

全面定着型ケーブルボルトの付着抵抗特性と岩盤補強への適用に関する研究

石塚 与志雄 安部 透 今津 雅紀 宮澤 和夫
(技術研究所) (技術研究所) (土木事業本部) (土木事業本部)

Studies of Bond Strength Behavior and Application for Rock Reinforcement of Fully Grouted Cable Bolts

by Yoshio Ishizuka, Tohru Abe, Masanori Imazu and Kazuo Miyazawa

Abstract

Cablebolting will be very useful supports and reinforcements of underground rocks for its high flexibility. But a bond strength of plain PC strand is lower than one of rockbolts. We have clarified that bond strengths of indented PC strand cablebolts greatly increase compared with those of plain PC strand by laboratory and in-site experimental studies. For the rational design of cablebolt support systems, bond strengths and stiffnesses on bolt/grout interface should be determined with in-site test because bond properties are influenced by geological condition and so on. In this study, the determination procedure of design properties with pull-out tests is studied and proposed. Indented PC strands are installed for a pattern bolting and bond properties are determined by in-site pull-out tests in the rock tunnel. Consequently, field measurements and numerical analysis results show that indented PC strand is very useful as rock reinforcements.

概 要

ケーブルボルトは、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が、ロックボルトと比較して付着強度が小さいとの課題がある。本研究では、付着強度の増加を期待してPC鋼線にインデント(凹)を施したPC鋼より線を試作し、室内・原位置試験によりその効果を検証した。また、岩盤補強の設計に際しては、ボルト/グラウト間の付着強度・剛性は、地山や施工状況に影響されるため、原位置で評価するのが好ましい。そこで、引き抜き試験から設計定数(付着強度、付着剛性)を決定する方法について提案した。これらの結果を踏まえ、インデント付PC鋼より線をトンネル現場のパターンボルトとして打設して軸力等の計測を行うとともに解析的検討を行い、岩盤補強材としての有用性を明らかにした。

§ 1. はじめに

ケーブルボルト(PC鋼より線)は、フレキシブルで狭い施工スペースからの施工が容易であることから、大断面トンネルにおける先行支保や断層部での長尺ボルトによる補強、また、ロックボルトや地下発などにおけるPSアンカーの代替として期待されている。しかしながら、国内での使用実績が少ないことから、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⁾。

グラウトとの付着強度特性は、異形棒鋼などの通常のロックボルトでは異形部分(節)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のが主であることが報告されている²⁾³⁾⁴⁾。このため、通常のPC鋼より線はロックボルトに比べて

付着強度が低い²⁾との課題がある。また、ケーブルボルトの付着特性は、ボルト自体の力学的性質、グラウトとの付着特性、グラウト材の変形・強度特性に加えて、地山とグラウト間の付着特性や地山の剛性など地山条件に影響される。

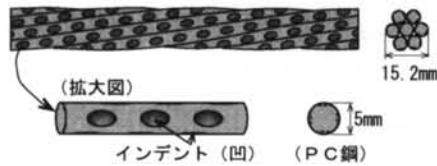
海外においては、ケーブルボルトは鉱山等で広く使用されており、付着強度を増加させるために表-1に示すような様々なケーブルボルトが提案され、使用されている⁵⁾⁶⁾。このような工夫により、付着強度を通常のPC鋼より線の最大3倍まで高めることができるが、大きな穿孔径が必要であったり、連続リールとして搬入できない、自動打設機の使用が難しい、コスト増などの短所がある。

そこで、本研究では、通常のPC鋼より線と付着抵抗の増加を期待して新たに試作したインデント付き(PC鋼線に凹状の窪みを施したもの)のPC鋼より線(以下、インデント付と言う)について、定着長および地盤剛性

種 類	断 面 形 状		付着強度 (比)	長 所	短 所
	縦断面	横断面			
① Plain Strand P C鋼より線			1.00 (基準)	・入手が容易、安価、定着が簡単 ・連続リールとして運送、搬入可 ・小さい穿孔径に挿入可 ・プレート、表面アンカー装着が容易	・付着強度が非常に小さい ・剛性の小さい岩盤、拘束応力が低下場合は付着性が低下 ・長い定着長が必要
② Epoxy coated Strand Eポキシコーティング P C鋼より線			1.30	・P C鋼より線と同様、定着が簡単 ・耐腐食性、長寿命 ・付着性がやや高い	・プレート固定の際にはEポキシ被覆を剥がす必要あり ・高価
③ Buttoned Strand ボタン付 P C鋼より線			2.50	・拘束応力減少による付着低下が少ない ・ボタン部でのアンカー効果 ・プレート装着が容易	・付着がボタン設置箇所に依存 ・大きな穿孔径が必要 ・ボタン部での空隙発生
④ Birdcaged Strand 鳥籠型 P C鋼より線			1.35～ 1.80	・わずかな費用増 ・付着強度、剛性が高い ・孔外へのグラウト材の流動を抑える	・ボルト挿入、定着が難しい ・連続リールとしての運送が不可 ・大きな穿孔径が必要 ・ケーブルホルダー自動打設機が使用不可
⑤ Nutcaged Strand ナット付 P C鋼より線			2.00～ 3.00	・ナット寸法により適切な付着特性を得ることが可 ・小穿孔径	・工場での連続コイルへのナット装着が不可 ・大ナットでは破壊モードの一貫性がなくなる
⑥ Bulbed Strand 球根状 P C鋼より線			1.60～ 2.50	・安価、定着が簡単 ・連続リールとして運送、搬入可 ・プレート、アンカー部の加工が容易 ・バネ間隔、径が変更が容易	・省グラウトでは付着向上は期待できない(推奨水セメント比=0.4)

表－１ 様々なケーブルボルトと特徴⁵⁾

をパラメータとした室内、原位置の引き抜き試験を行い、インデント付の有効性を検討した。また、トンネル支保、岩盤補強の設計の際に必要なケーブルボルトの設計定数（付着強度・剛性）の決定方法に定まった方法がないのが現状のため、室内・原位置試験と解析的検討により、その決定方法についても検討した。これらの結果を踏まえ、インデント付を実際のトンネル現場においてパターンボルトとして打設し、軸力・内空変位等を計測するとともにトンネル掘削・支保の解析的検討を行い、インデント付の支保効果について検討した。



