

付着応力分布に基づくケーブルボルトの 引抜定着特性に関する研究

A STUDY ON THE BOND PROPERTIES OF CABLE BOLTS BASED ON BOND STRESS DISTRIBUTION

木梨秀雄¹⁾ 大内一²⁾ 大西有三³⁾

Hideo KINASHI Hajime OUCHI Yuzo ONISHI

The purpose of this study is to evaluate the bond properties of cable bolts based on bond stress distribution during pull-outs, and to clarify local bond stress – slip behavior for numerical models. Pull-out tests of cable bolts have been conducted in laboratories, using varying levels of grout strength, confining stiffness, embedment length, grout thickness and the number of strands.

Results of the experiment have demonstrated that the cable bolt was pulled out rotationally along with the strand, and the bond strength, based on local bond distribution, did not rely on grout strength, confining stiffness, etc.

Using the bond parameters of S_{bond} and K_{bond} that were obtained from the experiment, we have simulated the result of a field pull-out test by UDEC. Results of the analysis have indicated that the axial force distribution coincides with the results of the field measurement.

Key Words : cable bolts, bond property, pull-out test, bond model

1. はじめに

近年、ケーブルボルトは、大断面トンネルの先進導坑などからの先行支保や、長尺鏡ボルトなどへの適用が注目されている。また、地下発電所等の大規模地下空洞においては、主要支保工であるPSアンカーの代替工法としての適用が検討されている^{2),3)}。これは、PSアンカーが先端定着式で緊張力を導入するのに対し、ケーブルボルトでは緊張力を用いず全面接着式で支保し、PSアンカーに比べてコストダウンと工期短縮を図ろうとするものである⁴⁾。

ケーブルボルトの支保機能を大きく支配する要因として、打設時の定着特性が重要となる。この定着特性は、ストランドや定着材の特性、および地山特性など種々の影響を受けることが考えられる。ケーブルボルトの定着特性を調べる方法としては、従来は現場等において引抜き試験を実施し、引張り荷重と引張端での変位量から付着剛性、引抜き荷重から付着強度を評価している。ただし、現場では実験条件や計測の精度等に制約があることや種々の不確定要因があるものと考えられる。ケーブルボルトの定着特性に関する既往の研究としては、Hyettら⁵⁾や、石塚ら⁶⁾の引抜き試験結果に基づく評価があげられる。Hyettら⁵⁾は岩盤の拘束効果を炭素鋼管などで置き換えて、引抜き時の拘束効果や定着材の影響によるケーブルボルトの定着強度を調べている。石塚ら⁶⁾は拘束管を用いた室内引抜き試験により、インデント付きケーブルボルトと通常のケーブルボルトの付着強度を比較している。しかし、これら既往の研究は、引抜き荷重と引張端での変位に基づく見かけの付着特性を評価するものである。付着応力は定着区間内で分布し、各点ですべり量も異なってくるものであり、本質的には局所の付着応力とすべりに着目すべきである。そこで本研究では、定着区間内の局所的な付着応力とすべりの関係に基づいてケーブルボルトの付着特性を検討し、付着モデルを提案する。すなわち、現場引抜き試験よりも不確定要因をできるだけ排除した室内試験により付着特性を調べ、数値解析に用いる付着特性のパラメータを評価するとともに、ケーブルボルトの設計に資するデータを取得する。さらに、数値解析に用いる付着モデルを提案する。その後、原位置引抜き試験結果に適用し、計測および解析結果の比較を実施した。

1) 正会員 工修 (株)大林組 技術研究所 2) フェロー会員 工博 (株)大林組 技術研究所

3) フェロー会員 Ph.D. 工博 京都大学大学院工学研究科

2. 試験方法および試験条件

1) 室内引抜き試験の概要

室内引抜き試験の概要を図-1に示す。図-1のように、ケーブルボルトは岩盤の拘束効果を考慮するため、剛性をパラメータとした種々のパイプ内にセメントグラウトを充填して定着した。引抜き荷重の負荷にはセンターホールジャッキを用い、ロードセルにより荷重を計測した。引抜き時にボルト・グラウト間で生じる相対変位は、グラウト内に埋め込んだM6全ねじボルトおよびターゲット板を用い、引張端および自由端の両者において計測した。同時に、ケーブルボルト直交面内での変位を計測し、引抜きに伴うケーブルボルトの回転量を把握した。なお、図-1中の↑印の位置（引張端から12cm）では固定治具によりケーブルボルトの回転を拘束した。定着区間の5カ所には図-2のように1点当たり2枚のひずみゲージを配置し、引抜き時の軸力分布を把握した。なお、各々のひずみゲージについては、予めケーブルボルト単体で較正を行った。

