

組紐製法による高強度繊維製ケーブルボルトの 基本特性について

中田雅夫¹・山地宏志²・松原澄行³・岡野成敏⁴・野村貢⁴

¹正会員 工修 三井建設(株) 技術本部技術研究所 (〒270-0132 千葉県流山市駒木518-1)

²正会員 工博 三井建設(株) 技術本部技術研究所 (〒270-0132 千葉県流山市駒木518-1)

³正会員 工修 ファイベックス(株) 技術部 (〒496-0924 愛知県海部郡佐屋町善太新田十割下90)

⁴正会員 三井建設(株) 土木本部土木技術部 (〒261-0023 千葉県千葉市美浜区中瀬1-9-1)

交通トンネルやエネルギー施設等に代表される地下空間利用の増大に伴って、安全で高速なトンネル掘削工法の確立が望まれている。高強度繊維製ケーブルボルトはこのような用途に適した支保部材と考えられるが、繊維製品加工の困難さも手伝って、現在のところ実用的な製品は存在しない。筆者らは、日本古来の組紐製法を採用することで、巻き取りが可能な高強度繊維製ケーブルボルトの開発を試みた。本論文は、当該繊維製ケーブルボルトの実用性を検証するために実施した各種室内実験、及び原位置試験の概要と結果を示し、その妥当性と問題点を論ずることで、今後の高強度繊維製ケーブルボルトの開発方向を検討したものである。一連の試験結果から当該の繊維製ケーブルボルトは、鋼製ケーブルボルトと同等な引張強度、せん断抵抗、並びに付着耐力を有し、特に付着特性に関しては組紐製法を採用することで、非常に良好な特性を実現することができた。

Key Words : *fiber reinforced cable bolt, kumihimo manufacturing, high strength fiber, reliable fundamental properties*

1. はじめに

交通トンネルの大断面化^(1), 2)や、複雑な形状の地下空間構築^(3), 4)さらにはトンネル掘進の高速化^(5), 6)等の要望に応じ、近年、トンネルを掘削する前に対象とする地山を事前に補強しようとする各種の工法(例えば文献7)~10)に示したような)が提案されている。ケーブルボルト工法はこのような事前補強工法の一つと位置付けられるが、その最大の特徴は簡便で柔軟な施工が可能な点にある。すなわち、ケーブルボルトはその素材として可撓な線材を使用するため、これを小さな直径に巻き取り坑内に搬入でき、任意の方向に、任意の長さのケーブルボルトを打設することが可能となる。また、そのために特殊な施工機械や技能者を必要とせず、通常のトンネル施工現場でも、ケーブルボルト線材さえあれば、即日の施工が可能である。この点でケーブルボルトは、これまでに提案されている事前補強工法に比べ、非常に簡便で安価な工法といえる。

日本においても、鉱山分野では比較的古くからケーブルボルトが用いられてきたが^(1), 12)、その多くは多数の坑道が三次元的に近接あるいは分岐する付近における使用方法であった。例えば、坑道掘削

開始前に当該坑道天端を隣接する上部の既設坑道からケーブルボルトで補強する⁽³⁾、もしくは破碎帯等の坑道弱部を周辺坑道からケーブルボルトで補強する⁽⁴⁾等である。また、鉛直に伸びる細い鉱脈を下方から上方へ掘削する際の、先受け支保としても用いられている⁽¹⁵⁾。

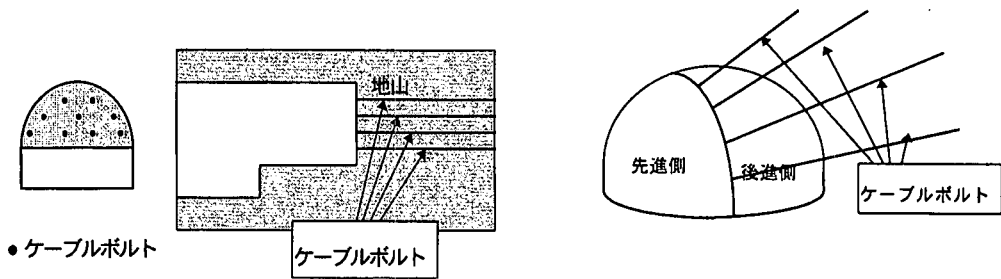
これに対し、土木トンネルにおけるケーブルボルトの使用方法是ある程度限定されたものになると考えられ、現時点では、次の二つに集約できよう。すなわち、

(1)トンネル切羽、もしくは天端の事前補強

(2)拡幅掘削前の周辺地山の補強

これらの典型的な使用例を図-1.1に示す。このうち図-1.1(A)は、切羽の自立が困難な地山において、長尺のケーブルボルトを切羽前方の鏡、ないしは天端に打設し、掘削後の切羽安定を確保しようとするもので、基本的にこれまで施工されてきた鏡ボルト工法⁽⁴⁾の打設長を長くし、施工サイクルを短縮しようとするものと考えて良いであろう。

これに対し、(B)は中壁NATMやサイロットNATMのように、同一断面内の拡幅掘削を伴う工法において、先進導坑から長尺のケーブルボルトで掘削断面、並びにその周辺岩盤を事前に補強しようとするもので



(A) トンネル切り羽の鏡ボルト

(B) 中壁NATMにおける先行支保

図-1.1 土木分野におけるケーブルボルトの利用例

あり、地山強度の低いトンネル、もしくは通常の高
速道路断面を越える大断面トンネル等に適した工法
と考えられる。

結局、前述の(A)、及び(B)のいずれにおいても
ケーブルボルトは、掘削の進行に伴って、順次切断
されていくことになるが、鋼製ケーブルボルトを使
用した場合、掘削後に残されるケーブルボルトの切
断が容易でないため、作業効率を著しく低下させ
ることが懸念される。このような場合、切削が容易な
カーボンやガラス等の高強度繊維をケーブルボルト
の素材として用いることが望ましい¹⁵⁾。

ところが、一般に構造用の繊維製品は、繊維を樹
脂で含浸させて加工するために、ロール状に巻き取
ることが難しく、狭い坑内から長尺の打設を行うこ
とが難しい。また、一般に繊維製品はせん断強度が
比較的低く、地山中に存在する不連続面の滑動等
に対する抵抗も低いものと考えられる。

結局、繊維製ケーブルボルトを採用することで、
大断面トンネル等の施工性向上を図り得るものの、
現実的には、これを実現し得る製品は存在しないも
のと判断される。

筆者らは、このような現状に鑑み、巻き取りが可
能で、ある程度のせん断剛性を有する繊維製ケー
ブルボルトを実現すべく、組紐製法による繊維製ケー
ブルボルトを開発した。本論文はその概要を示し、
その基本特性に関して実施した各種試験結果を取り
まとめ、その実用性を論じたものである。なお、本
論文は、基本的にケーブルボルト線材の特性に着目
したものであり、定着材の良否、並びに実地山にお
けるケーブルボルト挙動などに関しては以降の研究
を待つものとする。

2. 高強度繊維製ケーブルボルトの要求性能

前述の議論に基づき、ケーブルボルトに求められ

る要求性能を列記すれば以下ようになる。すなわ
ち、

- ① 所要の支保機能を発現し得ること。
- ② ケーブルボルト切断後も支保機能を維持し得ること。
- ③ 巻き取りが可能な長尺のケーブルボルトを坑内に運搬し、かつ打設に供し得ること。
- ④ 掘削時に切断が容易で、かつ掘削機械を損傷しないこと。