図－１ P C鋼線に設けたインデント

種 類	縦断形状	横断形状
P C鋼より線		 外径：15.2mm
インデント付 (凹0.18mm)	長径 2.92mm、短径 1.87mm 	 外径：15.2mm
インデント付 (凹0.33mm)	長径 4.50mm、短径 2.50mm 	 外径：15.2mm

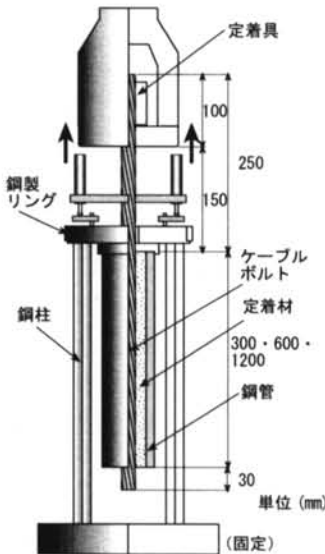
表－２ P C鋼より線とインデント付

§ 2. ケーブルボルトの付着抵抗特性

2.1 室内引き抜き試験の概要

2.1.1 インデントの形状・配置

図－１にP C鋼線に設けたインデントを示す。インデントは楕円形の凹形状をし、径5mmのP C鋼線表面に偏りがないように配置・加工（インデントはP C鋼線加工過程で簡易に施すことが可能）してある。試作したインデント付は、表－２に示すように凹深さが0.18mm（長径2.92mm、短径1.87mm）と0.33mm（長径4.50mm、短径2.50mm）の２種類、インデントのピッチは共に約8mmである。P C鋼より鋼はこのP C鋼線7本をよりあわせて製作したものであり、直径は15.2mmである。



図－２ 室内引き抜き試験の概要

インデントを施すことによりボルト自体の機械的性質がやや低下（引張荷重が272kNから261kNに、弾性係数が197GPaから185GPaに）が、JIS規格を十分に満足する。単位重量は1.10kg/mである。なお、異形棒鋼（D22）の機械的性質は引張荷重が217kN、弾性係数が206GPa、単位重量が3.04kg/mである。

2.1.2 試験装置・方法

室内引き抜き試験装置の概要を図-2に示す。地山を模擬した金属管等にケーブルボルトを設置（定着長300mm）し、グラウト材を充填し、材令3日で試験を行った。引き抜きは変位制御（0.5mm/min）とした。なお、グラウト材にはモルタルグラウト（プレミックスドライモルタル、水セメント比0.40）を用いた。

当試験では金属管には真鍮管（弾性係数1.01E+11N/m²、外径60.0mm、内径51.4mm）とし、計測は、荷重と引き抜き変位に加えて真鍮管に発生する内圧の把握を目的として管外周のひずみ（ひずみゲージ：管口から3, 8, 13, 23cm点）を測定した。

2.2 引き抜き試験結果（インデントの効果）

3種類のPC鋼より線の付着応力-変位関係を図-3に、付着強度、剛性の一覧表を表-3に示す。ここで、付着応力は軸荷重（kN）を定着長（0.3m）で除した値であり単位長さ当たりの付着強度（kN/m）である。付着強度は最大軸荷重から、付着剛性は付着応力変位関係の線形部分の接線勾配として算定した。

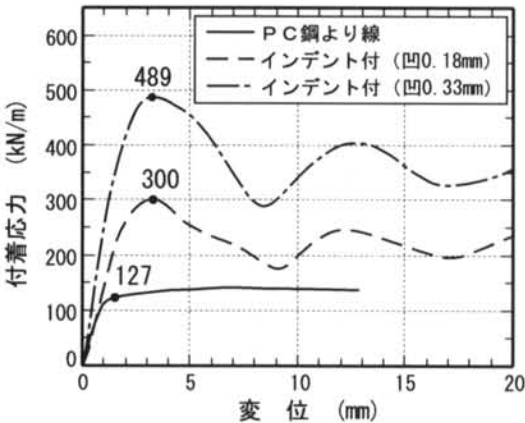


図-3 付着応力-変位関係（室内試験）

種 類	軸荷重 (kN)	付着強度 (kN/m)	付着剛性 (kN/m/m)
P C 鋼より線	37.7	127	1.37×10^5
	41.4	138	1.94×10^5
インデント付 (凹0.18mm)	90.0	300	1.56×10^5
	85.9	287	2.02×10^5
インデント付 (凹0.33mm)	147	489	2.63×10^5
	151	502	1.75×10^5

表-3 付着強度、剛性一覧表（室内試験）

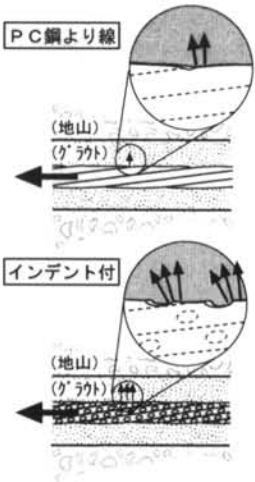


図-4 ダイレイテンシー内圧の発生メカニズム

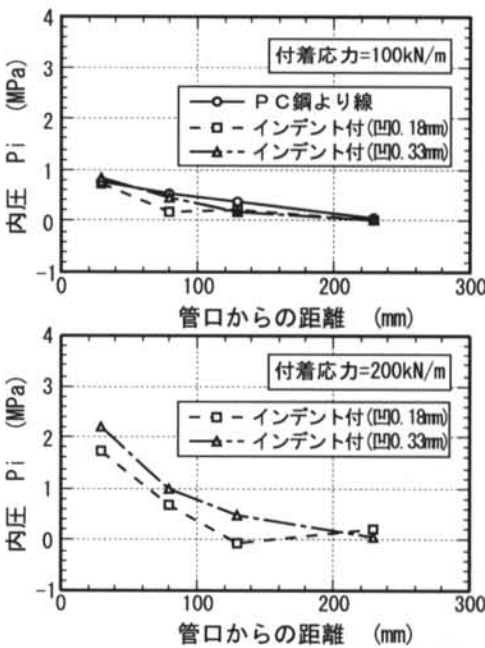


図-5 ダイレイテンシー内圧の発生状況

付着強度は通常のPC鋼より線に対して、凹0.18mmインデント付では2.2倍、凹0.33mmインデント付では3.7倍と飛躍的に増大する。また、付着剛性も増大しておりインデントの効果が顕著に現れている。

