

ケーブルボルトの定着長と解析定数の決定方法

EFFECT OF BOND LENGTH AND DETERMINATION OF PROPERTIES OF FULLY GROUTED CABLE BOLTS

石塚与志雄¹⁾・安部 透²⁾・今津雅紀³⁾

Yoshio ISHIZUKA, Tohru ABE and Mashanori IMAZU

Cablebolting is a very useful form of support of underground cavern. In practical use of cablebolts, it is necessary to clarify an effect of bond length, properties in analytical design, and so on. In this study, the effect of bond length of fully grouted cablebolts which are plain PC strand and indented PC strand is investigated by laboratory and in-site pull-out tests. To study a determination method of properties (bond strength and bond stiffness) of grouted cablebolt, numerical simulations of pull-out tests are carried out by cablebolt element in FLAC. Experimental results shows that bond strength (pull-out load in unit length) is independent on bond length. On the other hand, bond stiffness (axial stiffness in unit length) is dependent on bond length and effective bond length is similar regardless of each bond lengths. Therefore, we propose the determination method of bond stiffness with effective bond length and its availability is studied by simulations of pull-out test.

Keywords: cable bolts, pull-out test, bond length, cable element

1. はじめに

海外の鉱山等では、P C 鋼より線等のケーブルボルトが岩盤補強・支保に使用されてきている⁽¹⁾。日本においても、狭い施工スペースから長尺ボルトの施工が可能であるとの事から、ケーブルボルトが大断面トンネルや地下空洞などの補強・支保に用いられる機会が増えるものと予想される。しかし、ロックボルトと比較してボルト／グラウト間の付着強度が小さい(約 1/4)等の課題⁽²⁾がある。そのため、付着強度を増加させる工夫とともに、ボルト長を決定するための設計・解析定数(付着強度・剛性)の決定方法を明らかにする必要がある。筆者ら⁽²⁾⁽³⁾は、室内と原位置試験により、各種ボルトの付着特性を検討するとともに、P C 鋼線にインデント(凹)を設けることにより、付着強度が画期的に向上することを確認、検証してきた。しかし、ケーブルボルトの定着長と付着強度(引抜耐力)の関係は、実験データが少ないこともあり、定着長と耐力の関係を定量的に検討することができない。また、設計・解析に必要となる付着強度・剛性の決定方法も定まった方法がないのが現状である。

そこで、本報では、室内試験と原位置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シミュレーションにより、解析入力定数の決定方法について検討する。

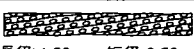
2. 試験概要と結果

2. 1 試験概要

(1) ケーブルボルト

試験に用いたケーブルボルトは、表-1 に示すように通常の P C 鋼より線(7 本より、外径 15.2 mm)と、付着強度を増加させる目的で P C 鋼線に設けたインデントを設けたケーブルボルト

表-1 P C 鋼より線とインデント付

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

- 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
3) 正会員 清水建設(株)土木本部

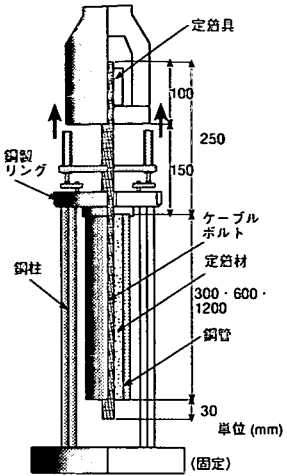
ト（インデント付PC鋼より線と呼ぶ）。インデントは、楕円形の凹形状をし、PC鋼線表面に偏りがないように配置・加工（凹深さが0.33mm、長径4.50mm、短径2.50mm、ピッチは約8mm）してある。インデントを施したことによるボルト自体の機械的性質（引張荷重や伸び特性等）は僅かに低下するが、JIS規格を十分に満足するものである。

(2) 室内試験の概要

供試体は、既報の試験方法⁽²⁾⁽³⁾同様（図－1参照）、地山を模擬した鋼管（外径73.0mm、内径53.0mm）にケーブルボルトを設置し、グラウト材で充填した。グラウト材はモルタルグラウト（7「レミックス」ライモルタル、水セメント比0.40）とし、材令3日で試験を行った。定着長は以下の3ケースである。