上述の②において、ケーブルボルト線材に具体的
に要求される特性はボルト呼径（付着特性の目安と
して）、弾性係数、引張強度、並びにせん断強度等
である。一般に、これらに要求される品質は対象と
する地山によって異なるものであり、一意に定める
ことは難しい。このため、本論文においては、比較
製品として鋼製ケーブルボルト(SWPR7A)を想定し、
これと同等性能の繊維製ケーブルボルトを開発する
こととした。

また、②に関しては実地山に打設されたケー
ブルボルト挙動を評価する必要があり、ここでは研究
の対象外とした。

3. 組紐製法による高強度繊維製ケーブルボルトの概要

カーボンやガラスなどの高強度繊維は、その断面
径が10数ミクロンと髪の毛よりも細く¹⁷⁾、そのまま
では工業用材料として使用することができない。こ
のため、多数の糸を棒状、もしくは板状に成型し、
これを樹脂で含浸することが一般に行われている¹⁸⁾。
ケーブルボルトのような繊維棒材の製法として代表
的なものは、多数の糸を平行に並べ棒状に成型し、
これを樹脂で加工するブルトーション製法¹⁸⁾であ
る。なお、ケーブルボルト等のように付着抵抗を期
待する製品に関しては、棒材の周辺に横糸をスパイ

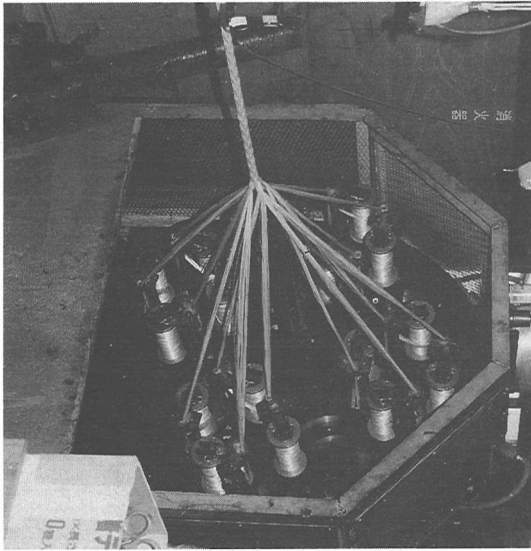


写真-3.1 組紐製法による高強度繊維製ケーブルボルトの製作状況

ラル状に巻き付けることが多い。このようなプルトルージョン製法をケーブルボルトの製法として採用した場合、付着力増強のための横糸が引き抜き力作用時に剥離しやすく¹⁹⁾、ケーブル状に巻き取ることも難しい。

今回、高強度繊維製ケーブルボルトの製法として採用した組紐製法は、日本古来の真田紐の編み方にヒントを得た製法^{19), 20)}であり、写真-3.1に示すように7つの繊維束を互いに組み合わせ、これを樹脂で含浸させる製法であり、組み上がった棒材は自然な凹凸を持つ。写真-3.2はこの組紐製法によって作成したケーブルボルトの外観を示したものである。表-3.1にカーボン繊維、アラミド繊維、及びガラス繊維を用いた際の組紐製ケーブルボルトの諸元を鋼製ケーブルボルトと比較して示す。表-3.1は比較のためいずれもケーブルボルトの公称径を15mm付近で統一したが、必要に応じては25mm径までの製造が可能となる。

これらの製品は組紐製法を採用したことによって以下のような特徴を有する。すなわち、

- ① 組紐状に予め成型されているため、巻き取り時に繊維間の分離が無く、最小1500mmの径で巻き取ることができる。
- ② ケーブルボルト表面に自然な凹凸が形成されているため、高い付着耐力が期待できる。
- ③ ケーブルボルト表面の凹凸により、鋭い突起面

表-3.1 組紐状ケーブルボルトの諸元

使用繊維	略称	公称径 mm	断面積 mm ²	単位重量 g/m	破断荷重 kN	弾性係数 MPa
カーボン	FC15	15.0	177	292	300	160,000
アラミド繊維	FA15	14.7	170	216	240	70,000
ガラス繊維	FG15	14.7	170	408	170	45,000
PC鋼より線	SMPATA	15.2	139	1101	210*	210,000

*増大荷重

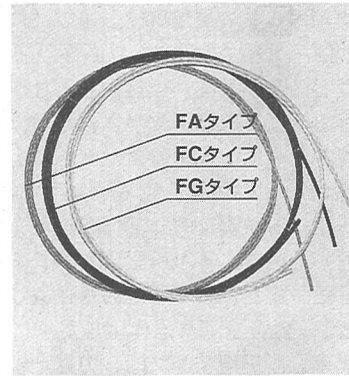


写真-3.2 組紐製法による高強度繊維製ケーブルボルトの外観

と鋭角で接触する確率が低く、製品として高いせん断強度が期待できる。

上述の①に関しては、単に巻き取れるだけでなく、巻き取り後もその特性が劣化しないことが示されねばならない。このため、次章において同一素材を用いて巻き取り前後の材料試験を実施しこれを検証することとする。また、②に関しては、5章で原位置引き抜き試験を実施し、既存のケーブルボルト製品との比較・検証を実施する。さらに、③に関しては6章において直接せん断試験、及び岩石ブロックを用いた模擬岩盤せん断試験を実施することとした。

4. 巻き取り性能に関する検証

前述のように、土木分野におけるケーブルボルトの用途は、巻き取った状態で坑内に搬入し、長尺の打設を行うことを前提としている。したがって、当該のケーブルボルトも必要径に巻き取り得ることが前提となるが、これと同時に巻き取り後も基本特性が保持され、かつ容易にボアホール内に挿入できなければならない。本章では、これらの諸元を逐次検証することとした。以下に、その方法と検証結果を示す。

表-4.1 巻き取り前後のケーブルボルト諸元の比較

ケーブルボルト種類	重量 g/m	樹脂量 vol/%	平均径 mm	破断耐力 (kN)					平均破断耐力 kN	標準偏差 kN	
				No.1	No.2	No.3	No.4	No.5			
FA15	巻き前	242.8	26.5	15.47	239.1	247.0	234.2	228.3	240.1	237.7	5.2
	巻き後	244.7	26.8	15.64	242.1	253.8	237.2	253.8	238.1	245.0	7.1
FG15	巻き前	372.8	29.0	15.20	186.2	175.4	184.2	180.3	186.2	182.5	3.7
	巻き後	373.9	29.1	15.28	179.3	180.8	185.7	183.8	178.9	181.7	2.4
FC15	巻き前	284.1	24.5	15.32	399.8	382.2	385.1	379.3	357.7	380.8	9.9
	巻き後	283.9	24.6	15.30	405.7	386.1	384.2	405.7	366.5	389.6	12.9

(1) 巻き取り前後の基本特性の劣化に関する考察

ケーブルボルトの使用用途、並びに作業性を考慮するならば、ケーブルボルトは直径2000mm以下に巻き取られる必要がある。当然のことながら、巻き取り径が小さくなるほど、含浸された樹脂の破損は大きく、製品としての基本特性は大きく劣化するものと考えられる。この劣化度を検証するため、当該ケーブルボルトを実用的な径1500mmに巻き取り、24時間放置した後に、その引張耐力の低下を検討することとした。また、参考のため巻き取り前後の単位重量(g/m)、樹脂量(単位体積当たり樹脂が占める体積比率)、平均径等に関しても比較することとした。なお、破断耐力は各ケース毎に5本の引張試験を行い、その平均値をもって評価することとした。

