のPC鋼より線である。③④は独自に試作したケーブルボルトである。③はPC鋼に設けたインデントの凹形状(0.18mm深さ、8.2mmピッチ)により付着抵抗の増大を期待したもの、④はグラウトの後注入用に中空を設けたものである。なお、比較のために、異形棒鋼①と炭素繊維より線⑤についても試験を行った。

(2)グラウト材と材令

諸外国ではセメントグラウト(セメントミルク)の適用が主となっているため、以下のモルタルグラウトとセメントグラウトの2種類を用い、その差を調べることにした。

- ①モルタルグラウト：プレミックスドライモルタル(㈱ケー・エフ・シー社のSNドライモルタル、水セメント比0.40)
- ②セメントグラウト：普通セメント(水セメント比0.35)

表-1 ボルトの形状と機械的性質

種類	断面形状	横断面	機械的性質			特徴
	縦断面		引張強度(MPa)	弾性係数(GPa)	単位質量(kg/m)	
① 異形棒鋼 外径：25.4mm			480	206	3.98	通常のトンネル工事等で使用されているロックボルト
② PC鋼より線 外径：15.2mm			1881	191	1.10	JIS規格のPC鋼線を用いたケーブルボルト(SWPR7AN：7本より)
③ インデント付PC鋼より線 外径：15.2mm			1881	191	1.10	5mmのPC鋼線に8.2mmピッチに0.18mm深さのインデントを設けて、JIS規格と同様によったPC鋼より線
④ シース付PC鋼より線 外径：21.83mm			1872	186	1.68	内径8mm外径10mmのスパイラスにPC鋼より線の最外層素線(5.5mm)を9本巻き付けたもの
⑤ 炭素繊維より線 外径：15.2mm			1753	137	0.23	新素材である炭素繊維を用いた複合材ケーブル(東京製鋼社製：CFCC1×7)

ボルトおよびグラウト種類の比較は材令3日の試験を基本として、材令効果はモルタルグラウトについて1、3、7日の3材令で比較することにした。

上記2種類のグラウト材の一軸圧縮強度の経時変化を図-3に示す。1日強度は、モルタルグラウトが15.9MPa、セメントグラウトが19.1MPaとセメントグラウトの方がやや大きい。3日以降（3日強度はモルタルグラウト46.1MPa、セメントグラウト38.5MPa）になるとモルタルグラウトの方がセメントグラウトより10～20%大きくなる。

2. 3 試験結果

(1) 付着抵抗特性

モルタルおよびセメントグラウト3日材令における各ボルトの付着応力-変位関係を図-4に示す。ここで、付着応力は、軸荷重（kN）を定着長（m）で除した値で、定着部の単位長さ当たりのボルトとグラウトの付着応力（kN/m）である。試験後のボルトとグラウト材部分のせん断状況等から、異形棒鋼の付着抵抗機構はP C鋼より線などのケーブルボルトとはかなり異なることが確認された。各ボルトの付着抵抗特性は以下のようである。

- ①異形棒鋼： 試験後の観察によれば、載荷近傍のグラウト部の損傷が著しく、大きく剥離しているとともに、内部でもグラウトが棒鋼の凸節によりせん断破壊されており、異形棒鋼の凸節部分とグラウトのかみ合わせが、その付着強度に大きな影響を与えている。
- ②P C鋼より線： 異形棒鋼のグラウトの破壊状況とは大きく異なる。グラウト部の破壊はわずかであり、P C鋼より線がグラウト部から引き抜かれる状態を呈する。
- ③インデント付P C鋼より線： インデント部（凹部）へのグラウトの付着、インデントによるグラウトのせん断抵抗の跡が見られ、付着抵抗増大へのインデントの効果が明瞭に観察される。
- ④シース付P C鋼より線： 試験後の観察によれば、グラウト側にはっきりとP C鋼の跡が観察され、引き抜きによるせん断の跡は観察されない。また、いずれも引き抜き直後の変位0.5～1.0mmまでは付着抵抗を発揮しない。これは、シース内部をグラウトで充填しているが、P C鋼線に張力が作用すると、シース周りのP C鋼線が中空内のグラウト材を圧縮してP C鋼自体の外径が縮小するために、P C鋼線とグラウト間の付着抵抗が減少するためと推定される。