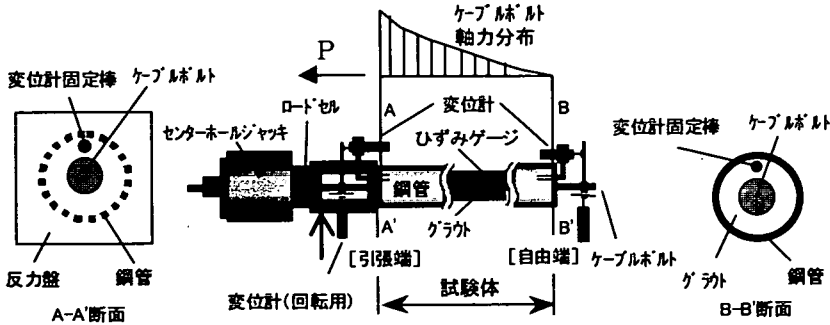


図-1 引抜き試験装置の概要

2) 試験体

試験体一覧を表-1にまとめて示す。用いたケーブルボルトはいずれも裸より線で、径がφ17.8mm（19本より線;SWPR19N）を基本とし、比較のためφ15.2mm（7本より線;SWPR7BN）を用いた。グラウトの水セメント比は試験練りの一軸圧縮試験結果や現場での使用実績などを踏まえて45, 50, 60%の3種類とした。グラウト打設後の養生期間は14日とし、実験時一軸圧縮強度はそれぞれ、48, 40, 32MPaであった。

拘束管の内径は42～46mmで、管の材質と肉厚によりCH～B級程度の岩盤の拘束剛性を想定した。現場での削孔径 d_c と岩盤の弾性係数 E_R およびポアソン比 ν_R から半径方向剛性 K_{rr} は次式で求められる⁵⁾。

$$K_{rr} = \frac{2E_R}{(1+\nu_R)d_c} \quad (1)$$

一方、外径 d_o 、内径 d_i 、弾性係数 E_s およびポアソン比 ν_s からの管の半径方向剛性 K_{re} は次式で求めることができる⁵⁾。

$$K_{re} = \frac{2E_s}{(1+\nu_s)} \left\{ \frac{d_o^2 - d_i^2}{d_i \left[(1-2\nu_s)d_i^2 + d_o^2 \right]} \right\} \quad (2)$$

式(1)で求めた拘束剛性 K_{rr} と岩盤等級の関係は表-2のようになる。表-2で K_{rr48} および K_{rr80} はそれぞれ想定削孔径48mmと80mmに対応している。これらの検討結果から、本試験ではアルミ、銅および2種類の炭素鋼を用いて、表-1に示したように拘束剛性の異なるケースを設定した。また、拘束管の内径によりグラウト厚が異なるケースの比較も実施した。つぎに、定着長は端部の影響を受けず比較的均等な付着特性を得るために30cm以上で（Hutchinsonら⁷⁾）、かつ全線で付着切れが起こるように500mmを基本ケースとし、比較のため定着長が1000mmのケースも実施した。さらに、大規模地下空洞などにおいて1孔に複数のボルトを打設することを考慮し、本実験では打設した3本のボルトを同時に引抜くケースも実施した。

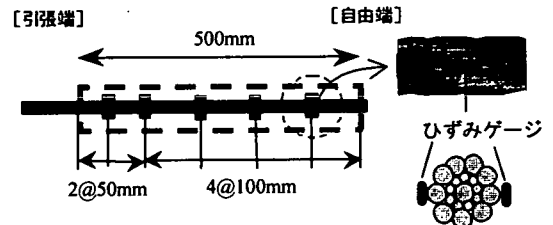


図-2 ひずみゲージの配置

表-1 試験条件の一覧

ボルト種類	定着材 W/C (%)			拘束管		定着長	CASE	着目点	
	45	50	60	種類	剛性	内径	(mm)		No.
					(MPa/mm)	(mm)			
φ17.8				アルミ	258	46	500	1-1	同一定着材で拘束管の剛性を 変化
				銅	525	46		1-2	
				炭素鋼1	933	44		1-3	
				炭素鋼2	1,497	42.2		1-4	
				アルミ	258	46	500	2-1	同一定着材で拘束管の剛性を 変化
				銅	525	46		2-2	
				炭素鋼1	933	44		2-3	
				炭素鋼2	1,497	42.2		2-4	
				アルミ	258	46	500	3-1	同一定着材で拘束管の剛性を 変化
				銅	525	46		3-2	
				炭素鋼1	933	44		3-3	
				炭素鋼2	1,497	42.2		3-4	
				炭素鋼3	577	80.1	1,000	4	定着長大、No.5と比較
				炭素鋼3	577	80.1	500	5	削孔径大、No.2-3と比較
φ15.2			炭素鋼1	933	44	500	6-1	ボルト径小、No.2-3と比較	
φ17.8 ×3T			炭素鋼3	577	80.1	500	7	群効果をNo.5と比較	