表-4.1に巻き取り前後のケーブルボルト諸元の比較を各素材毎に示す。表に示すようにいずれの緒元に関しても、巻き取り前後で有意な差は現れてはいない。特に破断耐力に関しては、巻き取り後のほうが若干高い値を示す場合もあり、巻き取りによる劣化よりも、製品間の破断耐力のばらつきの方が卓越するようである。したがって、当該のケーブルボルトは巻き取り後も所要の性能を有するものと評価してよいものと考えられる。

(2) 巻き取り後の挿入特性に関する検証

ボーリング孔内への長尺ケーブルボルト挿入を考えると、ケーブルボルトはある程度以上の撓み剛性を有することが望ましい。一方、長尺材料を坑内へ搬入することを考えれば、ケーブルボルトは2000mm以内の径に巻き取り得ることが望ましい。

当該の繊維製ケーブルボルトが実務に供されるためには、この相反する要求性能を同時に満たさねばならない。これを検証し、かつ挿入作業上の問題点を整理するために、原位置における挿入実験を実施した。

ケーブルボルトの定着方法には、以下の二つがある。すなわち、ボーリング孔内にケーブルボルトを挿入後、エアを排気しつつ定着材を注入する後注入式と、ボーリング孔内に予め定着材を注入してから

表-4.2 原位置挿入試験結果一覧

No.	削孔方向	削孔径 mm	削孔長 mm	ボーリング孔		ゲルゲラウト		グラウト剤		挿入状況
				線材	本数	W/C	ゲルゲラウト			
1	水平	60	10,000	FG15	1	60	280		容易に挿入できた	
2	水平	60	5,000	FG15	2	48	207		4m付近でボルト相互のよじれが生じたが容易に挿入できた	
3	45° 上方	60	10,000	FG15	2	48	200		4m付近でボルト相互のよじれが生じたが容易に挿入できた	
4	鉛直	60	5,000	FG15	1	48	203		容易に挿入できた	

ケーブルボルトを挿入する先注入式の二つである。この二つの打設方法はケーブルボルトの打設長によって使い分けられ、5~10m程度の比較的短い打設長では施工の簡便な先注入式が、またこれを超える打設長では後注入式を用いることが一般的であろう。今回の挿入試験では、挿入性に問題が生じると考えられる先注入方式に関して検証することとした。

ボーリング孔の削孔方向は水平、鉛直、及び45°上方とし、それぞれ直径(φ)60mm、長さ(L)5mのボーリング孔を削孔した。定着材は一般的なモルタルグラウト(C:S=1:1)を使用し、W/C=60%と48%の2種類を用いた。また、挿入は人力によるものとし、挿入性の評価は作業者の感覚によるものとした。ケーブルボルトは表-3.1に示すFG15を用い、各孔への挿入本数は1本もしくは2本とした。表-4.2に各ボーリング孔における試験ケースと挿入状況を示す。

表-4.2に示すようにいずれの試験ケースにおいても挿入性には全く問題が無く、試験開始時に予測された巻き癖によるボーリング孔壁への突き刺さりや、撓み剛性不足による中折れ等は全く生じなかった。なお、ケーブルボルトを2本挿入したNo.3のケースでは、4m付近で挿入抵抗が若干増大したが、人力で問題なく挿入することが出来た。

今後、孔荒れの甚だしい崖錐部等における挿入性の検証が必要とされるであろうが、製品としての挿入性は特に問題ないものと評価される。

5. 引き抜き特性に関する原位置試験

高強度繊維製ケーブルボルトの引き抜き特性を既往の鋼製ケーブルボルトと比較し、その実用性を検証するため、ケーブルボルトの原位置引き抜き試験を実施した。また、トンネルの安定性を評価する上で重要となるケーブルボルト打設直後の引き抜き耐力の発現、及び引き抜き時のボルト軸力の発現に関しても同時に検証することとした。

表-5.1 引き抜き試験結果一覧

ケーブル種類	試験孔	正味養生時間 時:分	正味打設長 cm	最大引き抜き荷重 kN	単位長さ付着耐力 N/cm	単位面積付着耐力 MPa	最終状態
FC15	No.01	23:49	473	284	600.42	127.41	母材破断
	No.12	24:06	501	245	489.02	103.77	250kNで除荷
	No.18	26:10	472	245	519.07	110.15	250kNで除荷
FG15	No.03	24:16	468	157	335.47	71.19	母材破断
	No.05	24:11	465	139	298.92	63.43	母材破断
	No.11	24:02	468	129	275.64	58.49	母材破断
SWPR7A	No.04	24:00	482	173	358.92	76.17	定着金具部の滑り
	No.06	23:39	467	227	486.08	103.15	母材-グラウト間の滑り
	No.19	24:10	457	203	444.20	94.26	母材-グラウト間の滑り

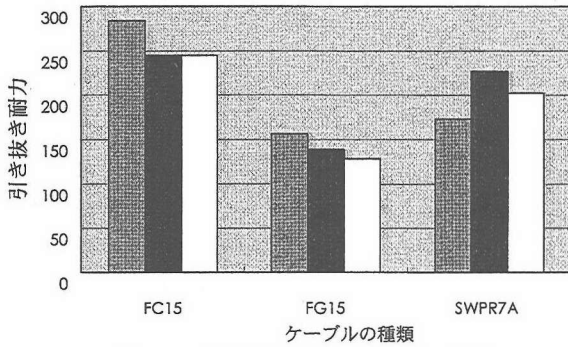


図-5.4 各素材毎の引き抜き耐力の比較

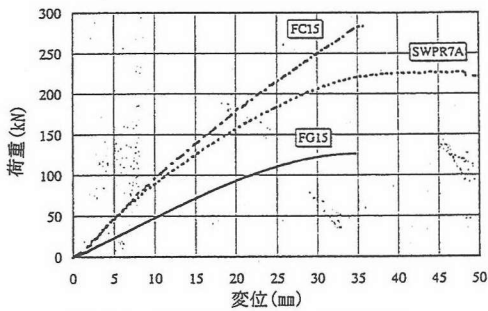


図-5.5 各素材毎の荷重-変位曲線

軸力計測器の概要を図-5.3に示す。なお、計測データは、データロガーを介し、GP-IB経由でパソコンへ転送し、データ集録と同時に荷重-変位関係をモニターすることとした。

(2) 線材間の付着特性差に関する考察

素材によるケーブルボルト引き抜き耐力の差異を検討するため、FG15、FC15、及びSWPR7Aの三種の素材を同一条件で打設し、24時間経過した時点で引き抜き試験を実施した。表-5.1、及び図-5.4にその試験結果一覧を示す。

これらの図表より明らかなように、打設後24時間における引き抜き耐力は、FC15が最大で、SWPR7A、FG15の順となっている。なお、FC15に関しては、カーボンの可能蓄積エネルギー量 ($\int \sigma_y$ (破断強度×破断ひずみ) d_v) が大きく破断時に定着金具が飛散