- 定着長 ： 0.3m、0.6m、1.2m

引き抜きは、変位速度0.5mm/minの変位制御とし、ボルト自体の耐力（261kN）を考慮して、240kNとした。計測は、荷重と引き抜き変位に加え、鋼管に発生する内圧（ダイレイタンシー内圧）の把握を目的として、管外周のひずみ（ひずみゲージ）を測定した。



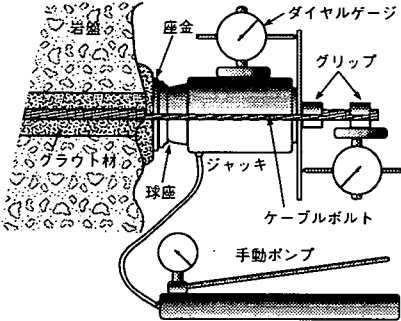
図－1 供試体と室内試験方法

(3) 原位置試験の概要

神岡鉱山において、室内試験と同様、2種類のケーブルボルトの引き抜き試験（図－2参照）を行った。定着長は以下の3ケースである。

- 定着長 ： 1m、3m、6m

打設方向は水平方向で、ボーリング穿孔径は64mmである。グラウト材は室内試験と同様とし、材令は約1日で試験を行った。なお、原位置での引き抜き最大荷重は147kN（15ton）とした。



図－2 原位置引き抜き試験の概要

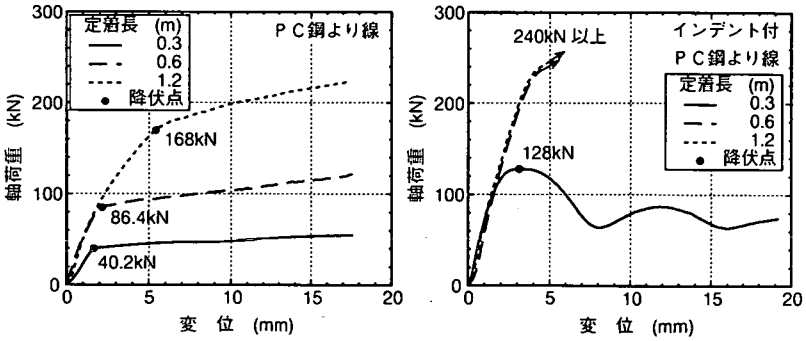
2. 2 試験結果

(1) 室内試験

図－3に2種類のケーブルボルトの軸荷重－変位関係を、表－2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kN/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(kN/m/m）である。

a)引抜耐力・付着強度

通常のPC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、PC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。



図－3 軸荷重－変位関係（室内試験）

インデント付PC鋼より線

では、0.6mで非破壊(引
抜荷重 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、
引抜荷重は、0.3mで
116kNに対して、0.6mで
は 240kN 以上であり 2
倍以上の引抜耐力を発

表－2 引抜荷重・付着強度、軸・付着剛性一覧表 (室内試験)

定着長 (m)	P C 鋼より線				インデント付 P C 鋼より線			
	引抜荷重 (kN)	付着強度 (kN/m)	軸剛性 (kN/m)	付着剛性 (kN/m/m)	引抜荷重 (kN)	付着強度 (kN/m)	軸剛性 (kN/m)	付着剛性 (kN/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

(注) 付着剛性：軸剛性を全定着長で除した値

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
引抜耐力 (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。0.3mの結果から 261kN (ボ
ルト引張耐力) に相当する定着長を計算すると約 0.7m となる。

b)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 (50.9～52.4kN/m)、インデント付 (83.1
～84.1kN/m) とも定着長に依存せず、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－2 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。

上記を求めた値を設計・解析定数として考えると、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、解析に使用する付着剛性を
如何に決めるかが問題となる。