インデントによる付着強度の増加は、インデントによるラフネス増加によるPC鋼線とグラウト間のせん断強度増大に加えて、図-4に示すように引き抜き時のボルト／グラウト接触面のダイレイテンシー内圧^⑨の発生が大きな効果になっているものと考えられる。図-5に管外周のひずみ値から換算した内圧分布を示す。付着応力100 kN/mでは引き抜き変位が小さいため発生内圧に大きな差はないが、200 kN/mになると、インデント付では非常に大きな内圧発生となる。このように、インデント付では、引き抜き変位が大きくなるに従ってインデント部



図-6 地盤剛性模擬管（6種類）

管種類	弾性係数 E (N/m ²)	ポアソン 比 ν	外径 $2b$ (mm)	内径 $2a$ (mm)	厚肉 t (mm)	等価地盤剛性 (N/m ²)
鋼鉄 2	2.10×10^{11}	0.300	60.2	43.4	8.4	7.71×10^{10}
鋼鉄 1	2.10×10^{11}	0.300	73.0	53.0	10.0	7.56×10^{10}
真鍮	1.01×10^{11}	0.350	60.0	51.4	4.3	1.95×10^{10}
アルミニウム	7.03×10^{10}	0.345	59.8	55.0	2.4	7.66×10^9
ナイロン樹脂	3.19×10^9	0.400	90.0	50.0	20.0	1.78×10^9
塩化ビニル	3.33×10^9	0.380	60.0	52.6	3.7	5.66×10^8

表-4 地盤剛性模擬管の諸元

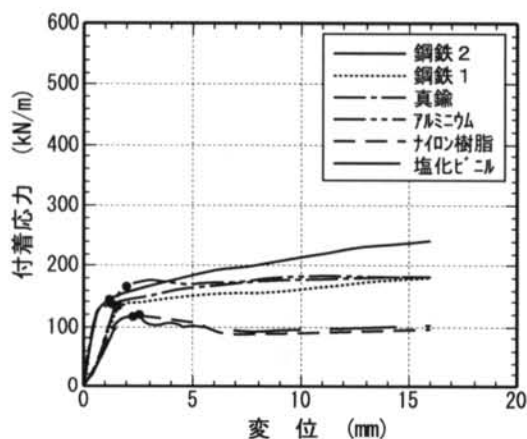


図-7 付着応力-変位関係（P C 鋼より線）

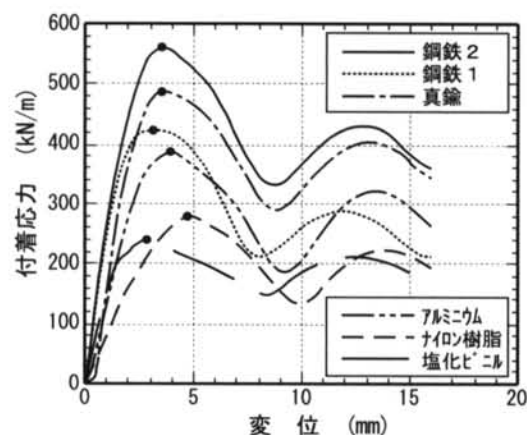


図-8 付着応力-変位関係（インデント付）

のダイレイタンスー効果が大きくなり、ボルト／グラウト接触面での垂直応力（内圧）を増大させ、付着強度を増大させることになる。

管種類	P C 鋼より線		インデント付	
	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)
鋼鉄 2	146 150	1.98×10^5 2.32×10^5	560 698	2.75×10^5 2.75×10^5
鋼鉄 1	109 134	1.27×10^5 0.97×10^5	425 343	2.63×10^5 2.34×10^5
真鍮	127 138	1.37×10^5 1.94×10^5	489 502	2.63×10^5 1.75×10^5
アルミニウム	166 174	1.17×10^5 1.01×10^5	401 387	1.84×10^5 1.52×10^5
ナイロン樹脂	155 117	1.01×10^5 0.83×10^5	279 259	0.85×10^5 1.07×10^5
塩化ビニル	119 131	0.72×10^5 0.81×10^5	230 240	0.90×10^5 1.50×10^5

表-5 地盤剛性効果の試験結果一覧表

2.3 地盤剛性の影響

2.3.1 検討方法

ダイレイタンスー内圧はグラウトの変形・強度特性に加えて地山の变形特性（剛性）に大きく依存する。そこで、各種の管で地盤剛性を模擬し、地盤剛性と付着強度の関係を定量的に検討した。

硬岩から軟岩までの地山の剛性を模擬するために、図-6に示すような6種類の管を選定した。各管の諸元と等価地盤剛性を表-4に示す。ここで、等価地盤剛性は、内圧作用時の厚肉円筒理論から得られる管の半径方向変位と半無限地盤の円孔の半径方向変位を等しいとして算定される半無限地盤の剛性（弾性係数）である。塩化ビニルが軟岩、真鍮以上が硬岩の弾性係数に相当する。

ケーブルボルトはP C 鋼より線とインデント付（ $\Phi 0.33\text{mm}$ ）の2種類とし、管外周に貼付したひずみゲージの計測値からボルト／グラウト間に発生する内圧（ボルトに対する拘束圧）を算出した。

2.3.2 試験結果

図-7、8に付着応力-変位関係を、表-5に付着強度、剛性を示す。いずれの管種においても、インデント付はP C 鋼より線より大きな付着応力を発揮するが、最大引き抜き荷重（最大付着応力）は管種（地盤剛性）に

