

# 大型の岩盤円柱試験体掘削装置の 掘削ビットの検討

岡田 哲実<sup>1\*</sup>・平野 公平<sup>2</sup>・細野 高康<sup>3</sup>

<sup>1</sup>電力中央研究所 地球工学研究所（〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646）

<sup>2</sup>株式会社 セレス（〒270-1166 千葉県我孫子市我孫子1646電力中央研究所内）

<sup>3</sup>株式会社 ダイコンサルタント（〒331-8638 埼玉県さいたま市北区吉野町2-272-3）

\*E-mail: t-okada@criepi.denken.or.jp

原位置岩盤三軸試験法は、大型の円柱試験体（直径40cm，高さ120cm）を用いて原位置で三軸試験を行う新しい試験法である。既往の研究により、均質な軟岩（大谷石）や不均質な岩盤（礫岩）を対象とした実証試験によって、本試験法の適用性が確認された。今後、本試験の実用化に向けて、不連続性岩盤での適用性の検証が必要であるが、そのためには試験体の掘削時間を短縮し、試験体の品質を向上させる必要がある。そこで、本研究では大型の円柱試験体を掘削するための新しい掘削装置を開発し、モルタルを用いた装置の確認試験を行った。また、本装置を不連続性岩盤に適用するに当たり、現地の碎石を用いた人工岩盤を作製し、掘削に適した掘削ビットを選定するための室内実験を行った。

**Key Words :** rock mass, in-situ test, triaxial test, excavation, boring, specimen

## 1. はじめに

ダムや原子力発電所などの大型土木構造物を岩盤上に建設する際、岩盤の強度特性は岩盤せん断試験により、変形特性は平板載荷試験により評価されてきた。しかしながら、これらの試験方法には、①強度特性と変形特性を別々の試験法により評価しなければならない、②基本的に要素試験ではないために応力とひずみの関係を直接求められない、③試験面の整形によるゆりみの影響を受けやすい、などの問題があった。これらの問題を解決することができる新しい試験法（以降、原位置岩盤三軸試験法と呼ぶ）が考案され、大型の試験体（直径40cm，高さ120cm）を用いる試験装置が開発された<sup>1)</sup>。その後、均質な軟岩（大谷石）や不均質な岩盤（礫岩）を対象とした実証試験によって、この試験法の適用性が確認され、本試験法が従来の岩盤試験に代わる試験法となり得ることが示された<sup>2)3)4)</sup>。

今後、実用化に向けて、不連続性岩盤での適用性の検証が必要であるが、そのためには試験体の掘削時間を短縮し、試験体の品質を向上させる必要がある。そこで、本研究では大型の円柱試験体の掘削するための新しい掘削装置を開発し、モルタルを用いた装置の確認試験を行った。また、本装置を不連続性岩盤に適用するに当たり、現地の碎石を用いた人工岩盤を作製し、掘削に適した掘

削ビットを選定するための室内実験を行った。

## 2. 従来の試験体掘削方法

従来の掘削装置は、いわゆる簡易ボーリングマシンを用いていた。直径40cmの試験体を掘削し、内径40cm，外径54cmの円筒状の三軸セルを挿入するために、掘削は2回に分けて行っていた。まずは内径40cm，次に内径53cmの単管のコアバーレル（ともに厚さ約15mm）を用いて2つの細溝を掘削後（図-1上），2つの細溝に挟まれたリング状の部分を底部より破断させて回収する（図-1中）。この状態で三軸セルが設置可能となる（図-1下）。均質な岩盤では、これらの作業はそれほど難しくないが、不均質な岩盤や不連続な岩盤では、単管の大孔径コアバーレルによる掘削そのものが困難であり、しかもリング状の部分も分離する可能性が高いため、回収をかなり慎重に行う必要があり、結果的に時間を要してしまう。

