

ロックボルトの施工管理における引抜試験結果の一評価

AN EVALUATION OF PULL-OUT TEST RESULTS FOR CONTROLLING THE QUALITY OF THE INSTALLED ROCKBOLT

永井哲夫*・孫 建生*・國村省吾**・池尻 健**

Tetsuo NAGAI, Jian-Sheng SUN, Shogo KUNIMURA, Takeshi IKEJIRI

Pull-out test is available to control the quality of installed rockbolt. In the case of tunnel excavation, in Japan, firstly pull-out force is applied to a grouted rockbolt until 10tonf, secondly engineers evaluate the performance of the rockbolt reinforcement system on the basis of the linearity of its load-displacement curve. However, there are a number of causes which can seriously affect pull-out test results, so that it is not easy to make an accurate evaluation. In this paper, the authors propose a control method, which is capable of evaluating the performance of the rockbolt system, based on the concept of "pull-out gradient" and demonstrate its applicability from mechanical point of view.

Keywords : grouted rockbolts, pull-out test, quality control, pull-out gradient, load-displacement curve

1. はじめに

山岳トンネルの標準工法である NATM においては、ロックボルトが主要支保部材として用いられており、その施工管理のためにロックボルトの引抜試験が実施される。標準タイプのロックボルトは、SD35、D25の異形棒鋼の周囲をモルタル充填することにより地山と全面定着させるものであり、岩盤地山を対象とする場合、引抜試験においては 10tonf まで引抜荷重を載荷して、それまでの引抜荷重-変位曲線の直線性を検討したり、事前試験によって得られた引抜試験結果と比較することにより、ロックボルトの定着効果が確認されている¹⁾。このように、施工管理における引抜試験の結果に関しては定性的な評価にとどまっているのが現状である。海外においても同様の傾向が見られる²⁾。また、この試験結果は、地山の強度、モルタルと地山の定着状況および孔口付近の状態などにより大きく変化するため、前述のような評価方法では定着効果を十分確認できないことがある。

著者らは、引抜荷重-変位曲線において 10tonf 近傍の曲線の勾配（“引抜勾配”と定義する）に着目すると、ロックボルトの定着効果を的確に評価できる可能性があることを既に報告している³⁾。そこで本研究

* 正会員 博士(学術) (株)青木建設 技術本部研究所 土木研究室

** 正会員 (株)青木建設 技術本部研究所 土木研究室

では、まず引抜勾配を用いたロックボルトの施工管理の有効性を原位置におけるロックボルトの引抜実験により検討する。次に、引抜勾配の定量的評価のために理論式を誘導し、原位置および室内実験の結果をもとにその妥当性の検証を行う。最後に、引抜勾配により施工管理を行う場合、その管理基準値をどのように決定すればよいかについて考察する。なお、土砂地山を対象とする場合は引抜耐力が 10tonf 以下になることもあるため、本研究においては検討の対象外とする。

2. 引抜試験結果の評価の現状と問題点

一般に、ロックボルトの施工管理として実施される引抜試験に関して、示方書などでは定性的な記述がなされており⁴⁾、実務においてはそれに基づき技術者がそれぞれの方法でロックボルトの定着効果を確認しているのが現状である。いま、NATMでトンネルを掘削している当社作業所に対して、「具体的には、引抜試験結果からどのようにしてロックボルトの定着効果を確認しているか」というアンケートを実施し、回収できた結果をまとめると図-1のようになる。ここで、対象とした作業所は日本全国に位置しており、さまざまな用途のトンネルを施工している。この図から、ほとんどが 10tonf の引抜荷重を載荷して、それにより得られる引抜荷重-変位曲線の直線性や変位量より定着効果を確認していること

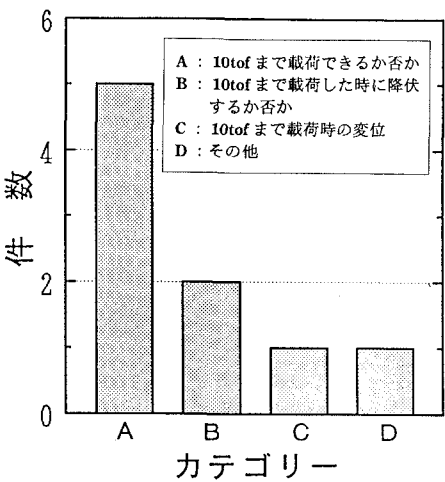


図-1 定着効果の確認方法の分類と頻度

が分かる。なお、「その他」として挙げられているのは土砂地山トンネルであり、ここでは 10tonf まで引抜荷重を載荷できないため、岩盤地山トンネルのような評価方法が用いられていない。