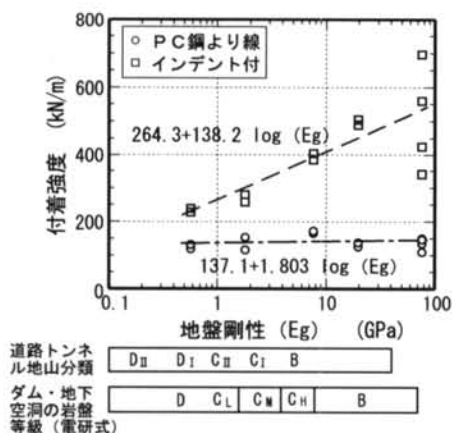
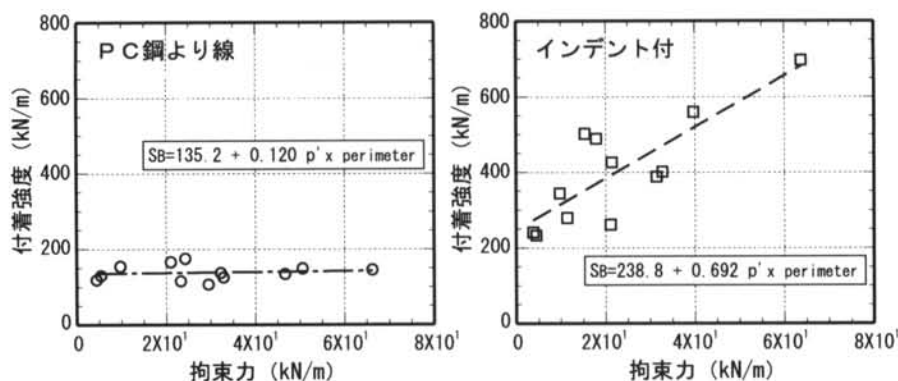


図-9 地盤剛性と付着強度の関係



図－10 付着強度と拘束圧の関係

よって大きく異なる。

地盤剛性と付着強度の関係を図－9に示す。図中、参考として対応する地山分類、岩盤等級を示す。通常のP C鋼より線は地盤剛性が高くなるとわずかに増加するが、剛性の影響は少なくほぼ一定と考えられる。一方、インデント付は、付着強度 (SB) は、地盤剛性 (Eg) を対数とした軸上で線形関係を示し、次式で表すことができる。

$$SB = a + b \log (Eg) \quad (1)$$

拘束圧がボルト／グラウト間の付着強度に与える影響を整理すると図－10のようになる。ここで、拘束圧は、発生した内圧 (管外周のひずみゲージ値から算出) にボルト周長を乗じた値 (拘束力) で評価した。P C鋼より線は、発生内圧が小さく拘束力に依存しない。一方、インデント付の付着強度は、拘束圧の関数として表現することができる。図中、 p' は拘束圧、perimeterは周長である。このように、インデント付では、地盤剛性が大きいほど引き抜き時に拘束力 (ダイレイタンスー内圧) が増大し、結果として付着強度が増大する。

このように、インデント付は地盤剛性をパラメータとして地山に応じた付着強度の評価が可能である。インデント付は、通常のP C鋼より線と比較して大きな付着強度を発揮するが、付着強度は地盤剛性に大きく依存するため、岩盤補強、トンネル支保にインデント付を適用する際には、適用する地山の特性 (地山等級、剛性) を考慮する必要がある。

§ 3. 定着長と解析モデル・定数の検討

ケーブルボルトの設計に際しては、定着長と耐力の関係や設計定数 (付着強度・剛性) の決定方法が重要である。そこで、室内、原位置の引き抜き試験によりボルト長の効果について検討するとともに、引き抜き試験の解析的検討により、設計定数の決定方法について検討した。

3.1 室内試験

供試体は、§ 2で記した試験 (図－2参照) と同様、地山を鋼管 (外径73.0mm、内径53.0mm) で模擬し (グラウト材: プレミックスドライモルタル、水セメント比0.40、材令3日)、定着長を以下の3ケースとした。

定着長 : 0.1、0.6、1.2m

なお、最大引き抜き荷重は、ボルト自体の耐力 (261kN) を考慮して、240kNとした。

図－11にケーブルボルトの軸荷重－変位関係を、表－6に試験結果の一覧表を示す。ここで、付着強度は引抜荷重 (kN) を定着長 (0.3、0.6、1.2m) で除した単位長さ当たりの付着応力 (kN) である。また、軸剛性 (Eax: 単位MN/m) は軸荷重－変位関係の初期弾性部分の接線勾配、付着剛性は軸剛性を定着長で除した単位長さ当たりのボルト／グラウト部分の剛性 (MN/m/m) である。

(1) 引き抜き耐力・付着強度

通常のP C鋼より線の付着強度は、定着長が長くなるとやや大きくなるが、121～135kN/mの範囲にあり、定着長によらずほぼ一定と考えることができる。この付着強度から、P C鋼より線自体の引張耐力 (261kN) に相当する定着長を計算すると約2mとなる。

インデント付では、0.6mで非破壊 (引き抜き荷重240kN以上) となったため、付着強度の定着長効果の定量的な検討はできないが、引き抜き荷重は、0.3mで116kNに対して、0.6mでは240kN以上であり2倍以上の耐力を発揮することが確かめられた。そのため、インデント付でも短い定着長で得られた付着強度値で長いボルトの引き抜き耐力 (付着力) を評価することは安全側の検討になるものと考えられる。

(2) 軸剛性・付着剛性

軸剛性は定着長が長くなると若干大きくなるが、P C鋼より線 (50.9～52.4MN/m)、インデント付 (83.1～84.1MN/m) とともに定着長に依存せず、ほぼ同一と見なすことができる。一方、付着剛性を軸剛性／定着長で計算すると、表－6に示すように、付着剛性は定着長に大きく依存し、定着長が長くなると大幅に低下する。