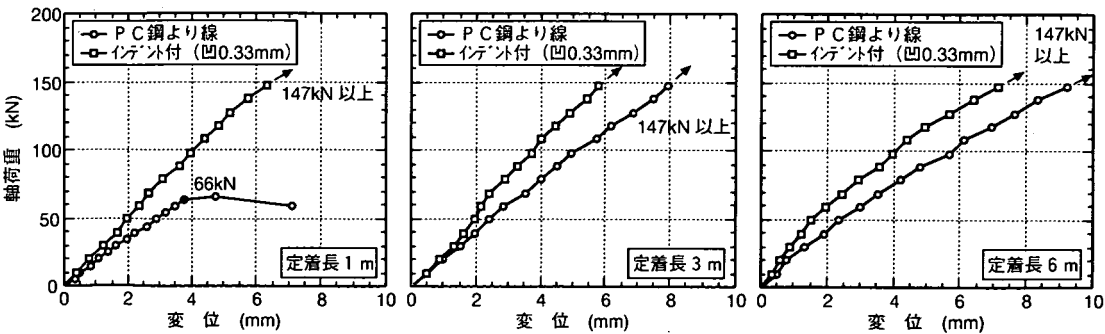
(2) 原位置試験

図－4 に各定着長 (1m、3m、6m) における軸荷
重－変位関係を、表－3 に引抜荷重と軸剛性を示
す。定着長 1 m では、インデント付では 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 m、6 m 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 m
と 3 m 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 $1.60 \times 10^4 \sim 1.85 \times 10^4$ kN/

表－3 引抜荷重・軸剛性一覧表 (原位置試験)

種 類	定着長	引抜荷重 (kN)	軸剛性 (kN/m)
P C 鋼より線	1 m	6 6	1.70×10^4
	3 m	1 4 7 以上	1.85×10^4
	6 m	1 4 7 以上	1.60×10^4
インデント付 P C 鋼より線	1 m	1 4 7 以上	2.32×10^4
	3 m	1 4 7 以上	2.57×10^4
	6 m	1 4 7 以上	2.06×10^4

m、インデント付では $2.06 \times 10^4 \sim 2.57 \times 10^4$ kN/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。



図－4 軸荷重－変位関係 (原位置引き抜き試験結果)

3. 解析モデルと定着長の検討

3. 1 解析モデル

設計・解析に用いる定数（特に、ボルト／グラウト間の付着特性）の妥当性、設定方法の検討のために、室内及び原位置試験のシミュレーションを行った。

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⁽⁴⁾を用いた。ケーブル要素は、図-5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（sbond）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（kbond）として表わされる。

引抜試験のシミュレーションのモデルを図-6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. 2 定着長と付着剛性

(1) 室内試験の解析

まず、定着長 1.2m の試験結果を、 $0.3, 0.6, 1.2\text{m}$ 各々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）を入力定数として解析を行った。なお、インデント付では 0.6m 以上では非破壊のため定着長 0.3m 試験の付着強度を用いた。解析結果と試験結果の比較を図-7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、大きく食い違う結果となる。