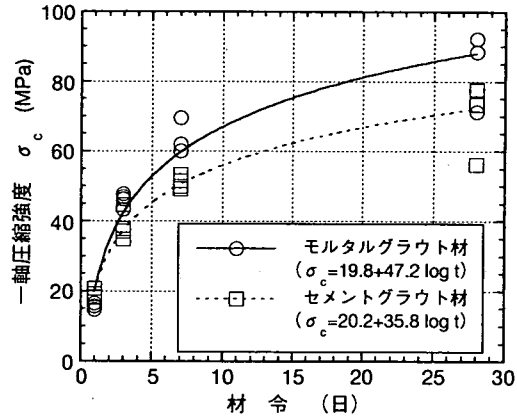
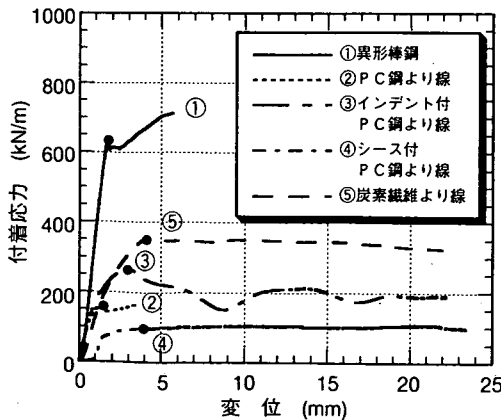
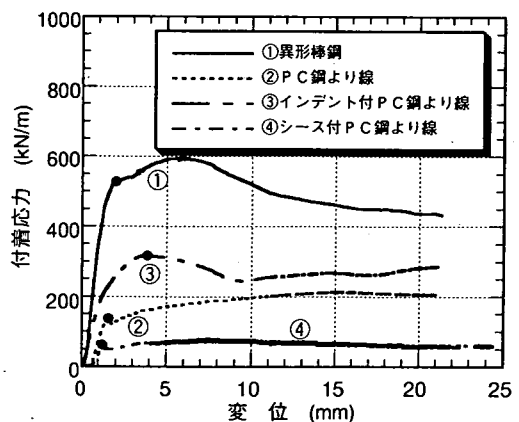


図-3 グラウト材の一軸圧縮強度-材令関係



(1) モルタルグラウト材



(2) セメントグラウト材

図-4 各ボルトの付着応力-変位関係

⑤炭素繊維より線：炭素繊維に沿ってグラウトが全体に付着している。また、グラウト側も繊維によってせん断されているのが確認でき、炭素繊維表面の粗度が付着抵抗の増大に寄与している。

(2)付着強度・剛性

表－２に材令３日における各ボルトの付着強度と付着剛性を示す。付着強度(sbond、kN/m)は、付着応力－変位関係において、明瞭な降伏を示した供試体についてはその降伏点を、明瞭な降伏が認められない場合は、付着応力－変位関係が線形から非線形に移行する点を降伏点とし、付着強度を求めた。図－４中で・印を施した点が降伏点(付着強度)である。

付着剛性(kbond、kN/m/m)はボルトの引き抜き時の変形特性を示すものであり、付着応力－変位関係において付着応力が発生する初期点と降伏点を結ぶ割線の傾きから算出した。

■各種ボルトの比較：

異形棒鋼と比較すると、ケーブルボルトの付着強度・剛性はいずれも小さい。ＰＣ鋼より線の中ではインデント付ＰＣ鋼より線が最も大きな付着抵抗を示し、通常のＰＣ鋼より線と比較して約２倍の付着強度を発揮する。一方、シース付ＰＣ鋼より線では引張により

中空内グラウトが圧縮されることによりＰＣ鋼線外径とグラウト間の付着抵抗があまり発揮されず、付着強度も小さい。また、炭素繊維より線は通常のＰＣ鋼より線の２倍以上の付着強度を発揮する。