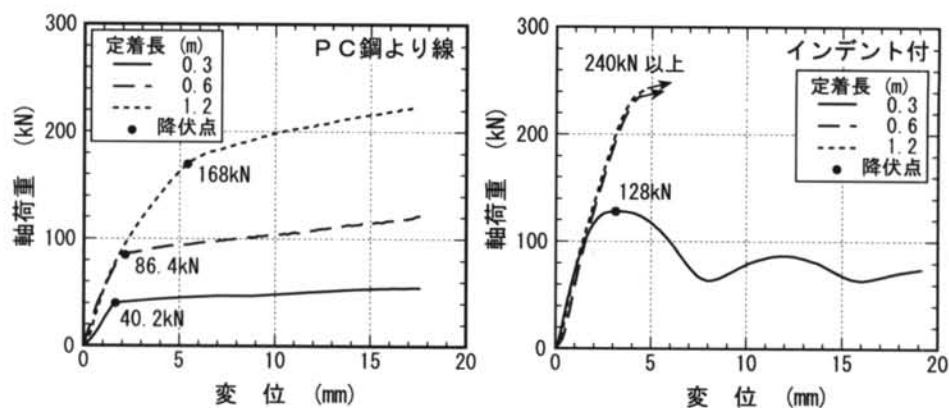


図-11 軸荷重－変位関係（定着長効果・室内試験）

定着長 (m)	PC鋼より線				インデント付			
	引抜荷重 (kN)	付着強度 (kN/m)	軸剛性 (MN/m)	付着剛性 (MN/m/m)	引抜荷重 (kN)	付着強度 (kN/m)	軸剛性 (MN/m)	付着剛性 (MN/m/m)
0.3	40.2	134	50.9	170	128	427	83.1	277
0.6	86.4	144	51.2	85.3	(>240)	----	83.6	139
1.2	168	140	52.4	43.7	(>240)	----	84.1	70.1

表-6 定着長効果の室内試験結果一覧表

以上より、付着強度 (sbond) については定着長に関わらず一定値として設定することができるが、付着剛性 (kbond) は定着長に大きく依存するため、設定に際しては何らかの方法で定着長を考慮する必要があるものと考えられる。

3.2 原位置試験

原位置引き抜き試験の概要を図-12に示す。試験サイトは岐阜県吉城郡神岡町の神岡鉱山の坑道内である。定着長は以下の3ケースとした。

定着長 : 1.0、3.0、6.0m

なお、穿孔径は64mm、グラウト材は室内試験と同様、材令は約1日、最大引き抜き荷重は147kN(15ton)とした。

図-13に各定着長における軸荷重－変位関係を、表-

7に引抜荷重と軸剛性を示す。定着長1.0mでは、インデ

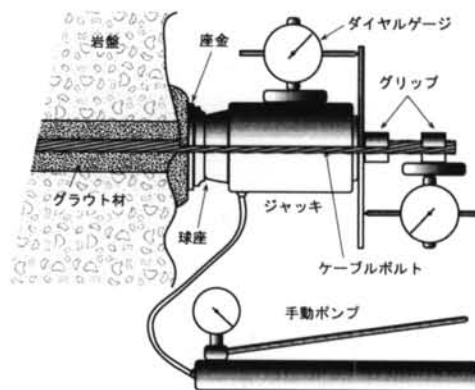


図-12 原位置引き抜き試験の概要

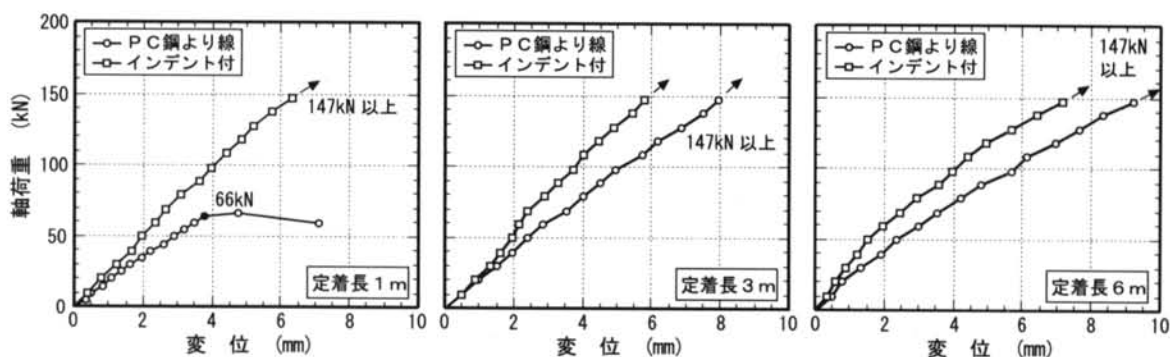


図-13 軸荷重－変位関係（原位置引き抜き試験結果）

定着長 (m)	P C鋼より線		インデント付	
	引抜荷重 (kN)	軸剛性 (MN/m)	引抜荷重 (kN)	軸剛性 (MN/m)
1.0	66	17.0	(>147)	23.2
3.0	(>147)	18.5	(>147)	25.7
6.0	(>147)	16.0	(>147)	20.6

表-7 定着長効果の原位置試験結果一覧表

ント付では147kN (15tonf) 以上の耐力を発揮するのに対して、P C鋼より線では66kN (7tonf) である。3.0m、6.0mではともに147kN以上となり、定着長が大きくなるに従って引抜耐力も増大する。P C鋼より線では1.0mと3.0mを比較すると、引抜耐力は3倍以上となっており、室内試験結果とよい対応を示す。また、軸剛性は、P C鋼より線では16.0～18.5MN/m、インデント付では20.6～25.7MN/mとなり、室内試験結果と同様、定着長に依存せず、ほぼ一定と考えることができる。P C鋼より線では16.0～18.5MN/m、インデント付では20.6～25.7MN/mとなり、室内試験結果と同様、定着長に依存せず、ほぼ一定と考えることができる。

3.3 解析モデルと定着長の検討

3.3.1 解析モデル

設計に用いる定数(付着強度、付着剛性)の決定方法の検討を目的として、室内・原位置試験の解析を行った。

ボルトの解析モデルは、ボルト／グラウト間の付着特性(付着強度、付着剛性)を考慮した構造要素として、FLACのケーブル要素⁷⁾を用いた。ケーブル要素は、図-14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(s_{bond})と拘束圧に依存する摩擦抵抗(摩擦角 ϕ)の関数、弾性範囲内のせん断変形は付着剛性(k_{bond})として表わされる。