(2) ダイレクタンシ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内圧の発生分布状況

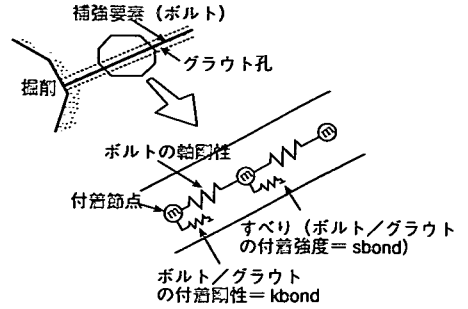


図-5 ボルト／グラウトのせん断挙動を考慮した全面定着型ボルトのモデル化概念図

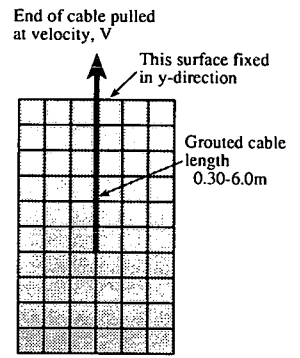


図-6 引き抜き試験の解析モデル

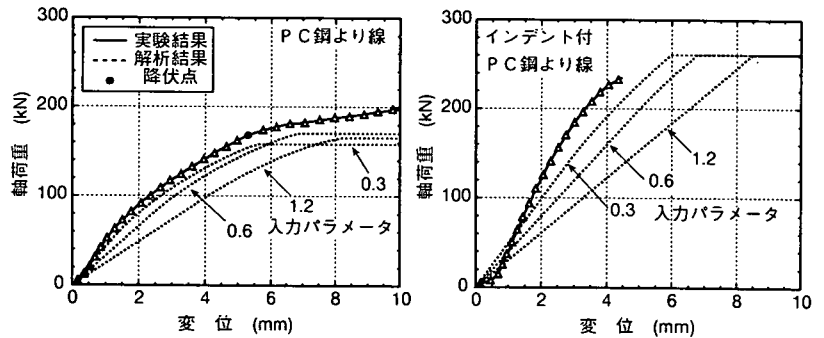


図-7 定着長 1.2m の解析結果

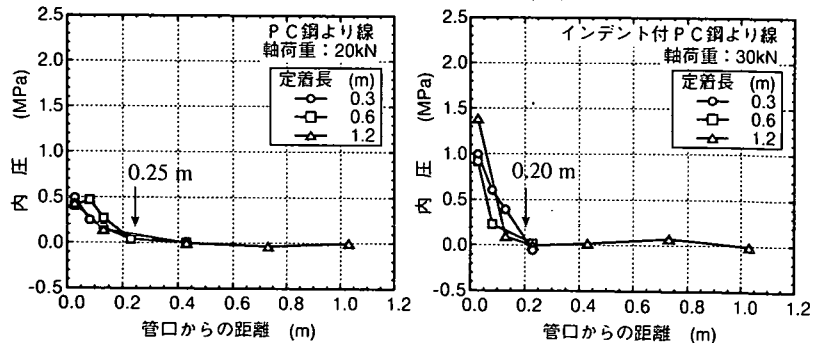


図-8 ダイレクタンシー内圧発生状況

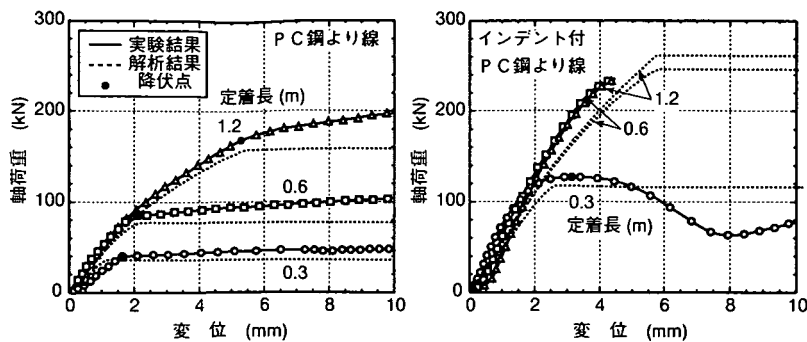


図-10 有効定着長を考慮した解析結果

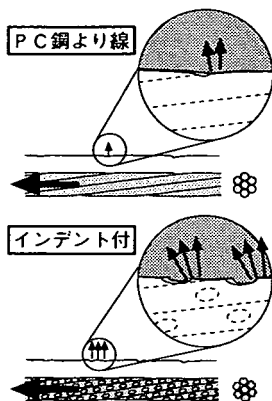


図-9 ダイレイタンス内圧

を図-8に示す。引き抜きによって生じる内圧は、図-9に示すように引き抜き時のボルト/グラウト接触面に発生するダイレイタンス内圧⁽⁵⁾である。これ

によると、定着長によらず、PC鋼より線では0.25mまで、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。そこで、内圧が発生している範囲(長さ)をせん断変位に大きく寄与する有効定着長 L_e として付着剛性を算出する際の定着長とすることにする。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-10に示す。PC鋼より線、インデント付とも実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と考えられる。

(3) 付着剛性の決定フローと原位置引き抜き試験の検証

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簡単に求めることができる。一方、付着剛性は、室内試験の結果から図-11に示すフローで評価する事ができると考えられる。すなわち、有効定着長 L_e 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 L_e を決定し、付着剛性を算定するという方法である。