表-5.2 養生時間による引き抜き耐力の発現

養生時間 時間	試験孔	正味養生時間 分	正味打設長 cm	最大引き抜き荷重 kN	単位長さ付着耐力 N/cm	単位面積付着耐力 MPa
3	No.02	3:15	480	1.8	3.68	0.78
	No.09	4:00	471	7.0	14.77	3.13
4	No.15	4:06	451	7.4	16.30	3.46
	No.08	6:05	453	42.4	93.67	19.88
6	No.16	6:00	456	40.4	88.54	18.79
	No.07	7:44	480	103.8	216.21	45.88
8	No.14	7:56	477	138.4	290.10	61.56
	No.13	15:53	472	246.1	521.35	110.63
16	No.20	16:29	481	215.5	448.03	95.07
	No.01	23:49	473	283.7	599.81	127.28

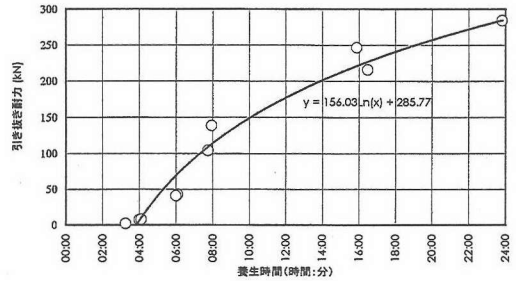


図-5.6 養生時間に伴う引き抜き耐力の発現

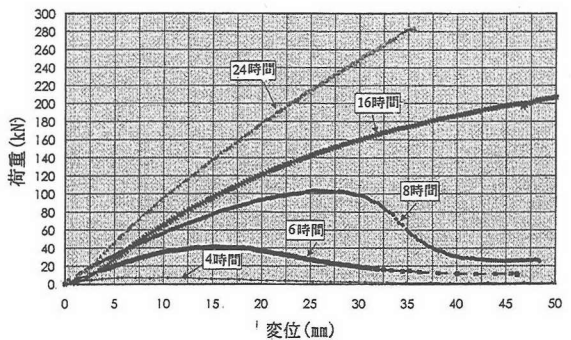


図-5.7 養生時間による荷重-変位曲線の変化

する等の危険性が高いため、一本だけを破断まで試験し、それ以外は245kNまで載荷し、他の素材との有意差を確認した上で除荷することとした。したがって、FC15は245kN以上の引き抜き耐力が発現しており、おそらく母材耐力の300kN近くまで発現し得るものと考えられる。

また、図-5.5に各素材毎の典型的な引き抜き荷重-変位曲線を示す。図から推測されるように、SWPR7Aは、定着グラウトと素材間の滑りによって引き抜けるのに対し、FG15とFC15は母材耐力付近で破断する。これは、SWPR7AとFG15及びFC15との製法に起因するものと考えられ、組紐製法で生じた表面の凹凸が良好な機械的付着を与えるものと評価される。なお、SWPR7Aはより線製法で作成されている。

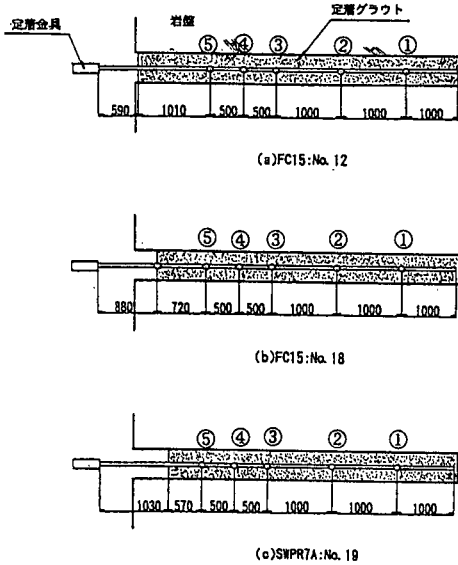


図-5.8 軸力計測位置図

(3) 養生時間による引き抜き耐力の発現に関する考察

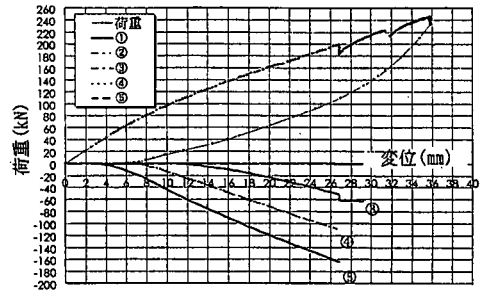
養生時間による引き抜き耐力の発現を考察するために、FC15を3, 4, 6, 8, 16, 及び24時間養生した後に、それぞれ引き抜き試験を実施した。なお、各養生時間毎の引き抜き本数は二本とした。表-5.2に引き抜き試験結果の一覧を、また図-5.6に養生時間による引き抜き耐力発現の状況を示す。

これらの図表から明らかのように、打設後4時間経過しても7.5kN以下の耐荷力しか発現していないが、6時間経過後には約40kN、8時間後には110~140kNと飛躍的な増大がみられ、16時間後には200kN以上の耐荷力が発現されている。このことから、ケーブルボルト引き抜き耐荷力は打設後約6時間頃から増大し始め、約16時間頃には概ね所要の耐荷力に近づくものと考えられる。

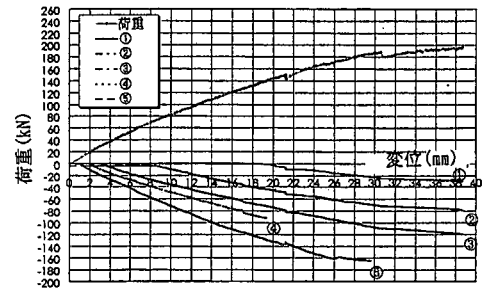
また、図-5.7には各養生時間毎の載荷荷重-頭部変位関係図を示す。図より明らかのように、養生時間が進むにつれて、単に引き抜き耐荷力だけでなく載荷荷重-頭部変位の勾配（ばね定数に相当）も増大することが明らかである。

(4) ボルト軸力分布に関する考察

引き抜き試験時に発生するケーブルボルト軸力の分布を観察するために、FC15及びSWPR7Aの各素材に軸力計測器を装着し、打設後24時間の養生の後、引



(a) FC15



(b) SWPR7A

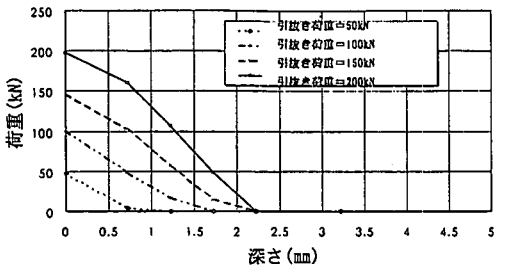
図-5.9 引き抜き試験時のボルト軸力の発生

き抜き試験を実施した。図-5.8に軸力計測器装着位置図を、また図-5.9に引き抜き試験時におけるボルト軸力の発生状況を示す。なお、図の縦軸で正值は引き抜き荷重を、また負値は発生したボルト軸力を示す。

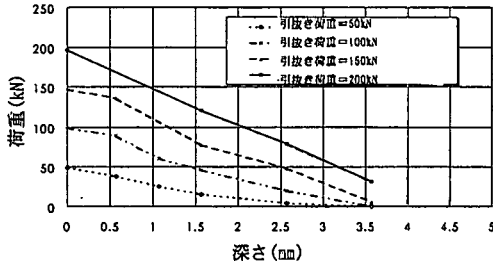
図-5.9に示す様に、軸力の発生は引き抜き荷重と良好な相関を示すとともに、グラウト深度別の分布状況も非常に良好であり、当該の軸力計測結果は、比較的信頼の置ける値であると考えられる。