引き抜き試験の解析モデルを図-15に示す。境界条件は、岩盤上面のY軸方向変位を固定してボルト

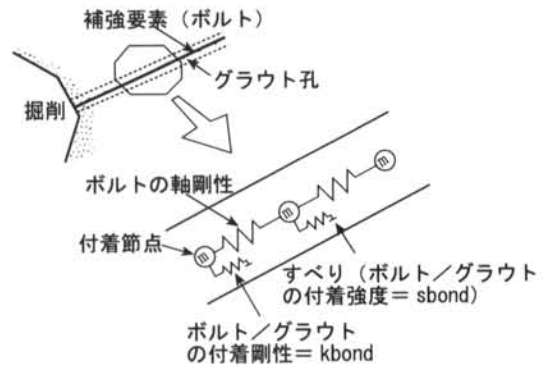


図-14 全面定着型ボルトの解析モデル概念図

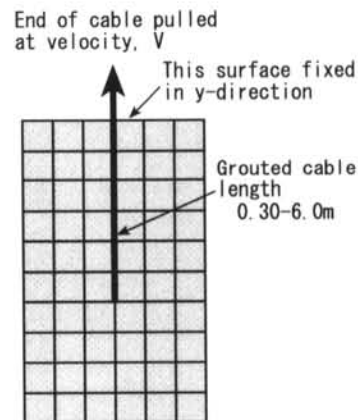


図-15 引き抜き試験の解析モデル図

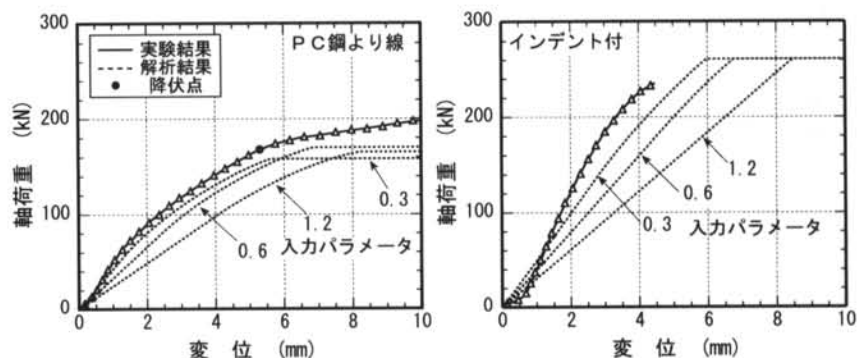


図-16 定着長1.2mの解析結果

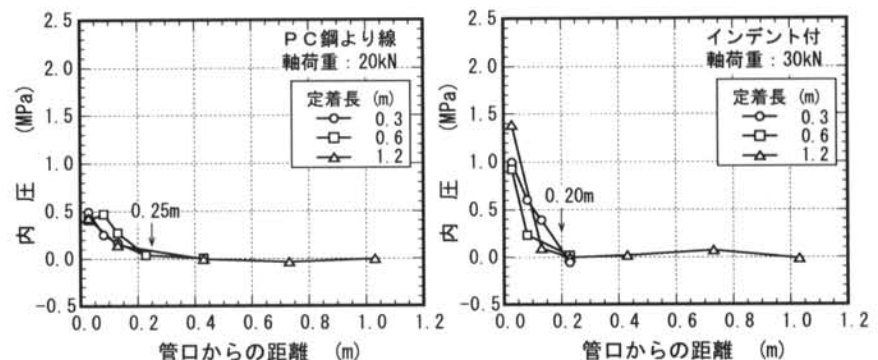


図-17 定着長とダイレイタンスー内圧発生状況

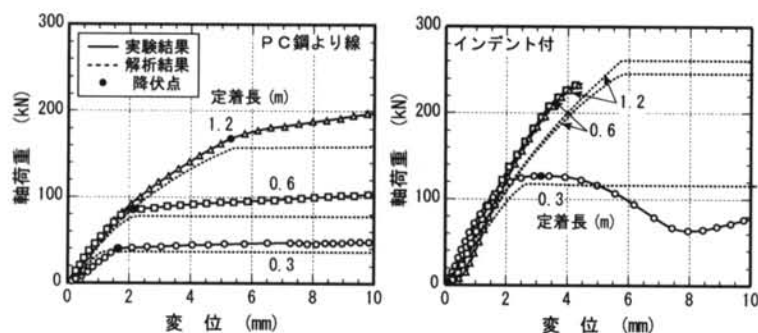


図-18 有効定着長を考慮した解析結果

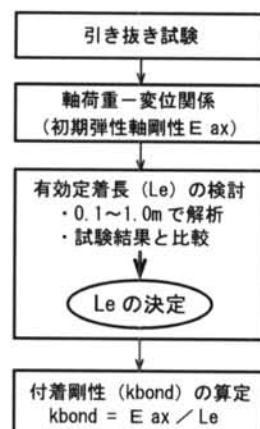


図-19 有効定着長 (Le) と付着剛性の決定フロー

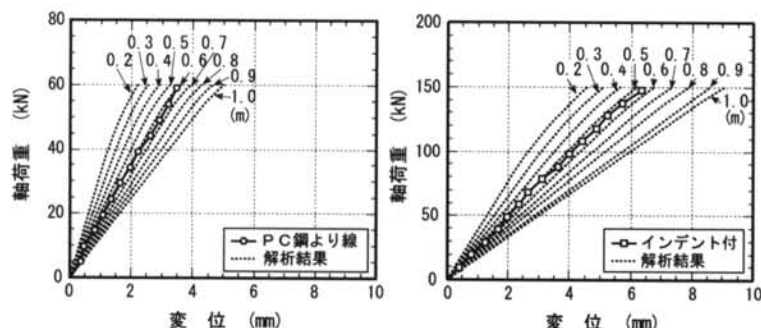


図-20 有効定着長をパラメータとした解析 (1m 原位置引き抜き試験)

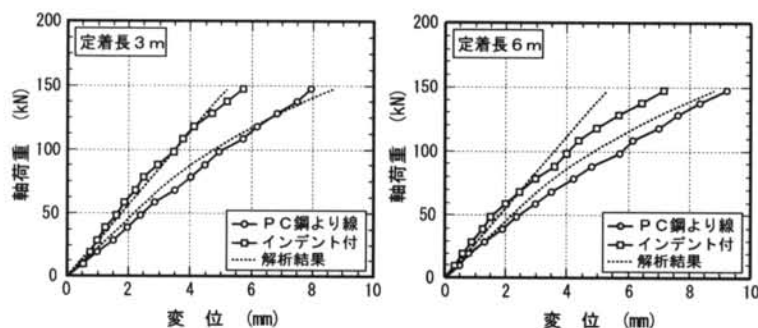


図-21 ボルト長 3, 6m の原位置引き抜き試験の解析

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 $\rho=2.0\text{g/cm}^3$ 、ボルトの定数は引張耐力 261kN 、弾性係数 191GPa とした。