■グラウト種類の比較：

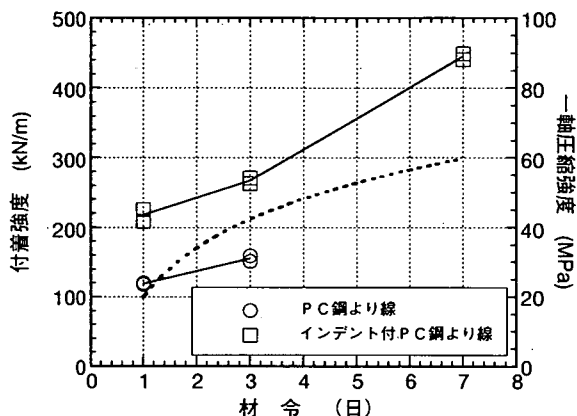
異形棒鋼とシース付ＰＣ鋼より線では、セメントグラウトよりモルタルグラウトの方が２０～３０％程度大きな付着強度を示すが、ＰＣ鋼より線ではほとんど差が認められない。また、インデント付ＰＣ鋼より線では逆にモルタルグラウトの方が小さくなる。このように、異形棒鋼では、グラウトの強度特性(モルタルグラウトの方がセメントグラウトと比較して約２０％大きい)とよい対応を示すが、通常のＰＣ鋼より線、インデント付ＰＣ鋼より線では、グラウトの強度特性が付着強度に直接反映する結果にはなっていない。これは、異形棒鋼では凸節部分とグラウトの力学的かみ合わせが付着抵抗特性を支配し、グラウト強度が付着強度に直接反映されるのに対して、ＰＣ鋼より線ではＰＣ鋼線とグラウト材間の接触抵抗とより線形状の凹凸に起因する抵抗が主であるために、グラウト強度との関係が異形棒鋼と比較すると低くなるものと考えられる。各ボルトで上記のような差異はあるものの、セメントグラウトでも十分な付着強度を発揮している。

■材令効果：

図－５にＰＣ鋼より線とインデント付Ｐ

表－２ ３日材令の付着強度、付着剛性一覧表

グラウト材	モルタルグラウト		セメントグラウト	
	付着強度(kN/m)	付着剛性(kN/m/m)	付着強度(kN/m)	付着剛性(kN/m/m)
①異形棒鋼	638	4.62×10^5	515	3.04×10^5
②ＰＣ鋼より線	155	1.28×10^5	151	1.34×10^5
③インデント付ＰＣ鋼より線	267	9.26×10^4	307	8.09×10^4
④シース付ＰＣ鋼より線	81.9	1.20×10^5	60.2	1.10×10^5
⑤炭素繊維より線	339	8.32×10^4	—	—



図－５ 付着強度・グラウト強度－材令関係

表－３ グラウト材令と付着強度・剛性の比較

ボルト	ＰＣ鋼より線		インデント付 ＰＣ鋼より線		モルタル グラウト
	付着強度(kN/m)	付着剛性(kN/m/m)	付着強度(kN/m)	付着剛性(kN/m/m)	
材令					圧縮強度(MPa)
１日	119 (1.00)	1.08×10^5	218 (1.00)	0.83×10^5	15.9 (1.00)
３日	155 (1.30)	1.28×10^5	267 (1.22)	0.93×10^5	46.1 (2.90)
７日	---	---	445 (2.04)	1.09×10^5	59.3 (3.73)

C鋼より線の付着強度の経時変化（モルタルグラウト）を、表－3に試験結果をまとめたものを示す。図表中には、比較のためにモルタルグラウトの圧縮強度の経時変化も並記する。1日材令の付着強度は、両PC鋼より線（PC鋼より線119kN/m、インデント付PC鋼より線218kN/m）ともかなりの付着強度を発揮する。1日材令強度を1.00とすると、モルタルグラウト強度が3日で2.90、7日で3.73と増加するのに対して、付着強度はPC鋼より線では3日で1.30、インデント付PC鋼より線では3日で1.22、7日で2.04の増加となっており、グラウト強度の増加割合より小さくなっている。

3. ケーブルボルトの解析モデルの検討

3. 1 ケーブルボルトの解析モデル

2章の付着抵抗試験結果から、PC鋼より線などのケーブルボルトの付着特性は、ボルト／グラウト間の接触抵抗が主であることが明らかとなった。そのため、ケーブルボルトの補強効果を解析的に取り扱うには、ボルトとグラウトの付着特性（付着強度、付着剛性）を考慮した解析モデルが適当と判断される。そこで、このような付着特性を構造要素（ケーブル要素）として有する有限差分法解析FLAC⁽⁶⁾を用いて、付着抵抗試験のシミュレーションを行い、そのモデルの妥当性、適用性について検討することにした。