表-2 岩盤等級と拘束剛性 K_{rf} の関係

岩盤等級	B	C_H	C_M	C_L	D
E_R (GPa)	> 8	4-8	1.5-4	< 1.5	
K_{rf48} (MPa/mm)	> 267	133-267	50-133	< 50	
K_{rf80} (MPa/mm)	> 160	80-160	30-80	< 30	

3. 試験結果と考察

1) 引抜き時の基本的な挙動

試験結果より、典型的な荷重-相対変位、回転角の関係を図-3に示す。図-3では引張り荷重に対し、引張端と自由端それぞれで計測したボルト・グラウト間の相対変位を示している。ただし、両端における回転角については、引張端の相対変位に対してプロットしている。図-3のように、引抜き開始から①まではボルト・グラウト間の相対変位がほとんどない状態で荷重が増加するが、①～②の過程では引張端から自由端へと付着切れが進行し、引張端での相対変位が徐々に増加する。そして、②では自由端の変位が発生すると同時にボルトが回転し始める。一方、引張端の回転量も同様に載荷後漸次増加している。このように、ケーブルボルトは回転しながら引き抜かれることがわかる。そこで、引抜き変位と回転による変位成分の関係を図-4に示す。ここで、回転による変位成分は、(回転角/360°) × (より線1周期分の長さ) として算出した。図-4より、引張端では引抜き相対変位の60%程度が回転成分であるのに対

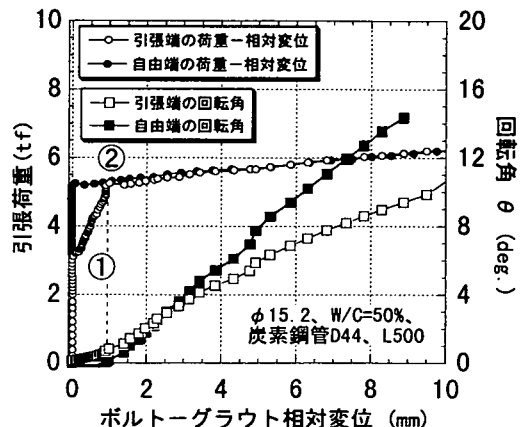


図-3 荷重-変位、回転角挙動の一例

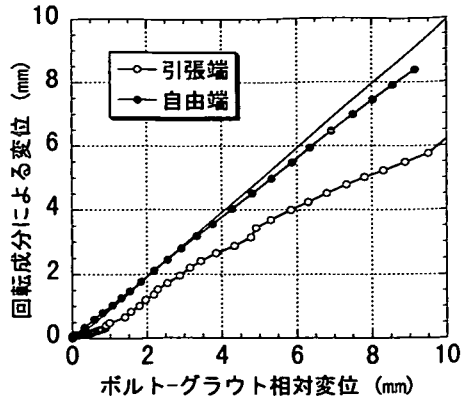
し、自由端では引抜き変位のほぼ100%が回転成分であり、ボルトがよりの方向に回転しながら引抜かれているものと考えられる。つまり、引張端では並進と回転が混在し、自由端ではほぼ回転のみで引き抜かれる。