3.3.2 定着長と付着剛性

(1) 室内試験の解析検討

定着長 0.3, 0.6, 1.2m の試験で求めた付着強度と付着剛性 (初期軸剛性を定着長で除した値) を入力定数として、定着長 1.2m の数値解析を行った。インデント付では、0.6m 以上で非破壊のため定着長 0.3m 試験で得られた付着強度を用いた。解析結果と試験結果の比較を図-16 に示す。

最大軸荷重は、付着強度が定着長によらずほぼ一定のためほぼ同一であるが、変位挙動 (勾配) は付着剛性が定着長の増大とともに低下するため、大きく異なる。

(2) ダイレイタンスー内圧による有効定着長の検討

軸荷重が比較的小さい荷重下における鋼管の外周のひ

ずみから換算したダイレイタンスー内圧の発生状況を図-17 に示す。ダイレイタンスー内圧は、定着長によらず PC 鋼より線では 0.25m、インデント付では 0.20m までの範囲で発生するが、それ以遠ではほとんど発生しない。

ダイレイタンスー内圧が発生している範囲が、主に付着抵抗に寄与していると考えられることから、その範囲 (長さ) を有効定着長 Le として付着剛性算定の際の定着長とする。有効定着長を基に算出した付着剛性による解析結果を図-18 に示す。PC 鋼より線、インデント付とも解析結果は試験結果とよい対応を示し、有効定着長による付着剛性の設定が有効であることが確認できた。

(3) 付着剛性の決定フローと原位置引き抜き試験

原位置における付着強度は、引き抜き試験の最大引き抜き耐力を定着長で除することにより求めることができる。一方、付着剛性は、前述 (2) の検討より、図-19 に示すフローで評価することができる。すなわち、有効定着長 Le をパラメータ (0.2~1.0m で 0.1m ピッチで変化させる) とした引き抜き試験の解析を行い、試験結果と比較することにより Le を決定し、付着剛性を算定する方法である。

1.0m の原位置引き抜き試験結果を用いて、有効定着長を求めてみる。図-20 に定着長を 0.2 から 1.0m まで 0.1m ピッチに変化させた解析結果と試験結果を示す。この結果、今回試験を行った原位置での有効定着長は、PC 鋼より線で 0.5m、インデント付で 0.6m となる。この有効定着長 Le から求めた付着剛性を入力定数とした解析結果 (3m と 6m の引き抜き試験の解析) を図-21 に示す。解析結果と試験結果は概ねよい対応を示し、図-19 に示した

有効定着長 (Le) の評価と付着剛性の決定方法の有効性が検証された。

§ 4. 現場への適用

本研究で検討したインデント付PC鋼より線の現場への適用として、実際のトンネル現場でパターンボルトとして打設し、軸力・内空変位等を計測するとともにトンネル掘削・支保の解析的検討を行い、ケーブルボルトによるトンネル支保効果について検討した。

4.1 試験・計測地点概要と計測結果

(1) 試験・計測地点

ケーブルボルトのパターンボルト打設と計測を行ったのは、白亜紀〜古第三紀の花崗岩類で節理はやや発達しているが良好な硬岩地山（日本道路公団の地山分類でB級）で、トンネル断面が幅11.8m、高さ7.9m、支保工は吹付けコンクリート厚さ5cm、ボルト長3m（延長方向間隔2.0m、周方向間隔1.5m：1断面9本）である。図-22にトンネル断面と支保工および軸力計設置位置（天端と左右側壁上部の3カ所、測点は壁面から0.5、1.25、2.0、2.75mの4点）を示す。

(2) 計測結果

図-23に計測結果を示す。変位は、天端沈下3.0mm、水平内空変位4.0mm、軸力は天端 (CB-1) の1.25m点で9.82kN、側壁左上部 (CB-2) の0.5m点で5.20kNとなった。軸力はケーブルボルトの引張耐力 (261kN) と比較して小さくかつ変位も安定した結果を得た。

4.2 設計定数の決定とトンネル掘削・支保解析

(1) 引き抜き試験と設計定数の決定

引き抜き試験に供したボルトは、表-7に示すように2種類のケーブルボルト（通常 (JIS規格) のPC鋼より線、インデント付と）とねじり棒鋼（ロックボルト）の3種類である。定着長は1.0m、穿孔径は42mm、グラウト材はプレミックスドライモルタルとし、材令3日で試験を行った。引抜最大荷重はボルト自体の引張耐力を考慮して196kN (20ton) とした。

図-24に3種類のボルトの軸荷重－変位関係を示す。PC鋼より線の引抜荷重は115kNに対して、インデント付とねじり棒鋼は196kN以上の引抜荷重を示した。

付着剛性は、図-19に示す決定フローに基づき、定着長をパラメータとした解析を行い、有効定着長 Le を求めた。この結果、PC鋼より線とインデント付ではLe=0.6m、ねじり棒鋼ではLe=0.4mとの結果を得た。この結果から算定した付着剛性を表-8に示す。なお、付着強度は定着長が1.0mのため、引き抜き荷重値がそのまま

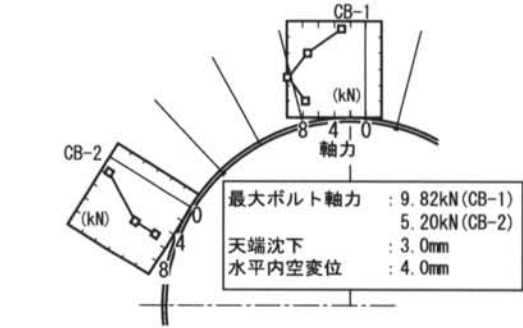
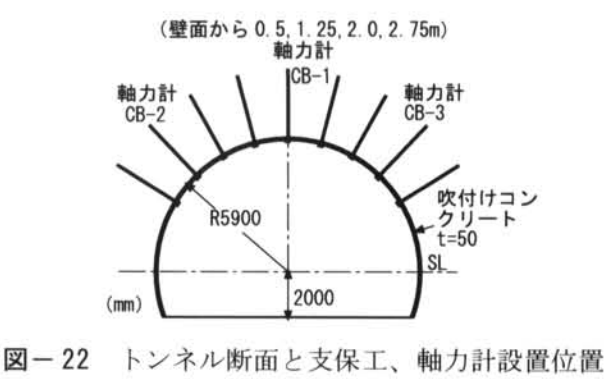