## 3. 新しい試験体掘削方法

新しい掘削装置は、リング状の部分を1度に掘削する



図-1 従来の掘削手順（写真）

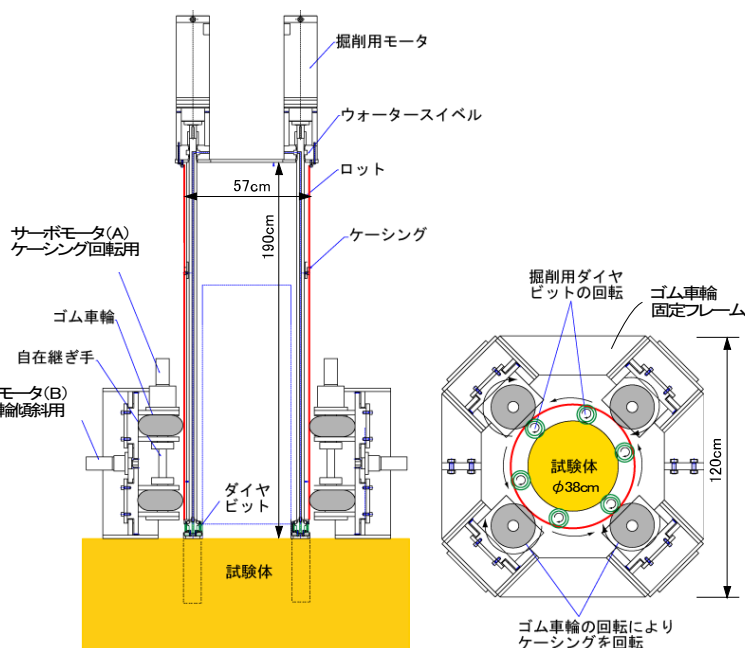


図-2 新しく開発した掘削装置

方法とした（図-2）．複数個（最大6個）の掘削用モーターからロッドを介して接続したダイヤビットで掘削を行う．また、これらの掘削用モーターはケーシングに設置されており、ケーシング自体はケーシング外部に設置したサーボモーター（A）に取り付けたゴム車輪で回転する．このダイヤビットの回転とケーシングの回転で、リング状の部分掘削する仕組みである．ケーシングの掘進（上下動）は、上下2個のゴム車輪をサーボモーター（B）で傾斜させることにより、ケーシングの回転と同時に進行．この新しい掘削方法は、従来のボーリングによる掘削方法と比較して、以下のメリットを有する．

- ① 小型の掘削ビットを複数設置するので、大型のボーリングマシンを必要としない．
- ② ケーシング（通常のコアバーレル）と試験体が接触しないため、ケーシングのぶれによるダメージを受けにくい．
- ③ 岩盤の欠片が、コアとケーシングの隙間に入っても詰まりにくく、掘進に影響を与えない．

なお、ゴム車輪はケーシングのブレ止め（セントライザー）の役割も果たしている．また、ケーシング内部にはベアリング付のシューおよびコアパックが設置しており、コアパックはケーシングとともに回転しない構造になっている．掘削後にはゴム車輪固定フレームとケーシング上部を取り外し、三軸セルをそのまま設置できる．

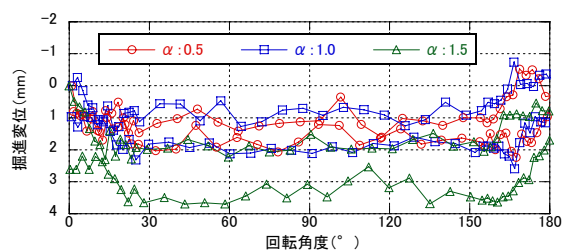


図-3 ケーシング回転角度と掘進変位の関係

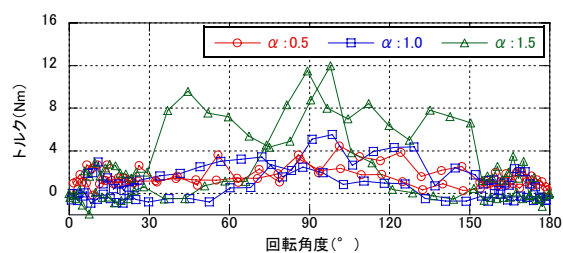


図-4 ケーシング回転角度とトルクの関係



図-5 掘削完了したモルタル試験体（写真）

#### 4. 掘削装置の計測・制御および確認試験



図-6 掘削装置の外観（写真）



図-7 掘削ビット（写真）

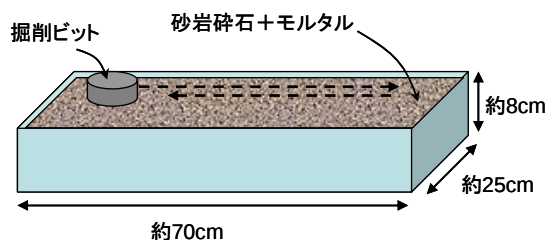


図-8 型枠の寸法

試験体の掘削の良否が試験結果の品質に影響を及ぼすため、掘削は計測しながら実施できるようにした。現在の計測項目は次のとおりである。①軸力：装置全体の荷重をロードセルで計測，②トルク：掘削用モーターに付属，③掘進変位：ケーシングの変位を計測，④送水圧：掘削モーターのスイベル入口に付属，⑤送水量：各掘削モーターに別れる前に1箇所計測，⑥回転角度：ケーシングの回転角度，⑦ケーシング変位：ケーシングのぶれを計測，⑧フレーム変位：ゴム車輪を固定しているフレームのぶれを計測。