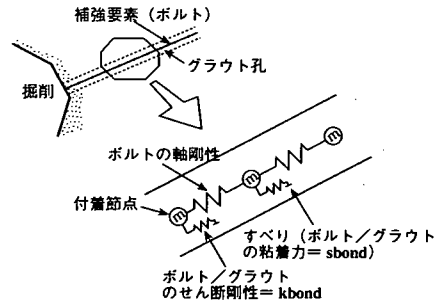
FLACにおけるケーブル要素⁽⁷⁾は、図－6に示すようにボルト自体は一軸引張に耐える一次元材として引張および圧縮降伏力限界でモデル化され、ボルト／グラウト（またはグラウト／岩盤）のせん断挙動は、完全弾塑性とモデル化される。破壊規準は付着強度（粘着力 s_{bond} ）と拘束圧に依存する摩擦抵抗（摩擦角 ϕ ）の関数として表わされる。弾性範囲内のせん断変形は、せん断剛性（ k_{bond} ）で規定される。

3. 2 室内試験のシミュレーション

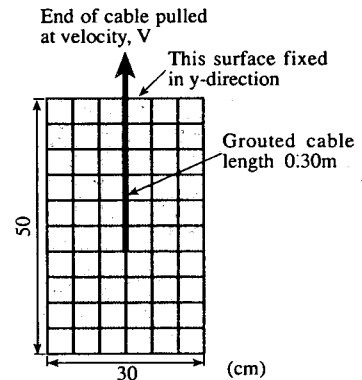
付着抵抗試験のシミュレーションは図－7に示す50×30cmに定着長30cmのボルトを設けたモデルで実施した。境界条件は、岩盤上面のY軸方向変位を固定してボルトの上端を一定変位速度で引く抜く条件で解析を行った。

解析に用いた岩盤物性は、弾性体と仮定し、弾性係数 $E=60\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.2$ 、密度 $\rho=2.0\text{g/cm}^3$ とした。各ボルトの物性値は表－1に、ボルト／グラウトの付着特性は室内付着抵抗試験で求められた付着剛性 k_{bond} と付着強度 s_{bond} （表－2参照）である。なお、今回の試験では拘束圧を作用させていないため、摩擦角をゼロとした。

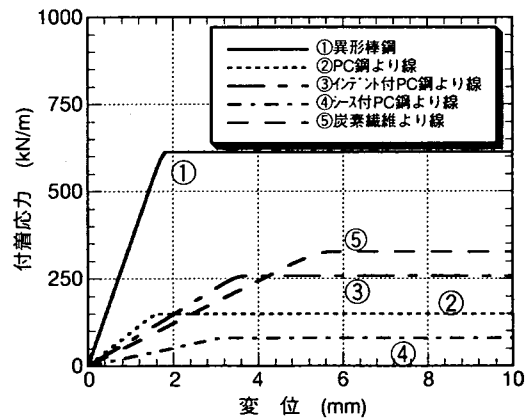
図－8にモルタルグラウト3日材令の解析結果を示す。解析で得られた付着応力－変位関係は、付着挙動を完全弾塑性モデルとしているため、試験（図－4(1)参照）で見られるような降伏後の複雑な挙動を厳密にシミュレーションすることはできないが、ボルト／グラウト部の付着がせん断破壊して付着応力が一定となる点は、ボルトの種類に関わらず、試験結果とよい一致を示す。このよう



図－6 ボルト／グラウトのせん断挙動を考慮した全面定着型ボルトのモデル化概念図



図－7 付着抵抗試験の解析モデル



図－8 付着応力－変位関係の解析結果

に、ボルトの耐力およびボルト／グラウトの弾性域から塑性に至る挙動はよく表現できていること、また、付着抵抗試験で得られたボルト／グラウトの付着剛性、強度値との関係が明確であることから、実用上、当ケーブル要素は有用と考えられる。