次に、図-1に示した各方法の有効性に関して考察するため、さまざまな条件下で原位置に打設されたロックボルトの引抜実験を行った。ここでは、表-1に示すようにロックボルトおよび充填材料の諸元、削孔径、充填状況などを変化させて、実際に考えられるさまざまな状態を表現している。なお、引抜実験は凝灰

表-1 実験条件の一覧表

実験番号	ボルト長さ			ボルト材質		ボルト直径			削孔径 (mm)				充填材料		W / C (%)			注入順序		充填状態
	2m	3m	3.6m	SD35	TD24	D 22	D 25	φ 40	φ 45	φ 50	モルタル	ミサケ	35	40	65	先注	後注			
1,2,3	○			○			○	○			○			○		○		完全充填		
4,5,6	○			○			○	○			○				○	○		完全充填		
7,8	○			○			○	○			○		○			○		完全充填		
9,10		○		○			○	○			○			○		○		完全充填		
11,12,13			○	○			○	○			○			○		○		完全充填		
14,15,16		○		○			○		○			○		○			○	先端2m空隙		
17,18,19		○		○			○		○			○		○			○	先端1m空隙		
20,21	○			○			○		○		○			○		○		部分的空隙		
22,23	○			○			○	○			○			○		○		断面欠損		
24,25	○			○			○		○		○			○		○		全面縁切り		
26,27,28	○			○			○		○			○		○			○	亀裂モデル		
29,30,31	○			○			○		○		○			○		○		完全充填		
32,33,34	○			○			○			○	○			○		○		完全充填		
35	○			○		○		○			○			○		○		完全充填		
36,37,38	○				○		○	○			○			○		○		完全充填		
39,40,41	○			○			○	○			○			○		○		完全充填		

岩 ($\sigma_c = 187.1\text{kgf/cm}^2$ 、 $E = 8.75 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $C_{uu} = 78.1\text{kgf/cm}^2$ 、 $\phi_{uu} = 33.2^\circ$) よりなる切取斜面において打設 7 日後に実施した。いま、これらの実験結果からロックボルトの定着効果の良否を最大引拔荷重または 10tonf 載荷時の変位との関係でまとめると図-2 および図-3 のようになる。ここで、定着効果が良好というのは、ロックボルトの降伏または破断まで引拔荷重を載荷できたものの、逆に不良というのは、降伏に至る前に抜け出したものとそれぞれ定義している。このことは、「ボルト材の効果を十分活用するためには、一般に (降伏軸力) $\leq$ (引拔耐力) となるように設計することが望ましい¹⁾。」という事項と対応している。

図-2 より、最大引拔荷重はすべて 10tonf 以上となっており、10tonf まで載荷できるか否かで良否を判断できないことが分かる。また、図-3 より、10tonf 載荷時の変位の大小と定着効果の良否の間にはほとんど相関はないことが分かる。そのため、管理基準としては不十分である。一方、前述の引拔勾配を図-4 に示すような方法で求め、これを定着効果の良否との関係でまとめると図-5 のようになる。この図から、引拔勾配の大小に応じて良好な領域Ⅰ、良否混合領域Ⅱおよび不良な領域Ⅲに分類できることが分かる。そこで、これらの領域に対応して注意レベルを設けることにより、ロックボルトの施工管理が可能になると考えられる。同じ勾配でも、引拔荷重-変位曲線の立ち上がり部の勾配 (初期勾配) について同様にしてまとめると図-6 のようになる。これより、初期勾配は引拔勾配に比べると引拔試験の状態などの影響に敏感であるため不安定な値を示し、管理基準としては十分でないことが分かる。