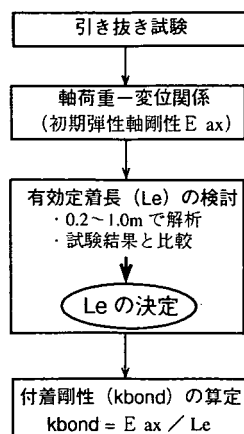


図-11 有効定着長(L_e)と付着剛性の決定フロー

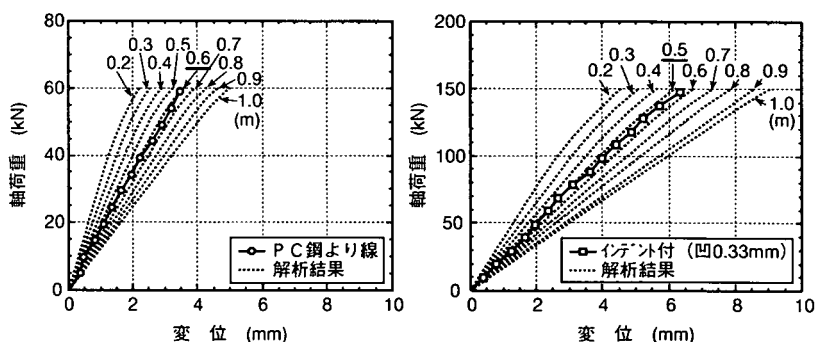


図-12 有効定着長を変化させた解析(1m原位置試験)

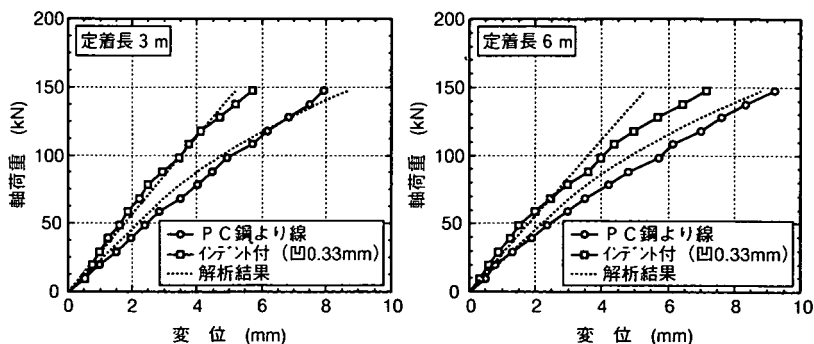


図-13 3、6m原位置試験の解析

1 m 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-12 に定着長を0.2から1.0 mまで0.1 m 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、P C 鋼より線で0.5 m、インデント付で0.6 m となる。この有効定着長 L_e から求めた付着剛性を入力定数とした解析結果（3 m と 6 m の引き抜き試験の解析）を図-13 に示す。解析結果と試験結果は概ねよい対応を示し、図-11 に示した有効定着長（ L_e ）の評価と付着剛性の決定方法が有効であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、ケーブルボルトの定着長の効果の把握として、2種類のケーブルボルト（通常のP C 鋼より線とインデント付P C 鋼より線）について室内と原位置の引き抜き試験を実施した。その結果、定着長に比例して引抜耐力が増加し、設計・解析に使用する付着強度については、原位置の引き抜き試験で求まる最大引抜荷重を定着長で除することにより求めることができる。

一方、付着剛性については、軸剛性を定着長で除して評価すると定着長が大きくなると小さくなり、一義的に評価することができない。これに対して、室内試験の引抜時に発生するダイレイタンス内圧を分析すると、せん断変形に寄与する範囲（有効定着長）は限定され、かつ、定着長に依存せずほぼ同一となる。このため、原位置引き抜き試験結果から有効定着長（ L_e ）を評価し、付着剛性を軸剛性／有効定着長で評価する方法を提案し、検証を行った。この結果、提案した方法の有効性が検証された。

ケーブルボルトの設計・解析定数の決定方法は、1つの原位置試験での検証であるため、今後幾つかの原位置で検証を行っていきたいと考えている。また、トンネル等の空洞の支保・補強効果については、解析的検討及び現場施工などを通して検討していく予定である。

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鋼(株)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)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.
- (2)石塚与志雄, 安部透 (1997) : 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、トンネル工学研究論文・報告集第7巻、論文(2)、pp.7-14.
- (3)石塚与志雄・安部透・今津雅紀 (1998) : インデントを付けたP C 鋼より線の付着抵抗に関する研究、第33回地盤工学研究発表会発表講演集、pp.1977 ~ 1978.
- (4)Itasca Consulting Group Inc. (1996) : FLAC Version 3.3 Manual
- (5)Hutchinson, D. J. and Diederichs, M. S. (1996) : Cablebolting in Underground Mines, BiTech Publishers Ltd. (Canada)