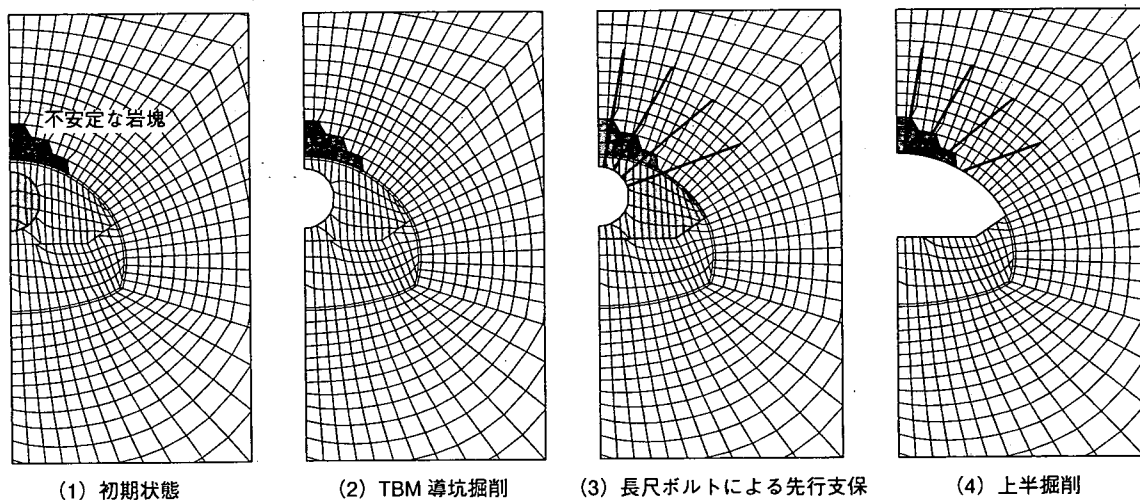
4. ケーブルボルトによる導坑からの先行支保解析

4. 1 解析対象モデル

ケーブルボルトによる補強事例として、図－9に示すような第2東名名神高速道の大断面トンネル⁽¹⁾において検討されているTBM導坑からのケーブルボルトによる天端不安定地山の先行支保を取り上げる。解析対象地山は、不連続面が発達し天端部分で先受け支保が必要となるCⅠ～CⅡ程度の岩盤を想定する。天端において先行支保すべき岩塊の大きさは地山の地質状況や施工方法などに依存し、一義的に定めることはできない。今回のケーススタディでは図－9でハッチを施した領域（緩み高さ3m、幅10mのくさび形）を不安定岩塊と設定して解析することにした。なお、深度は100mとし、不安定岩塊と周辺地山との境界条件はインターフェース要素により岩塊の分離、すべりが可能のようにモデル化した。なお、岩盤の密度 ρ は2.4g/cm³とした。

解析ステップはつぎのようである（図－9参照）。

- ①初期状態： 自重解析により初期応力状態を設定。
- ②TBM導坑掘削： TBM部分の要素を除去し、導坑部分の応力を開放。
- ③長尺ボルトによる先行支保： 8本のケーブルボルト（1/2解析モデルでは4本）を設定（ケーブル要素）。
- ④上半掘削： 上半掘削部分の要素を除去し、上半部分の応力を開放。