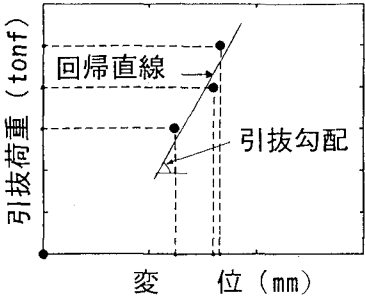


図-4 引拔勾配の求め方

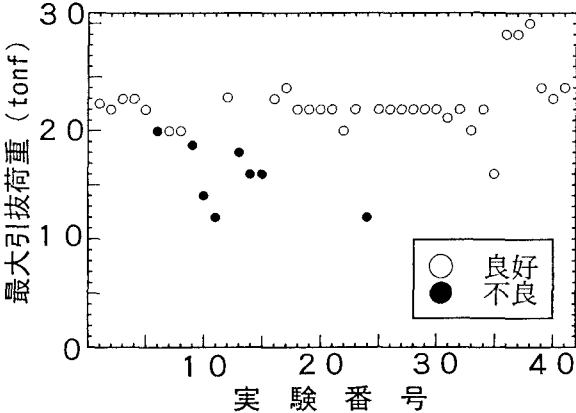


図-2 最大引拔荷重と定着効果の良否

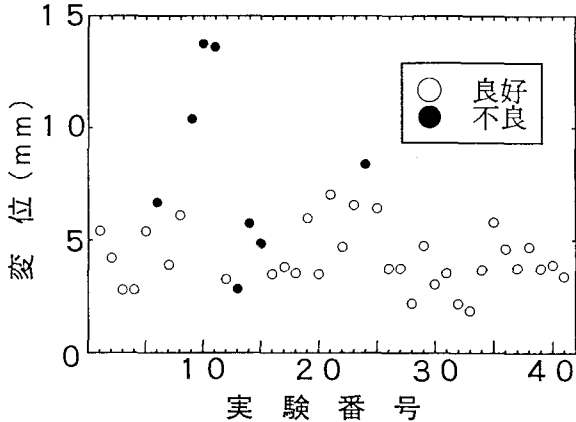


図-3 10tonf 載荷時の変位と定着効果の良否

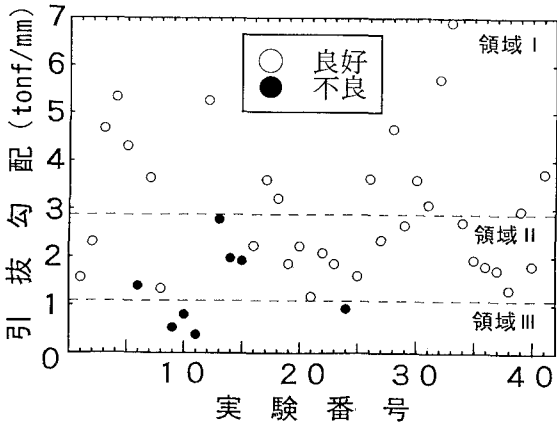
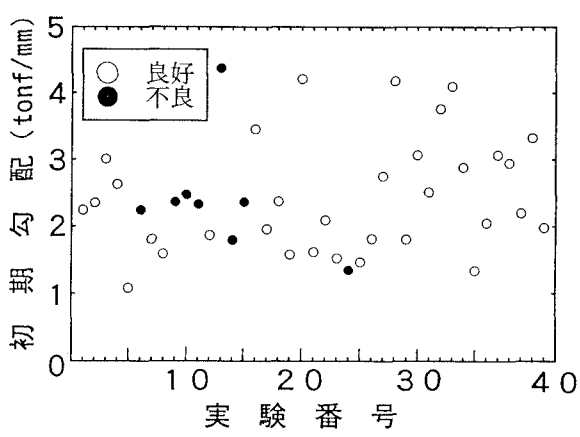


図-5 引拔勾配と定着効果の良否

以上のことから、ロックボルトの施工管理として行われる引抜試験に関して、その結果をもとに定着効果の確認を行う場合、定性的で経験的な方法により評価がなされているのが現状である。本研究では、原位置における引抜実験の結果をもとに、それらの方法の有効性について検討を行い、定着効果を十分に確認できない場合があることを明確にした。それに対して、著者らが提案する引抜勾配を用いると、ロックボルトの定着効果の評価が可能であることを示した。



図－6 初期勾配と定着効果の良否

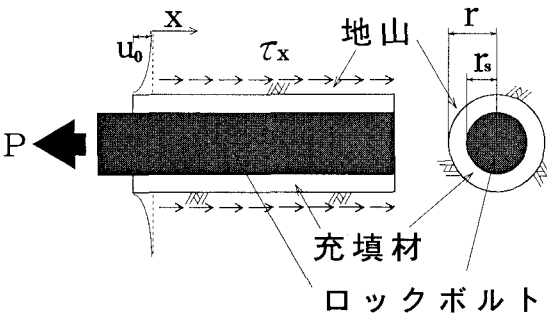
3. 引抜勾配の定量的評価

ロックボルトの施工管理として実施される引抜試験により定着効果の確認を行う場合、引抜勾配が有効な目安となることを前章で示したが、施工管理に際してはその管理基準値の設定が必要となる。最終状態まで載荷した引抜試験に関するデータが膨大にある場合には、それらをもとに経験的に管理基準値を設定することが可能である。しかし、現状では十分なデータを保有していないことから、本研究では解析的に管理基準値を設定する方法について検討する。