2) 荷重－変位関係

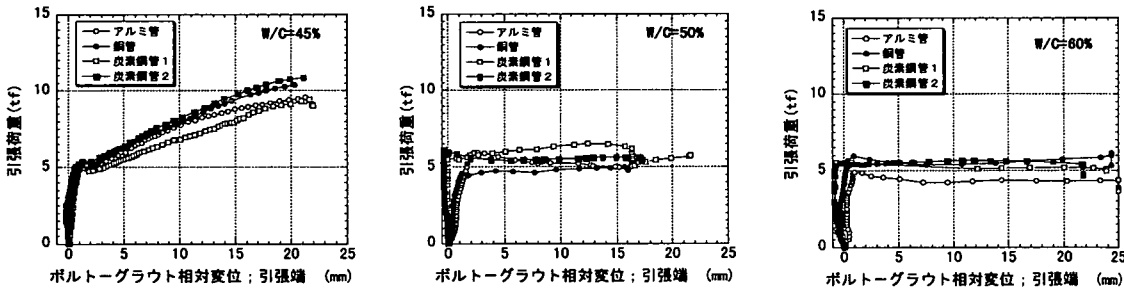
次に、φ 17.8mmを用いたグラウトのW/Cが45%、50%および60%の場合の荷重－相対変位関係をまとめて示したものが図-5である。図-5より、グラウトのW/Cが45%および50%、60%では荷重－変位関係に特徴的な違いが認められる。すなわち、W/C=50%と60%の場合は図-3の②点（降伏強度）を過ぎた後の荷重増加はほとんどないが、W/C=45%の場合は荷重が増大している。また、拘束管の剛性による付着強度等の違いはほとんどない。この理由として、付着強度が回転変位による摩擦抵抗に支配されており、並進変位によりもたらされるグラウトの破壊やダイレーションが発生しにくいことが考えられる。

3) グラウト強度と付着強度

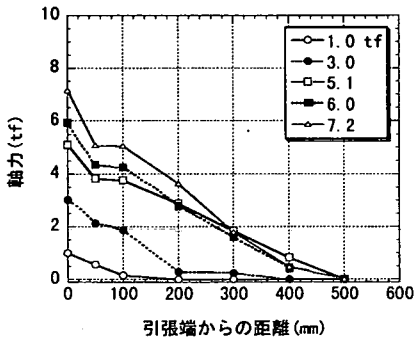
ここでは、ケーブルボルトの微小定着区間での軸力差を付着面積で除した付着応力度について考える。まず、図-2のようにケーブルボルトに配置したひずみゲージより、引抜き時の軸力分布が得られる。軸力分布の一例（No. 1-1、W/C=45%、アルミ管）を図-6に示す。図-6のような各点間の軸力差に区間毎の付着面積φπL（φ：ボルト公称径、L：ゲージ区間距離－防水加工長さ）を考慮すれば、付着応力度を求めることができる。また、引張端または自由端で測定したボルト－グラウト間の相対変位から、ケーブルボルトの引張り軸方向伸びを差し引くことにより、各点におけるすべり量を算出できる。ただし、ケーブルボルトの引張り軸方向伸びと軸力の関係は、別途行った引張り試験により検定している。この結果得られた付着応力度τとすべりsの関係を全点について示すと図-7のようになる。図-7のような各点のτ－s関係より、降伏応力度τ_yと最大応力度τ_{max}を求め



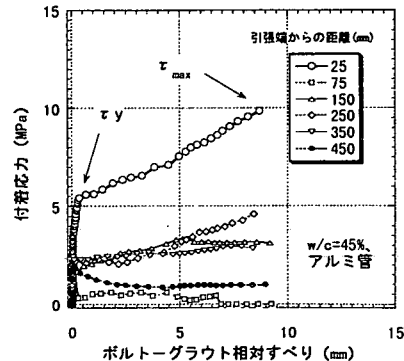
図－4 引抜き変位と回転変位の関係



図－5 引抜き時の荷重－変位関係の比較



図－6 軸力分布の一例



図－7 付着応力とすべりの関係

る。この τ_y と τ_{max} をボルト線上で示したものがそれぞれ図-8、9である。図-8で τ_y に着目してみると、引張端を除き全体としてほぼ一定と見なすことができる。また、拘束管の種類による差は認められない。引張端では、グラウトと反力盤の接触状況が不確定なため、反力盤の拘束効果の有無などにより τ_y のバラツキが大きくなっている。一方、図-9に示す τ_{max} については、引抜き荷重の増大に伴い反力盤、拘束管の弾性変形やグラウトの変形により引張端で反力盤とグラウトが接触し、拘束効果を受け増加しやすい。ただし、 $W/C=50$ および60%のように比較的グラウト強度が小さい場合は、引張端で拘束効果を受ける前にグラウトの破壊が起こるため τ_{max} が増加しにくいものと考えられる。したがって、引張端部の影響を除いた区間において、実質的な付着強度を評価してよいと考えられる。

4) 削孔径・定着長と付着強度

内径Dが44mmおよび80.1mmのケースで削孔径（グラウト厚さ）の影響による付着特性の比較を行った。また、定着長の影響について基本ケースの0.5mに対し1.0mで比較した。いずれも、グラウトは $W/C=50\%$ で拘束管は炭素鋼管1を用いている。これらについて付着応力度 τ_y と τ_{max} の分布で比較したものが図-10である。ただし、横軸は定着長で除して無次元化している。図-10によれば、削孔径や定着長による違いは引張端の τ_{max} に出ているが、引張端以外の点では τ_y 、 τ_{max} に差が認められない。したがって、今回の試験条件の範囲では、削孔径および定着長により付着強度が影響を受けないものと考えられる。