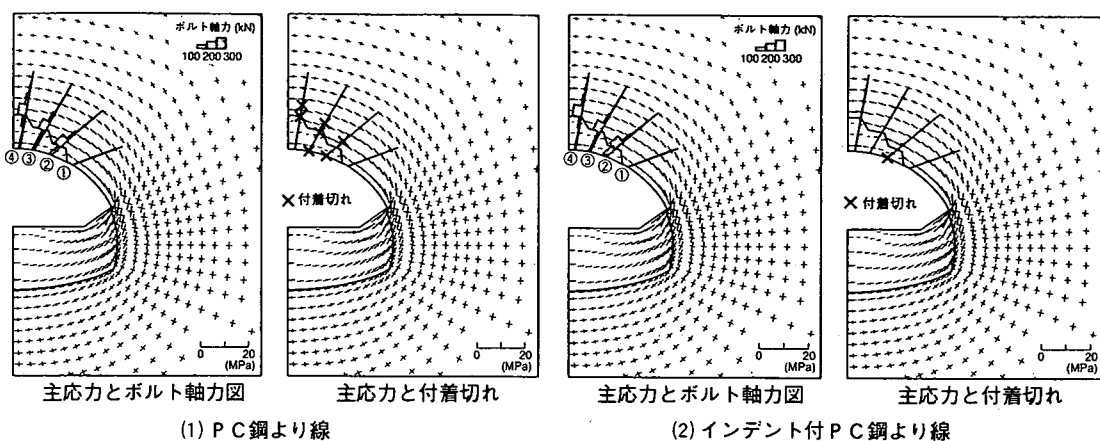


図－9 天端の不安定岩塊の先行支保の検討フロー

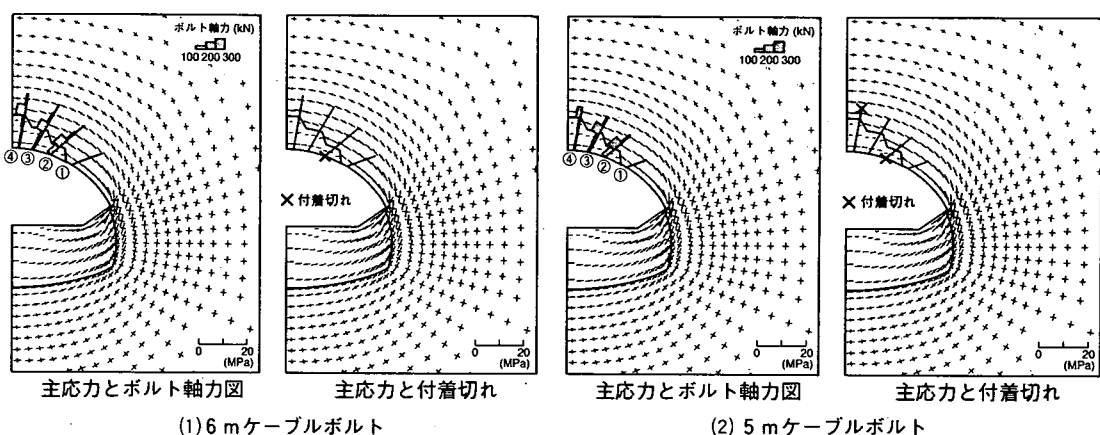
ケーススタディ解析では、ケーブルボルトのトンネル軸方向の打設ピッチを1mとし、ケーブルボルト種類（付着強度の効果）とボルト長の効果を調べた。ケーブルボルト種類の比較は、ケーブルボルト長8mについて通常のPC鋼より線とインデント付PC鋼より線の2種類とした。また、ボルト長についてはインデント付PC鋼より線について、5mと6mについて解析を行い、その効果を検討することにした。なお、ボルトおよびボルト／グラウトの強度、剛性値は付着抵抗試験で求めた値である（表－1、2）。

4. 2 解析結果

図－10に8mケーブルボルトによる先行補強解析結果（ボルト軸力と付着切れ（ボルト／グラウトのせん断破壊））を示す。PC鋼より線では、最大発生軸力は約24tonと降伏軸力以下であるが3本のボルトで付着切



図一 10 8 mケーブルボルトによる先行支保解析



図一 11 6, 5 mケーブルボルトによる先行支保解析 (インデント付 P C鋼より線)

れが数多く発生しており、先行支保対策は不十分との解析結果が得られた。これに対して、インデント付 P C 鋼より線では、天端鉛直に近いボルトでボルト軸力が約 26ton と降伏点に達しているが、付着切れは掘削面に近い部分の 1 箇所だけであり、P C 鋼より線と比較するとより安全な先行支保対策になっている。つぎに、インデント付 P C 鋼より線について、ボルト長を 8 m から 6 m と 5 m に縮めた場合の解析結果を図一 11 に示す。6 m では付着切れが 8 m 長と同様、掘削面に近い部分だけであるが、5 m 長になると天端のケーブルボルトで定着部の岩盤部分でも付着切れが発生し、不安定岩塊の安定性に問題があるものと推定される。

これらの結果、ここで想定した不安定岩塊の規模では、通常の P C 鋼より線では 8 m 長でも支保が難しいが、付着強度を増加させたインデント付 P C 鋼より線ではケーブルボルト長 6 m 程度で支保可能であると言える。