また、図-5.10には各引き抜き荷重に対するボルト軸力の深度方向分布を示す。図より明らかのように、どの計測結果も比較的なだらかな深度方向分布をなすが、FC15とSWPR7Aのケースを比較するとFC15が定着グラウト口元から2~3m程度の範囲しか軸力が発生していないのに対し、SWPR7Aでは3.5mの計測点でも、若干の、軸力が発生している。また、その勾配もFC15に比べ比較的緩やかである。

これは、組紐製法とより線製法の違いによって軸力伝達の機構が、若干、異なるために生ずるものと考えられる。すなわち、組紐製法を採用したことにより、当該繊維製ケーブルボルトの表面には自然な凹凸が与えられ、これが機械的付着を生ずるために、結果としてケーブルボルトは高い付着特性を発現す



(a) FC15



(b) SWP7A

図-5.10 引き抜き試験時のボルト軸力分布

る。繊維製ケーブルボルトが切断を前提として使用されることを考えれば、これは切断され短くなったケーブルボルトに対しても十分な付着耐力を期待しうることを意味し、使用目的に適った付着特性を有するものと判断してよからう。

また、切断を受ける場合、ケーブルボルトは、掘削及び地山変位に支配され、載荷と除荷を繰り返す複雑な載荷過程をたどるものと考えられる。このように載荷過程を以下のような繰り返し載荷試験で便宜的に模式し、その際のケーブルボルト挙動を評価することとした。すなわち、載荷段階を50, 100, 150, 200kNの四段階とし、各載荷段階に到達後5分間一定荷重を保持した後、0.1kNまで除荷し、次の荷重段階まで載荷する。この繰り返し載荷試験の引き抜き荷重履歴と軸力発生との関係を図-5.11に示す。なお、引き抜き試験を実施したケーブルボルトはFC15で、養生時間は24時間である。

図-5.11より明らかなように、比較的複雑な載荷・除荷の段階載荷に対しても、ボルト軸力は引き抜き荷重と良好な相関を保ち、載荷時の軸力勾配は常に一致するものと評価される。これは、載荷、除荷の繰り返しの関わらず当該ケーブルボルトは一定の付着特性を発現するものと評価してよい。

6. 繊維製ケーブルボルトのせん断特性に関する検討

ケーブルボルトのせん断特性に関しては、材料そ

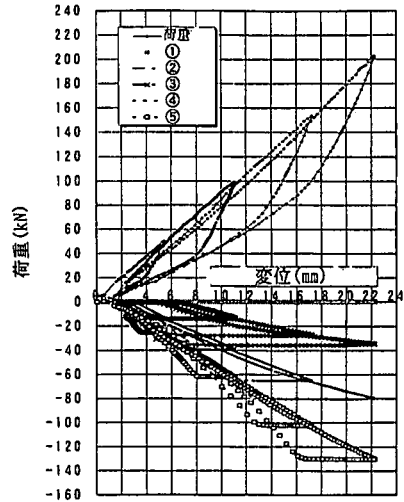


図-5.11 繰り返し荷重下におけるボルト軸力の発生

のものが持つせん断特性と、岩盤不連続面に打設された場合のせん断特性の両方を検討する必要がある。

地山に打設されたケーブルボルトは地山に存在する不連続面の挙動を抑制することが期待されるが、地山の不連続面挙動は開口挙動と滑動挙動の二つに大きく分類される²¹⁾。この二つに対し地山に打設されたケーブルボルトは、その有する引張抵抗特性、並びにせん断抵抗特性を発現し、抵抗せねばならない²²⁾。

引張抵抗特性に関しては、これまでの検討結果が示すように、繊維製ケーブルボルトは十分な信頼をおける支保部材と評価することができるであろう。しかし、せん断抵抗特性に関しては、素材である繊維自体がせん断抵抗を期待する材料でないこと、及び地山中の不連続面挙動下でケーブルボルトが複雑な挙動を呈することなどから、十分な検討がなされていない。ことに滑動挙動を呈する不連続面下に打設されたケーブルボルトの荷重条件は純せん断のみとは考え難く、不連続面の表面形状によってキンキングや振じりせん断などの複合せん断を受けることが多い。

このような理由から、本章では繊維製ケーブルボルトの純せん断特性を検証し、続いて岩盤不連続面挙動を模式したシミュレーション実験を実施し、滑動挙動を呈する不連続面下に打設されたケーブルボルトのせん断特性に関する検証を実施する。

(1) 繊維製ケーブルボルトの純せん断特性に関する検討

繊維製ケーブルボルトの純せん断特性に関する検討を実施するために、図-6.1に示す二面せん断試験

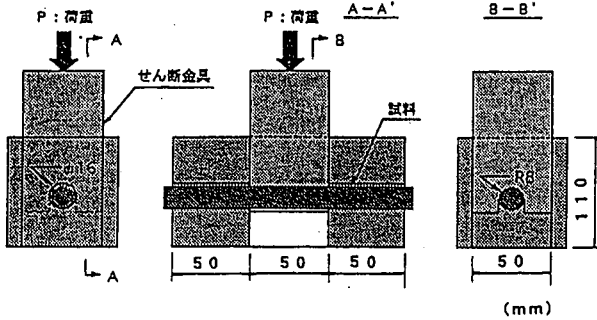


図-6.1 二面せん断試験装置の概要

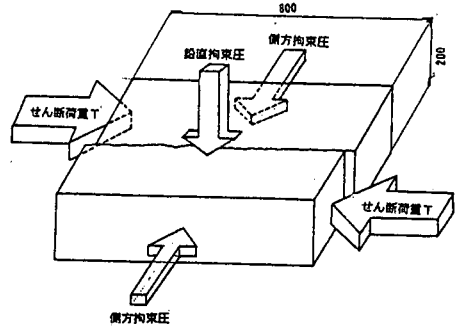


図-6.2 亀裂を有する岩石ブロックせん断試験模式図

表-6.1 繊維製ケーブルボルトのせん断試験結果

No.	FC15		FA15		FG15	
	最大荷重 kN	せん断強度 MPa	最大荷重 kN	せん断強度 MPa	最大荷重 kN	せん断強度 MPa
1	58.80	1.913	79.77	2.439	54.20	1.659
2	55.96	1.820	71.25	2.184	56.94	1.744
3	57.82	1.882	75.17	2.306	55.86	1.812
平均	57.53	1.872	75.40	2.310	55.67	1.738

器を用いてFC15, FA15, 並びにFG15のせん断試験を実施した。その試験結果を表-6.1に示す。

表-6.1に示すように、繊維製ケーブルボルトのせん断強度は1.7~2.3MPaの範囲にあり、この値は鋼製ワイヤーの規格である許容せん断応力度1.3MPa（‘クレーン構造規格’²³⁾による）を満たしている。

一般に鋼材の引張強度とせん断強度の間には何らかの相関があるものと考えられているが、今回実施した繊維製品ではこの相関が見られなかった。すなわち、引張強度の最も高かったカーボン繊維製FC15はアラミド繊維FA15よりもせん断強度が低く、ガラス繊維製FG15程度の値でしかなかった。