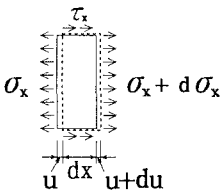
まず、引抜勾配を定量的に評価するため、その理論式の誘導を行う。ここでは、ロックボルトと充填材（モルタル）が一体となって挙動し、引抜荷重に対してロックボルト体（ロックボルト＋充填材の複合体）と地山の周面摩擦力が抵抗すると仮定して、図－7のように引抜試験の状態をモデル化する。そこで、このモデルにおいて微小区間の力のつり合い（図－8参照）を考えると次式が得られる。

$$\frac{d \sigma_x}{d x} = - \frac{\tau_x \cdot 2 \pi r}{\pi r^2} = - \frac{2 \tau_x}{r} \quad \cdots (1)$$

ここで、 $d \sigma_x$ は引抜荷重による軸応力増分、 τ_x はロックボルト体と地山間の周面摩擦抵抗、 r は削孔径を表す。式 (1) にロックボルト体の応力－ひずみ関係を代入して整理すると次のようになる。これは、引抜試験時のロックボルト体の支配方程式を表している。



図－7 ロックボルトの引抜試験のモデル化



図－8 微小区間の力のつり合い

$$\frac{d^2 u}{d x^2} = \frac{2 \tau_x}{E r} \quad \cdots (2)$$

ここで、Eはロックボルト体と等価な弾性係数であり次式で求められる。

$$E = E_s \left(\frac{r_s^2}{r^2} \right) + E_g \left\{ 1 - \left(\frac{r_s}{r} \right)^2 \right\} \quad \cdots (3)$$

なお、E_s および E_g はそれぞれ異形棒鋼および充填材の弾性係数を示す。

引抜勾配は、引抜荷重－変位曲線において 10tonf 近傍の曲線の勾配であることから、ロックボルト体と地山の境界面の力学的挙動は弾性範囲内におけるものであると仮定し、周面摩擦抵抗（ τ_x ）と境界面における相対変位（ u ）の関係を次式で表現する（図－9 参照）。

$$\tau_x = k_s u \quad \cdots (4)$$

式 (4) を式 (2) に代入して整理すると、支配方程式は定数係数線形同次方程式となるから、その一般解は次のように得られる。

$$u = C_1 e^{\alpha x} + C_2 e^{-\alpha x} \quad (C_1 \text{ および } C_2 \text{ は任意定数}) \quad \cdots (5)$$

ここで、 α は次のように表せる。

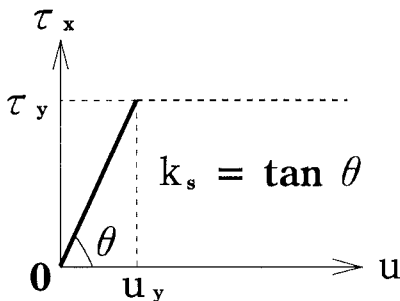
$$\alpha^2 = \frac{2 k_s}{E r} \quad \cdots (6)$$

式 (5) にロックボルトの口元（ $x = 0$ ）および他端（ $x = l$ ）における境界条件をそれぞれ代入して解くと、ロックボルト体の変位（ u ）と引抜荷重（ P ）の関係式が求められる。

$$u = \frac{P}{E \pi r^2 \alpha} \frac{e^{\alpha(x-l)} + e^{-\alpha(x-l)}}{e^{\alpha l} - e^{-\alpha l}} \quad \cdots (7)$$

引抜試験で得られる変位はロックボルトの口元のものであることを考えると、最終的に引抜勾配（POG）の理論式が次のような形で表せる。

$$POG = \frac{P}{u_0} = E \pi r^2 \alpha \frac{e^{\alpha l} - e^{-\alpha l}}{e^{-\alpha l} + e^{\alpha l}} \quad \cdots (8)$$