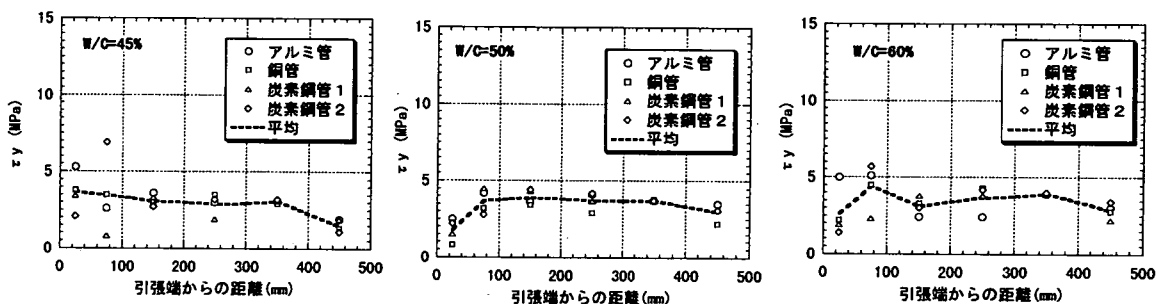


図-8 降伏応力度 τ_y の分布

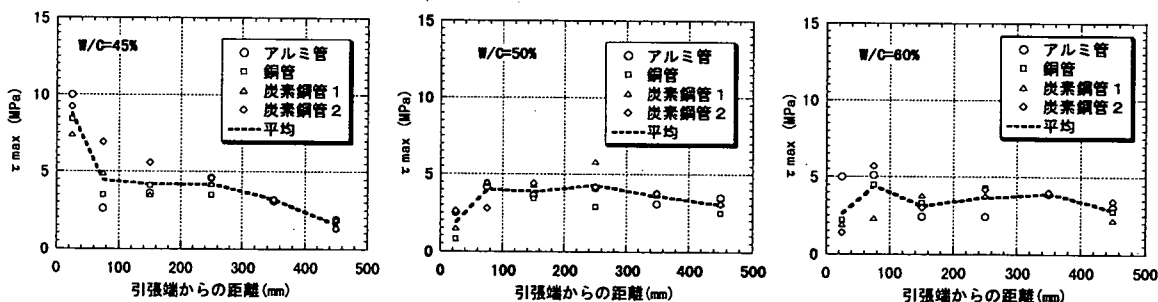


図-9 最大応力度 τ_{max} の分布

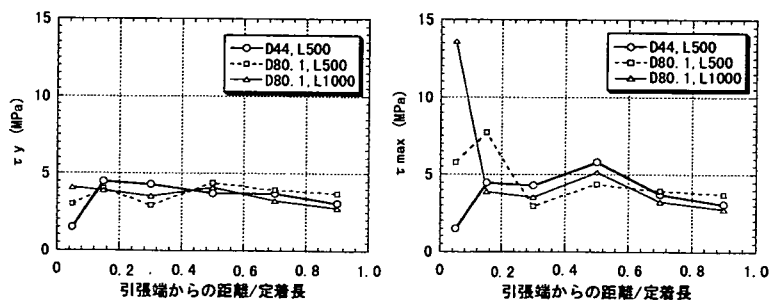


図-10 削孔径、定着長による τ_y 、 τ_{max} の比較

5) 打設本数と付着強度

ここでは、1孔に複数のボルトが打設されときの付着特性を、単独の引抜き試験から評価できるかに着目してみた。3本打設するケース（以下では3Tと略す）は、図-11のようにボルトを三角形に配置し、内径を80.1mmとした。これらとボルトが1本の場合の荷重－変位関係および付着応力分布を図-12、図-13にそれぞれ示す。図-12で、3Tの場合の引張荷重は1本当たりで示した。この荷重－相対変位関係では、3Tの方が引抜き荷重はやや小さくなっている。しかし図-13によれば、3Tの場合各ストランド間でややばらつきがあるものの、平均値が示すように、 τ_y 、 τ_{max} ともボルト1本の場合と有意な差が認められない。