(2) 不連続面せん断挙動下のケーブルボルトせん断特性に関する検討

不連続面せん断挙動下のケーブルボルトせん断特性に関する検討を実施するために、岩盤不連続面挙動を模擬したシミュレーション試験を実施し、ケーブルボルト打設による不連続面せん断挙動の変化を観察することとした。

a) シミュレーション実験の概要

岩盤不連続面のせん断挙動をシミュレーションす

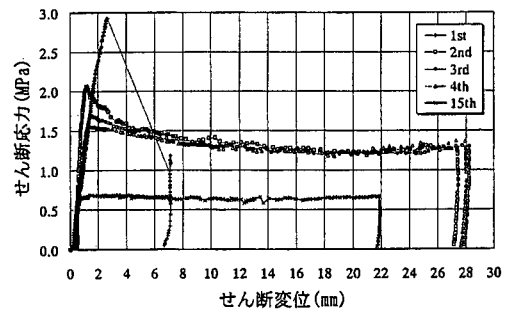


図-6.3 繰り返しせん断時の岩石不連続面せん断特性の変化

るために、図-6.2に示すように800mm(L)×400mm(W)×200mm(t)の岩石ブロック中央部に人工的な亀裂を作成し、これを図-6.2及び写真-6.1に示す要領で直接せん断する^{24), 25)}。すなわち、人工亀裂に直角な二方向に一定拘束力 σ_{con} を作用させた応力状態下で、人工亀裂のせん断試験を実施し、そのせん断応力とせん断変位の関係を観察することとした。

ケーブルボルトの効果を評価するためには、ケーブルボルトが打設される不連続面のせん断特性が打設前後で同一条件にあるものできなければならない。しかし、人工的に作成した亀裂面は新鮮なため、せん断作用を受けると、そのせん断特性が大きく変化する。このため、ケーブルボルトの打設に先立ち、数回の不連続面せん断試験を繰り返し、不連続面のせん断特性を定常化させることとした（せん断回数に依らず一定のせん断応力-せん断変位関係を呈す

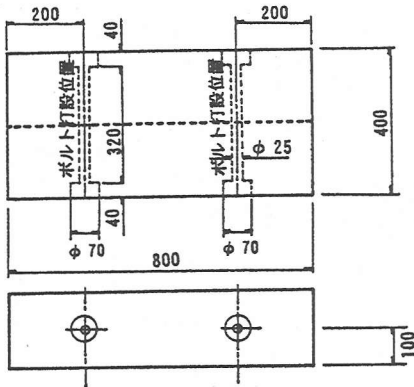


図-6.4 ケーブルボルト打設位置図

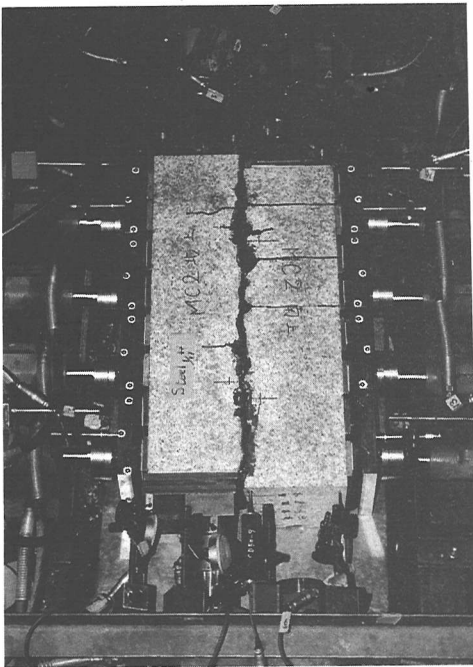
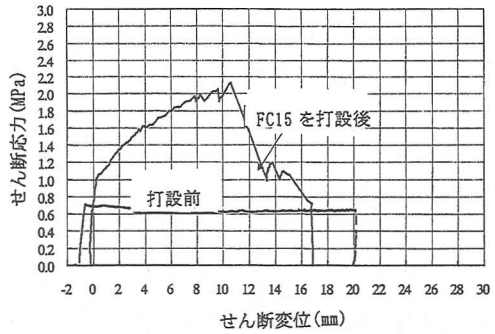
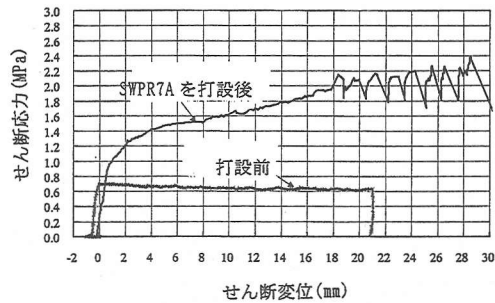


写真-6.1 ケーブルボルトで補強された
模擬岩盤ブロックのせん断試験状況

るという意味で)。図-6.3は一定拘束圧 $\sigma_{con}=0.5\text{MPa}$ の下で、不連続面せん断試験を繰り返し実施した際のせん断応力-せん断変位の関係とせん断回数との関係を示したものである。図に示すように、初期の



(a) FC15



(b) SWPR7A

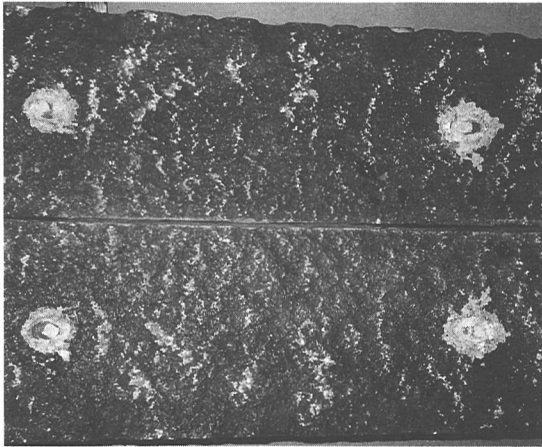
図-6.5 せん断応力-せん断変位関係
($\sigma_{con}=0.5\text{MPa}$)

せん断応力-せん断変位勾配は鋭敏な立ち上がりを示し、ピークせん断強度後に明確な残留挙動を認められないが、せん断回数の増加に伴いせん断応力-せん断変位勾配は緩やかとなり、残留挙動も安定し、やがては定常なせん断応力-せん断変位関係に収斂する。

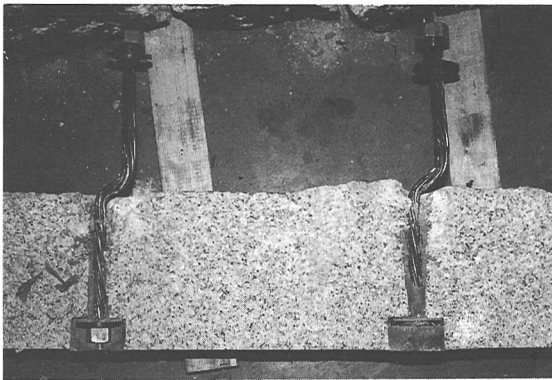
ケーブルボルトの打設はせん断応力-せん断変位関係を定常化させた後に行うこととし、その打設位置は図-6.4に示すものである。また、ケーブルボルトとしてFC15を採用し、比較のためにSWPR7Aを用いた試験も同時に実施した。定着は、引き抜き試験に準じモルタルグラウトで行うものとし、その配合等は5.1に示したものと同一である。写真-6.1にブロックせん断試験の状況を示す。

b) せん断シミュレーション試験結果

図-6.5に一定拘束圧を $\sigma_{con}=0.5\text{MPa}$ とした際のケーブルボルト打設前後のせん断応力-せん断変位関係をFC15及びSWPR7Aのそれぞれについて示す。図より明らかなように、FC15、SWPR7Aいずれのケーブ