τ_y : 降伏時の周面摩擦抵抗

u_y : 降伏時の変位量

k_s : ロックボルト体と地山間のせん断バネ定数

図－9 ロックボルト体と地山の境界面の力学特性

次に、ここで誘導した引拔勾配の理論式の妥当性を検証するために、実験結果との対比を通して考察する。前述の原位置における引拔実験ではロックボルト体と地山のせん断バネ定数が未知であることから、式 (8) から逆算したバネ定数をせん断地盤反力係数 (表-2) と比較し検討する。このとき、式 (8) をバネ定数に関して直接解くことができないことから、ニュートン-ラフソン法を用いて数値解析的にバネ定数を求めている。検討に用いたデータは、図-10に示すように実験において得られた代表的な引拔荷重-変位曲線を有するものである。逆算して得られたバネ定数は、図中の記号に合わせて示すと A が 22.6kgf/cm^3 、B が 23.3kgf/cm^3 、C が 16.7kgf/cm^3 となっており、表-2の軟岩の数値と良い対応を示している。次に、引拔試験に際してロックボルトにゲージを貼付して軸ひずみに関するデータを採取し、これを引拔荷重-変位曲線と合わせて報告している論文から、ゲージから求めたバネ定数と引拔勾配の実測値から逆算したバネ定数を求めてまとめると図-11のようになる。これより、本研究で誘導した引拔勾配の理論式は妥当であることが分かる。

この理論式を用いて管理基準値の設定を行う場合、ロックボルト体と地山のせん断バネ定数を適切に評価することが重要である。バネ定数の評価は、事前試験のときに引き抜けるような条件のもとで载荷を行い、そのときの引拔勾配から逆算することにより適切に行えると考えられる。

表-2 せん断地盤反力係数⁵⁾

地盤の種類	k_s (kgf/cm ³)
硬 岩	50 ~ 100
軟 岩	15 ~ 30
風 化 岩	10 ~ 20

k_s : せん断地盤反力係数

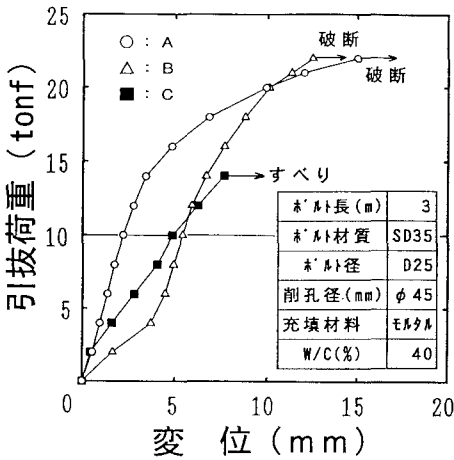


図-10 引拔荷重-変位曲線

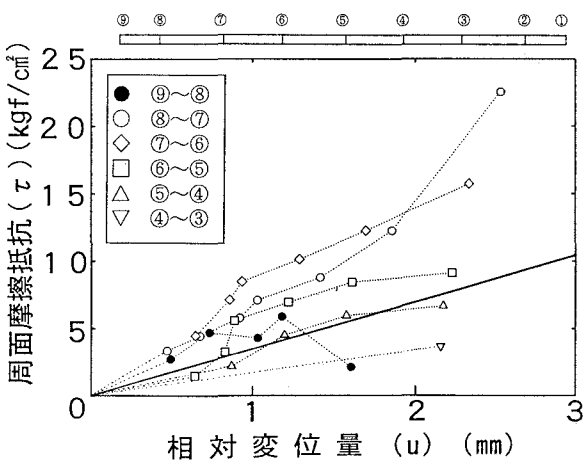


図-11 バネ定数に関する検討結果

5. 参考文献

- 1) (財)鉄道総合技術研究所, NATM 設計施工指針, 1987.7.
- 2) Stillborg, B. : Professional Users Handbook For Rock Bolting, Trans Tech Publications, 1986.
- 3) 本下茂樹・永井哲夫・池尻 健: ロックボルトの施工管理に関する一考察, 土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集第 6 部, pp.162-163, 1994.
- 4) 土木学会: トンネル標準示方書 (山岳編)・同解説, 1986.
- 5) 土質工学会: グラウンドアンカー設計・施工基準, 同解説, 1990.
- 6) 斉藤敏明・村川健一: ロックボルトの引抜き試験に関する検討, 日本鉱業会研究業績発表会, 1983.