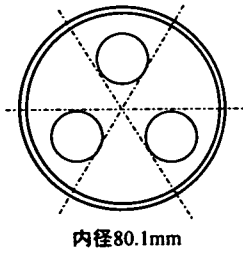


図-11 3T ボルトの配置

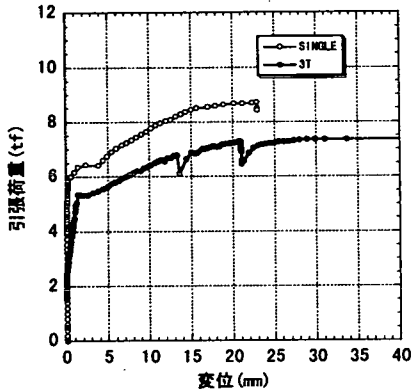


図-12 打設本数による荷重－変位関係の比較

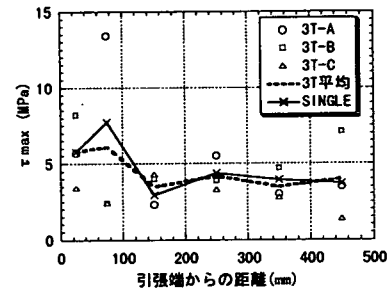
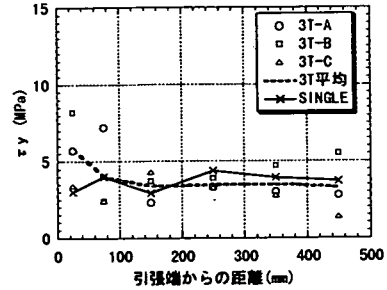


図-13 打設本数による τ_y 、 τ_{max} の比較

6) 回転拘束と反力盤の影響の考察

ケーブルボルトの引抜き試験において引張端で回転を拘束する場合に、付着強度の増大することが考えられる。また、上記で考察したように引張端での反力盤による拘束の影響も考えられる。これらは引抜き試験方法の問題でもある。そこで、別途引抜き試験を追加実施した。図-14に示すように、追加試験ではアムスラー試験機を用い鋼管およびボルトそれぞれを直接チャックで掴み、回転拘束しながら引張った。したがって、引張端には反力盤がない。この際、ボルト掴み位置と引張端の距離 l を0、12、および40cmの3ケースとした。グラウトはW/C=45%で、拘束管として炭素鋼2を用いた。これら3ケースの荷重－相対変位関係を図-15に示す。図-15によれば、降伏荷重は掴み位置 l に依存せず、8tf程度である。降伏後は、 $l=0$ cmが他よりやや大きいものの、大差はない。つぎに、付着強度 τ_y 、 τ_{max} の分布を示したものが図-16である。図-16より τ_y については、掴み位置 l による明確な差がない。 τ_{max} については、引張端から75mmの位置で $l=0$ cmが大きくなっているが、それ以外の箇所では差がない。この結果、回転拘束の影響は引張端近傍でやや認められるが、引張端からはなれた箇所では回転しながら

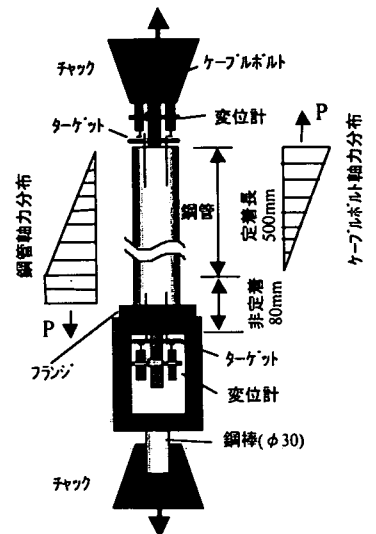


図-14 追加引抜き試験の装置概要

ら引き抜けるため、端部回転拘束の全体への影響が少ないことがわかる。一方、反力盤の影響について、3.5)節までに述べたケース($l=12\text{cm}$)と比較してみる。図-16の $\tau_{\max}$ 分布で示すように、本試験の場合は引張端部で $\tau_{\max}$ が大きくなったが、反力盤のない追加試験ではこの傾向は認められない。なお、全体として追加試験の τ_y 、 $\tau_{\max}$ が本試験に比べて大きくなっているが、これは鋼管の軸方向応力が引張状態にあり、ポアソン効果により内部グラウトに拘束応力が作用するためと考えられる。この点は図-17に示すように鋼管に貼り付けたひずみゲージから求めた拘束応力の分布により確認することができた。すなわち、引抜き時に鋼管を引張るため軸方向応力 σ_{ax} が発生し、ポアソン効果による内部グラウトへの拘束応力 σ_r が付着力を増大させたと考えられる。以上の追加試験結果から、端部回転拘束の影響はほとんどないこと、および反力盤の影響により、引張端近傍で付着応力が増加する場合があることが確認された。