(a) FC15



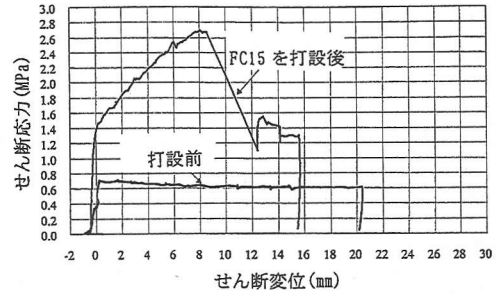
(b) SWPR7A

写真-6.2 せん断試験後のケーブルボルト

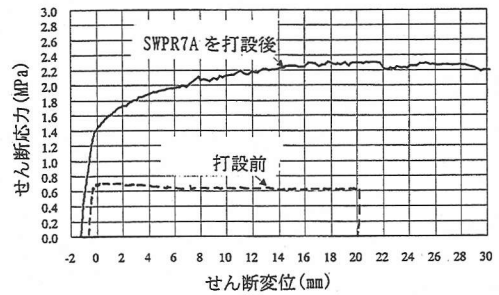
ルボルトを用いた場合でも、不連続面の最大せん断強度は大きく増大し、FC15の場合は0.6~0.7MPaが2.2MPaに、またSWPR7Aでは0.6MPaが2.4MPaへと増大している。

図-6.5(a), (b)を比較すれば、初期の線形領域を離れた後に、ケーブルボルト材質の違いによる挙動の違いが明確となる。すなわち、FC15が打設された不連続面の場合、せん断応力が $\tau=1.0\text{MPa}$ 程度から線形関係をはなれ、最大強度まで緩やかな勾配を描きながらせん断応力が増大して行くが、最大強度に達したとほぼ同時にケーブルボルトはせん断による破断が生じる。なお破断時のせん断変位は $\delta=11\text{mm}$ であった。

これに対し、SWPR7Aが打設された不連続面の場合、せん断応力が $\tau=1.0\text{MPa}$ 程度から線形関係をはなれ、



(a) FC15



(b) SWPR7A

図-6.6 せん断応力-せん断変位関係
($\sigma_{\text{con}}=1.0\text{MPa}$)

緩やかな勾配を描きながらせん断応力が増大して行くが、せん断変位が $\delta=17\text{mm}$ を超えた付近からノコギリ型のせん断応力-変位関係を呈し始めるが、全体としては応力増大の勾配を維持しせん断変位が $\delta=30\text{mm}$ を超えてもケーブルボルト破断の兆候は見られない。

この現象を検討するために、写真-6.2にせん断試験終了後のケーブルボルトの状況を示す。写真より明らかなように、FC15は母材がせん断によって破断しているのに対し、SWPR7Aは破断することなく人工亀裂に沿って折れ曲がる、いわゆるキンキングモードを示している。したがって、不連続面せん断過程下においてSWPR7Aは純粋なせん断抵抗を示すのではなく、曲げ並びに引張のモードを呈し、不連続面滑りに抵抗しているものと考えられる。また、ノコギリ状のせん断応力-せん断変位関係は、純せん断抵抗からこれらの抵抗モードに移行する際に現れるものと推測できる。

図-6.6は一定拘束圧を $\sigma_{\text{con}}=1.0\text{MPa}$ とした際の関係を示したものである。図-6.5と比較すれば明らかなように、一定拘束圧 $\sigma_{\text{con}}=0.5\text{MPa}$ の場合と基本的に同じ挙動を呈すものの、SWPR7Aにノコギリ状のせ

せん断応力-せん断変位関係が現れていない。これは、一定拘束圧が大きくなったことで純せん断抵抗から他の抵抗モードへの遷移が生じ難くなったものと考えられる。したがって、SWPR7Aの挙動は拘束圧の大きさに依存するものと考えられ、地山に打設された場合、その応力状態によって挙動が異なるものと考えなければならない。

7. まとめ

トンネル施工の高度化に伴い、ケーブルボルトの使用は増大して行くものと考えられる。土木分野においては、その大半が事前支保として使用されるであろうことを鑑みれば、高性能で切削の容易な繊維製ケーブルボルトの開発が望まれている。

筆者らは、この要件を満たすべく、巻き取りが可能で、運搬の容易な繊維製ケーブルボルトを組紐製法を採用することで開発し、その各種基本特性を本論文において吟味した。ここで得られた主な知見を以下に列記する。すなわち、

- ① 当該の繊維製ケーブルボルト自体が有する引張強度は、繊維の種類による違いはあるものの、同径の鋼製ケーブルボルトとほぼ同等であると評価される。
- ② 当該の繊維製ケーブルボルトでは巻き取りの前後において物性の低下は見られない。これは繊維の種類によらない。
- ③ 原位置引き抜き試験結果によれば、当該繊維製ケーブルボルトの破壊は、線材の破断として生ずる。これは当該繊維製ケーブルボルトの付着抵抗が良好なことを示す。
- ④ 線材の弾性係数が概ね同等なSWPR7AとFC15を比較すれば、原位置引き抜き試験時のボルト軸力分布は、SWPR7Aが打設長全体に渡りなだらかに分布するのに対し、FC15は口元部から2～3m程度にしか軸力が発生しない。これは、組紐製法を採用したことで生じたケーブルボルト表面の凹凸が、機械的付着抵抗を与えるためと考えられる。
- ⑤ 地山に打設されたケーブルボルトが不連続面の滑動を受けた場合の最大せん断抵抗応力は、繊維製ケーブルボルトと鋼製ケーブルボルトで大きな差異を生じない。
- ⑥ 地山に打設されたケーブルボルトが不連続面の滑動を受けた場合、繊維製ケーブルボルトと鋼製ケーブルボルトではその挙動に大きな差異が生ずる。すなわち、繊維製ケーブルボルトが脆

性的な挙動を呈するのに対し、鋼製ケーブルボルトは延性挙動を呈する。これは、不連続面の滑動を受ける鋼製ケーブルボルトの挙動がせん断抵抗から、引張抵抗等へ転移することによって生じるものと考えられる。

以上より当該の繊維製ケーブルボルトは鋼製ケーブルボルトと概ね同等な性能を有するものと判断され、トンネル実務へ適用を考え得るものと判断される。もとより、ここで実施した各種のケーブルボルト特性やその長短に関する論議は、あくまでも、実験上の範疇にとどまるものであり、実務の場ではより高い要求が品質的にも施工的にも生じるであろう。ここで当研究より得られた知見を基に、繊維製ケーブルボルトの実務への適用に関する考察を以下にまとめる。