図-23 計測結果

種 類	縦断面	横断面
PC鋼より線	外径：15.2mm	
インデント付	外径：15.5mm	
ねじり棒鋼	外径：23.8mm	

表-7 原位置引き抜き試験のボルト種類

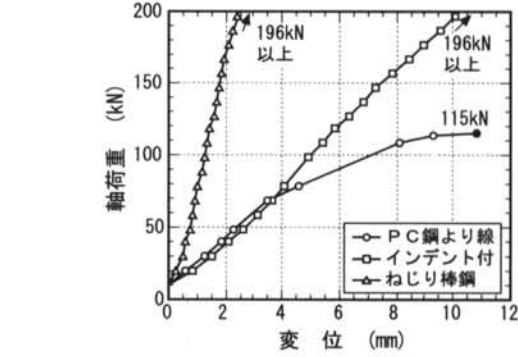


図-24 軸荷重－変位関係

	引抜荷重 (kN)	付着強度 (kN/m)	軸剛性 (MN/m)	有効定着長 Le (m)	付着剛性 (MN/m/m)
PC鋼より線	115	115	16.7	0.6	27.8
インデント付	(>196)	196	22.3	0.6	37.2
ねじり棒鋼	(>196)	196	95.0	0.4	238

表-8 原位置引き抜き試験結果と設計定数

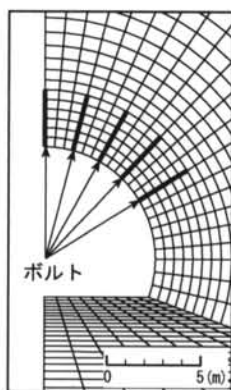


図-25 解析モデル図

付着強度となる。インデント付とねじり棒鋼の引き抜き荷重が196kN以上のため、付着強度を196kN/mと設定した。

(2) トンネル掘削・支保解析

解析モデルを図-25に示す。解析では、2次元解析を考慮し、50%の掘削応力解放後にボルトを設置して残りの50%を解放する方法とした。初期地圧は土被りを188mで等方状態、地山物性は地山分類Bの代表的な値(弾性係数4.91GN/m²、粘着力2.94MN/m²、内部摩擦角50度、ポアソン比0.25、密度2500kg/m³)とした。ボルトはインデント付PC鋼より線とねじり棒鋼の2種類である。

図-26にインデント付とねじり棒鋼の主応力、ボルト軸力分布と天端沈下、水平内空変位値を示す。両者ともボルト/グラウト間での付着切れの発生はない。最大軸力は、ねじり棒鋼で20.92kN、インデント付で5.90kNであり、ともにボルトの引張荷重値(インデント付261kN、ねじり棒鋼227kN)と比較してかなり余裕がある。計測結果と比較すると、側壁上部(5.20kN)とはよい対応を示すが、天端(9.82kN)より小さい値となる。一方、変位は、天端沈下が4.38mm、水平内空変位が4.35mmと計測結果と比較すると天端(計測値は3.0mm)でやや大きい値を示すが、計測結果と解析結果は概ねよい対応を示す。

解析では軸力と変位に差が生じる。特に軸力には3.5倍の差が生じる。これは、インデント付はねじり棒鋼と比較して、ボルト断面が小さいのに加えて付着剛性が小さいためであり、ロックボルトと比較すると変形量は大くなり、軸力は小さくなる。

〈参考文献〉

- (財) 高速道路技術センター: “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, 1996.
- Benmokrane, B., Chennouf, A. and Ballivy, G.: “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, 1992.
- Yazici, S. and Kaiser, P.K.: “Bond strength of grouted cable bolts”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.29, No.3, pp.279-292, 1992.
- Kaiser, P.K., Yazici, S. and Nose, J.: “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, 1992.
- 清水則一, Kaiser, P.K., Diederichs, M.S. and Hutchinson, D.J.: “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, 1997.
- Hutchinson, D. J. and Diederichs, M. S.: “Cablebolting in Underground Mines”, BiTech Publishers Ltd. (Canada), 1996.
- Itasca Consulting Group Inc.: “FLAC Version 3.3 Manual”, 1996.

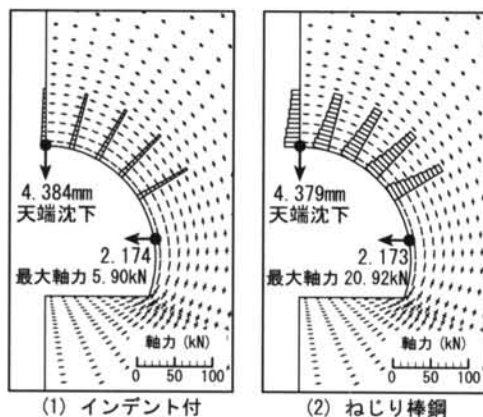


図-26 解析結果(軸力分布、変位)

§ 5. おわりに

本研究では、全面定着型ケーブルボルトの岩盤補強への適用を目的として、室内・原位置引き抜き試験、設計定数の決定方法の検討および実トンネルへの適用・計測等を行った。以下に得られた主な結果を示す。

- ① PC鋼線に0.3mm程度のインデント(凹)を施すことにより、付着強度が画期的に向上することを明らかにするとともに、トンネル現場においてパターンボルトとして打設しその支保効果を検証した。
- ② 地盤剛性と付着強度の関係を定量的に検討し、岩盤補強への適用の際の基礎データを示した。
- ③ 定着長を変化させた引き抜き試験と解析的検討から、原位置引き抜き試験結果から設計定数(付着強度、付着剛性)を決定する方法を提案した。

岩盤補強へのケーブルボルトの適用は施工性の観点から今後広範な適用が期待される。今後は、現場への適用実績を積み重ね、適宜、改良していく予定である。

謝辞

本研究において使用したケーブルボルトは東京製綱(株)殿から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。