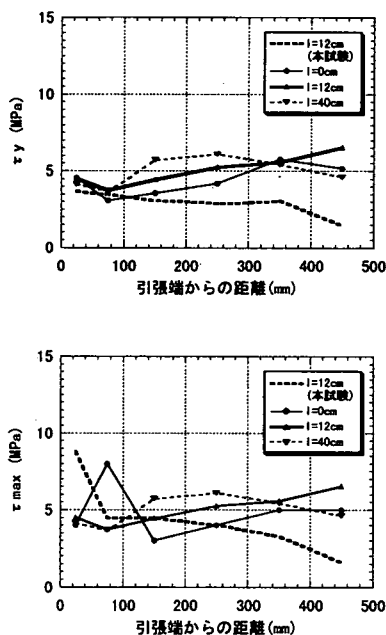


図-16 回転拘束位置による τ_y 、 $\tau_{\max}$ の比較

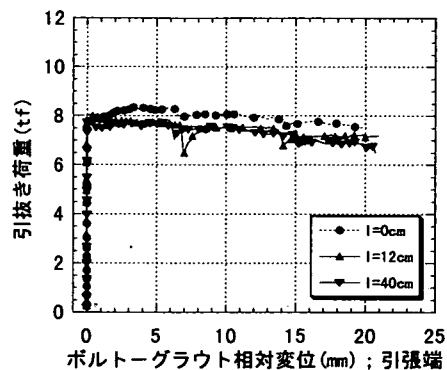


図-15 ボルト掘み位置と荷重-変位関係

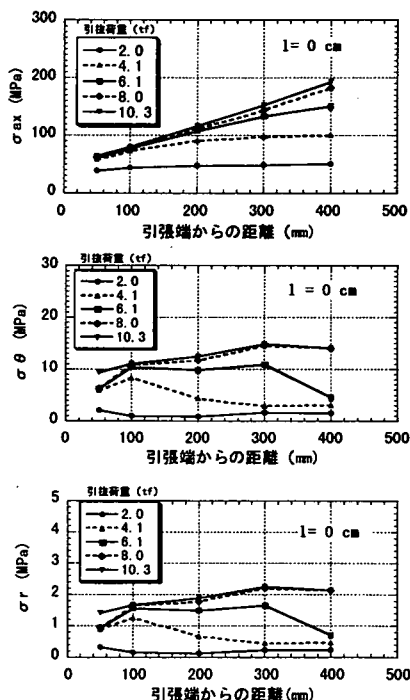


図-17 鋼管の応力分布

4. 付着特性モデルと現場引抜き試験結果のシミュレーション

1) 付着特性モデル

図-7に示した $\tau-s$ 関係を概略すると図-18のように2つのタイプの挙動に分けられる。ここで、引張端部において降伏後も付着応力が増加して $\tau_{\max} > \tau_y$ となる挙動は、反力盤の影響によって与えられるものであり、本質的なものではない。したがって、付着特性モデルとしては $\tau_{\max} = \tau_y$ のタイプが妥当と考えられる。そこで、本研究で得られたケーブルボルトの降伏応力度 τ_y 、および降伏時のすべり S_y をボルト線上の分布でまとめると図-19のようになる。この結果、 τ_y の平均値として3.4MPa、および S_y の平均値として0.08mmが得られた。

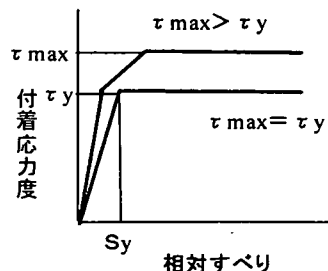


図-18 付着モデルの概念

2) 現場引抜き試験のシミュレーション

上記の付着特性モデルを用いて DEM 解析コード UDEC により原位置の引抜き試験結果⁹⁾を解析した。原位置では、φ 15.2mm・定着長 7m で引抜き試験を実施した。UDEC では、Brady ら⁹⁾によるケーブル要素を用いた。得られた付着特性モデルに基づき、ケーブル要素に用いる単位長さ当たりの付着強度 S_{bond} および定着剛性 K_{bond} を次式で求めることができる。

$$S_{bond} = \phi \pi n \tau_y, \quad K_{bond} = \frac{S_{bond}}{S_y} \quad (3)$$