以上のように、ケーブルボルトによる先行支保では、ボルト自体の強度特性はもちろん、ボルト／グラウトの付着特性が安定性に大きな影響を与える。そのため、大断面トンネルや地下空洞等におけるケーブルボルトによる事前補強・先行支保などを定量的に検討するためには、掘削・支保の施工段階を考慮するとともに、ケーブルボルトの付着強度・剛性を考慮したケーブル要素などの支保構造要素を導入する必要があるものと考ええる。

5. まとめ

本研究では、室内の付着抵抗試験により、各種ボルトの付着抵抗特性を比較検討するとともに、その付着特

性の解析モデルの検討を行った。そして、ケーブルボルトによる導坑からの先行支保の事例解析を行い、その効果の検討を行った。結果をまとめると以下ようになる。

(1)各種ボルトの付着抵抗特性

- ①異形棒鋼の付着特性は、ボルトの異形部分（凸節）とグラウトのかみ合わせが付着強度特性を支配しているのに対して、P C 鋼より線ではP C 鋼線とグラウトの接触抵抗とより線形状の凹凸に起因する付着抵抗が主であり、その特性が異なる。
- ②ケーブルボルトは断面積（表面積）が異形棒鋼と比較して小さいこともあり、異形棒鋼と同等の付着強度を期待するのは難しい。しかし、通常のP C 鋼線に0.18mm程度のインデント（凹み）を施したインデント付P C 鋼より線は、通常のP C 鋼より線の約2倍の付着強度を得ることができ、極めて有用である。
- ③グラウト材によって付着強度、剛性の差は生じるものの、モルタルグラウトとセメントグラウトとで大きな差異はなく、セメントグラウトでも十分な付着特性を発揮する。また、1日材令の付着強度はP C 鋼より線で119kN/m（1m当たり約12ton）、インデント付P C 鋼より線で218kN/m（1m当たり約22ton）と若材令においても十分な付着強度を発揮する。

(2)解析モデル、ケーススタディ

- ①FLAC（有限差分法地盤解析コード）のボルト／グラウトの付着特性をモデル化したケーブル要素は、付着抵抗試験結果とよい対応を示し、かつ、試験で評価される定数（付着強度、剛性）との関係も明確であるため、ケーブルボルトによる地山の支保・補強の解析的検討に有用と考えられる。
- ②ケーブルボルトによる大断面トンネルの導坑からの先行支保解析のケーススタディの結果、ボルト／グラウトの付着特性が、その補強効果に大きな影響を与えることが分かった。そのため、ケーブルボルトによる事前補強・先行支保を検討するためには、ケーブルボルトの付着強度・剛性を考慮した解析的検討が必要であると考ええる。

今回の試験では、ボルトとグラウト間の付着特性を主として検討したが、ボルトの支保効果は周辺地山の条件にも大きく左右されるため、今後、拘束圧（地山の剛性）の効果、グラウトと地山のせん断特性や定着長の検討とともに、原位置での検証などを行い、ケーブルボルトの実用化を図っていく予定である。

なお、室内試験において使用したケーブルボルトは東京製綱㈱殿からの提供または試作して頂いたものです。ここに、謝意を表します。

参考文献

- (1)財高速道路技術センター（1996）：第二東名・名神トンネルに関する技術的検討の現況と今後への展望、平成8年5月講演会資料、日本道路公団監修
- (2) Benmokrane, B., Chennouf, A. and Ballivy, G. (1992) : Study of bond strength behaviour of steel cables and bars anchored with different cement grouts, Rock Support in Mining and Underground Construction, Proceedings of the international symposium on rock support, pp.293-301.
- (3) Yazici, S. and Kaiser, P.K. (1992) : Bond strength of grouted cable bolts, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.29, No.3, pp.279-292.
- (4) Kaiser, P.K., Yazici, S. and Nose, J. (1992) : Effect of stress change on the bond strength of fully grouted cables, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.29, No.3, pp.293-306.
- (5)清水則一, Kaiser, P.K., Diederichs, M.S. and Hutchinson, D.J. (1997) : 海外におけるケーブルボルトの設計法、トンネルと地下、第28号、4号、pp.43-52.
- (6) Starfield, A.M. and Cundall, P.A. (1988) : Towards a Methodology for Rock Mechanics Modelling, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.25, No.3, pp.99-106.
- (7) Itasca Consulting Group Inc. (1996) : FLAC Version 3.3 Manual