- ① 繊維製ケーブルボルトが棒材として有する引張強度、付着強度、並びにせん断強度等は概ね鋼製ケーブルボルトと同等品と考えることができるが、繊維製品の特色を生かすためには、対象とする地山条件、及び経済性を加味した、より適切なケーブルボルトの選択を行う必要がある。
- ② 繊維製ケーブルボルトの付着特性はその表面形状から非常に良好であり、高い付着抵抗が発現されるため、短い打設長で作用荷重と釣り合うことができる。したがって、ケーブルボルトの打設長を低減できる可能性がある。
- ③ 繊維製ケーブルボルトがせん断挙動を呈する不連続面に打設された場合、せん断強度は顕著に増大するものの、その抵抗モードは純せん断抵抗に近い場合、せん断変形としては8～10mm程度でケーブルボルトの破断が生じる。このため、不連続面のせん断抵抗が卓越するような地山等では、できる限り早期の打設もしくは、鋼製ケーブルボルトとの併用を考慮する必要がある。

8. おわりに

ケーブルボルトは言うまでもなくオールマイティなトンネル支保部材ではなく、いわんや繊維製品に関してはその使用実績も皆無に近いために、十全な信頼を与えうるものではない。しかし、本文で述べたその優れたいくつかの特性に基づけば、トンネル施工の高度化に資することのできる支保部材であることは認められよう。今回の研究では、当該繊維製ケーブルボルトに関して実務に供しうる一応の性能

を認められた。今後はこの特性を生かした各種工法を実務の場で検証して行く方針である。

謝辞：本研究を実施するにあたり、埼玉大学工学部吉中龍之進教授、並びに蟻坂俊英氏にはブロックせん断試験を実施して頂くとともに、多くの有益な御指導、御助言を頂きました。また、神岡鉱業(株)地下利用推進室、並びに採鉱課の皆様にはケーブルボルトに関する有益な実績を御教授頂き、さらにはケーブルボルト軸力計測にあたっては、東亜測器(株)藤田清一氏に様々なご助力を頂き、多くの有益なデータを得ることができました。最後に神戸大学工学部櫻井春輔教授、並びに芥川真一氏には研究全般に渡るご助言を頂きましたことをお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 佐藤久, 田中勝雄: トンネル工事の現況, トンネルと地下, Vol. 25, No. 11, pp. 61-66, 1994.
- 2) ジェオフロンテ研究会: 超大断面トンネルにおける「多段周壁導坑工法の研究」報告書案, 新技術相互活用分科会・超大断面トンネルの設計・施工の研究 W.G. 編, 1995.
- 3) 秋山典夫, 富田敦紀: 大規模地下空洞の掘削(蛇尾川揚水発電所建設工事), 土木施工, Vol. 35, No. 7, pp. 81-88, 1994.
- 4) Saito, S.: Mining Methods and the Use of Inner Space at Kamioka Mine, ROCK MEC-HANICS IN JAPAN, Vol. 6, pp. 63-66, 1991.
- 5) 定塚正行, 松尾勝弥, 伊藤淳: 超大断面トンネルでの急速施工, トンネルと地下, vol. 25, No. 2, pp. 31-37, 1994.
- 6) 一都三県を結ぶ通勤新線(常磐新線 秋葉原・つくば間), トンネルと地下, vol. 25, No. 8, pp. 17-21, 1994.
- 7) Pelizza, S. and Peila, D.: Soil and Rock Reinforcements in Tunneling, Tunneling and Under Space Technology, Vol. 8, No. 3, pp. 357-372, 1993.
- 8) Pelizza, S., Barisone, G. Campo, F. and Gorona, G.: Rapid umbrella arch excavation of a tunnel in cohesionless material under an archeological site, Proc. of Int. Cong. On Progress and Innovation in Tunneling, pp. 885-891, 1989.
- 9) 清水 則一, Kaiser, P.K., Diederrichs and M. S., Hutchin-son 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, Vol. 28, No. 4, pp. 43-52, 1997.
- 10) Bruce, D.A. and Gallavresi, F.: Special

Tunneling methods for settlement control, 2nd Int. Cong. on Case Histories in Geotechnical Engineering, pp. 261-272, 1988.

- 11) 山岳トンネルの新技术(22), トンネルと地下, Vol. 19, No. 7, pp. 59-65, 1988.
- 12) 萩野正二, 水田義明, 佐野修, 戸上浩司: ケーブルボルトの作用効果に関する基礎的研究, 山口大学工学部研究報告, Vol. 32, No. 1, pp. 51-55, 1981.
- 13) Cassidy, K.: The implementation of cable bolting program at the Con Mine, Underground Rock Engineering, pp. 67-72, 1980.
- 14) Lappalainen, P., Pulkkinen, J. and Kuparinen, J.: Use of steel strands in cable bolting and rock bolting, Proc. of int. symp. On Rock Bolting, pp. 557-562, 1983.
- 15) 斎藤敏明, 寺田孚, 高橋勝也: ケーブルボルトを用いた先行支保に関する研究, 第18回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 111-114, 1986.
- 16) Pakalnis, R., Peterson, D.A. and Mash, G.P.: Glass fibre cable bolts - an alternative, Rock Mechanics, Vol. 87, No. 976, pp. 53-57, 1994.
- 17) ケプラー技術資料, デュボン社
- 18) 秋山暉, 天野玲子, 奥村一正: 板状のFRPロッドを用いたコンクリートはりの曲げ性状, 第12回コンクリート工学年次論文報告集, pp. 1099-1104, 1990.
- 19) 山本信幸, 平井正雄, 中田雅夫, 山地宏志: 組紐状FRPロックボルトの特性について, 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集第6部, pp. 146-147, 1989.
- 20) 岡本直, 田村富雄: アラミド繊維による組紐状棒材の基本特性, 第10回コンクリート工学年次論文報告集, pp. 659-664, 1988.
- 21) Littlejohn, G.S. and Bruce, D.A.: Rock anchors - Design and quality control -, Proc. 16th U.S. Symp. Rock. Mech-anics, pp. 77-83, 1977.
- 22) Gerrard, C.: Rock bolting in theory - A key note lecture -, Proc. Int. Symp. On Rock Bolting, pp. 55-64, 1983.
- 23) 労働省労働基準局安全衛生部安全課監修: クレーン等安全規則(含関係告示), 1981.
- 24) 吉中龍之進: ロックボルトによる補強の機構, 第5回岩盤システムセミナー, システム総合研究所, pp. 21-44, 1989.
- 25) 吉中龍之進, 清水明男, 新井元, 加藤恵贈, 蟻坂英昭: 実際の岩盤不連続面の補強, 第20回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 224-228, 1988.
- 26) 吉中龍之進, 清水明男, 新井元: 花崗岩の不連続面に対するロックボルト補強, 第21回岩盤力学に関する

DEVELOPMENT OF THE FIBER REINFORCED CABLE BOLTS AND ITS FUNDAMENTAL PROPERTIES

Masao NAKATA, Hiroshi YAMACHI, Sumiyuki MATSUBARA,
Shigetoshi OKANO and Mitsugu NOMURA

Fiber reinforced cable bolt is one of the capable and powerful supporting measure. However there are many difficulties to product the suitable characteristic fiber cable bolts, because it is hard to form a fiber bundle into the cable shape. Kumihimo Method is old fashioned Japanese fiber twisting method, but it is also suitable in modern days.

In this paper we introduced the new branded fiber cable bolts adopting the Kumihimo Method and a lot of experiments has been carried out to reveal a fundamental properties of this fiber cable bolts comparing with the steel one. As a result, it became clear that fiber cable bolts has the reliable strength as tension, shearing and frictional properties. Especially frictional strength is higher than steel one. We suppose it is closely related to the adopting the Kumihimo Method.