ここで、 ϕ はボルト公称径、 n は打設本数である。評価結果に基づいて、式(3)より求めた $S_{bond} = 163 \text{ kN/m}$ 、および $K_{bond} = 2 \text{ GN/m/m}$ を解析入力値として用いた。計測および解析結果の軸力分布を比較したものが図-20 である。解析では、現場での軸力計設置箇所(20cm 区間)を無定着として考慮した。図-20 より両者の軸力分布は概ね良好な一致を示していることがわかる。

5. おわりに

本研究ではプレーンなケーブルボルトの室内引抜き試験を実施し、定着部の局所的な付着応力分布に基づいて定着特性を評価し、付着特性モデルを提案した。

- ①ケーブルボルトの引抜き挙動は回転を伴い、引抜き変位の多くがより線に沿った回転成分に支配される。
- ②今回の試験条件の範囲では、付着強度はグラウト強度・拘束剛性・削孔径・定着長・打設本数に依存しない。
- ③付着特性モデルとしては、 $\tau_y = 3.4 \text{ MPa}$ 、 $S_y = 0.08 \text{ mm}$ をパラメータとしたバイリニアな関係を提案する。
- ④得られた付着特性を用い、原位置引抜き試験の解析を行った結果、軸力分布の計測値をほぼ再現できた。

今後は、ケーブルボルトの支保効果と地下空洞の安定性について研究を進める予定である。

参考文献

- 1) 清水則一、P. K. Kaiser, M. S. Diederichs, D. J. Hutchinson: 海外におけるケーブルボルトの設計法、トンネルと地下 vol. 28(4)、pp. 43 ~ 52、1997
- 2) 木梨秀雄・天野悟: ケーブルボルトの作用機構と支保効果に関する考察、トンネル工学研究論文・報告集、第7巻 pp. 15-22、1997
- 3) Kinashi H., Amano S., Tsuchihara H., Yoshioka H.: Numerical study on reinforcement effect of cable bolt in discontinuous rock mass, Proc. of the 1st. Asian Rock Mech. Symp. A.A.Balkema, pp. 553 ~ 558, 1997
- 4) 土原久哉、天野悟、木梨秀雄: ケーブルボルトの山岳トンネルおよび地下空洞の支保部材としての適用、土と基礎 Vol. 45, No. 5 pp. 17 - 19、1997
- 5) Hyett A.J., W.F.Bauden, R.D.Reichert: The effect of rock mass confinement on the bond strength of fully grouted cable bolts, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 29, pp. 503 - 524, 1992
- 6) 石塚与志男、安部透: ケーブルボルトの付着抵抗性と解析モデルに関する研究、トンネル工学研究論文・報告集、第7巻、pp. 7 - 14、1997
- 7) Hutchinson D.J. and M.S.Diederichs: Cablebolting in underground mines, BiTech Publishers, pp. 86, 1996
- 8) 木梨秀雄、天野悟、大内一: 引抜き試験結果を利用したケーブルボルトの定着特性評価について、土木学会第53回年次講演会Ⅲ-B、pp. 204 ~ 205、1998
- 9) Brady, B. and Lorig, L.: Analysis of Rock Reinforcement Using Finite Difference Methods. Computers and Geotechnics, pp. 123 ~ 149、1988.

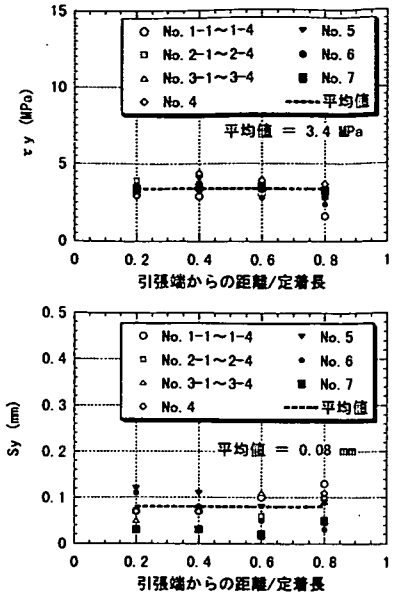


図-19 τ_y および S_y 分布のまとめ

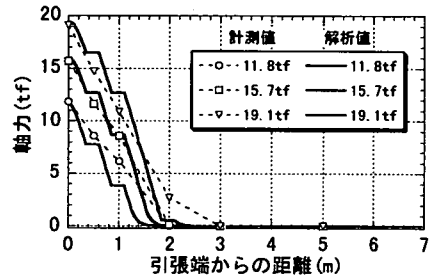


図-20 計測および解析の軸力分布比較