掘削のための制御項目については次の3つに決めた。①ケーシングの回転速度 $R$ ，②ケーシング1回転当たり

の掘進量 $\alpha$ ，③送水量 $L$ 。これら3つの制御項目である $R$ ， $\alpha$ ， $L$ を変化させながら掘進を行った結果、概ね想定通りの動作を確認できた（図-3： $\alpha$ をパラメータとした場合の掘進変位）。また， $\alpha$ や $R$ が大きくなると軸力やトルクが大きくなることがわかった（図-4： $\alpha$ をパラメータとした場合のトルク）。 $L$ の変化は軸力やトルクにほとんど影響を与えないことがわかった。途中でいくつかのトラブルが生じたが、最終的には約120cmのモルタル試験体を掘削することができた（図-5）。

## 5. 掘削ビットの選定方法

開発した装置を不連続性岩盤に適用するに当たり、掘削先端部のダイヤモンドビット（掘削ビット）を適切に選定することがたいへん重要である。しかしながら、対象としている岩盤に対して、どのような掘削ビットを使用するかについては、参考となる情報がほとんど見当たらない。そこで、掘削ビットを選定するために、掘削装置とは別に掘削ビットを一方向に往復可動させる装置を作製し（図-6）、掘削ビット選定のための実験を行った。

実験にはマトリックスの硬さ、ダイヤモンドの量、ダイヤモンドの大きさの異なる5種類のダイヤモンドビット（インプリ）を用いた（表-1、図-7）。表中のボンドは（ダイヤモンド先端のダイヤモンド粉末の間の）マトリックスの硬さを表し、注釈に示すとおり、アルファベットがAに近いほど硬い。ダイヤモンドサイズはAに近いほど粗粒である。T3とT6については、2種類の粗さの異なるダイヤモンドを混合している。ダイヤモンドの量はAほど少ない。

表-1 掘削ビットの種類一覧

| No  | ボンド | ダイヤモンド<br>サイズ | 比率   | ダイヤモンド<br>サイズ | 比率 | ダイヤモンド量 |
|-----|-----|---------------|------|---------------|----|---------|
| T3  | B   | B             | 多    | A             | 少  | M       |
| T5  | B   | B             | 少    | A             | 多  | M       |
| T6  | B   | A             | 100% | —             | —  | I       |
| T8  | B   | A             | 100% | —             | —  | M       |
| T11 | C   | A             | 100% | —             | —  | K       |

注) ボンド：A（硬）→D（軟），ダイヤモンド：A（粗）→C（細），ダイヤモンド量：A（低）→Q（高）

掘削する材料については、原位置岩盤三軸試験を実施する予定のある現場より採取した岩盤碎石を軟質なモルタル系材料（配合重量比＝水：2.1，セメント：0.9，カオリン：1.0）で固めて作製した。モルタル系材料は風化した岩盤部分を模擬し、かつビットの良否が判断しやすいようにあえてかなり軟質なものを使用した（2日後

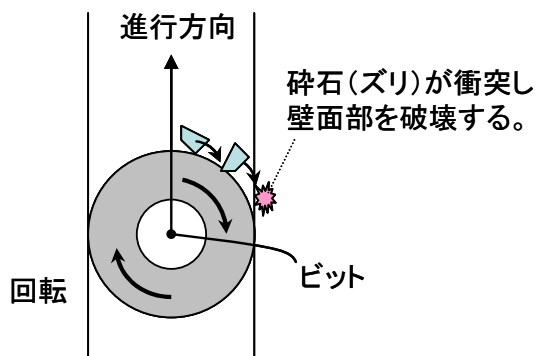


図-9 ビットの回転部の概要

の一軸圧縮強さ $q_u=1.5\text{MPa}$ 程度）。岩盤碎石については、試験条件をそろえるため、ふるいわけによって、 $53\text{mm}\sim19\text{mm}$ 、 $19\text{mm}\sim9.5\text{mm}$ 、 $9.5\text{mm}\sim4.75\text{mm}$ の3つに分類し、それぞれを重量比で5:3:2に分けて配合し、モルタル系材料と混合した。

混合した人工岩盤材料は、図-8に示す型枠に打設し、2日経過後、試験に用いた。掘削ビットは一方方向に約 $10\text{cm}$ 可動させた後、約 $1.2\text{mm}$ 下降させ、また戻す方向に $10\text{cm}$ 可動させる。これを約 $3.0\text{cm}$ まで繰り返す。その後、下降量を $2.4\text{mm}$ に変更して下降量が最初から $7.0\text{cm}$ になるまでこれを繰り返した。

試験結果の評価については、掘削のメカニズムを掘削中目視で確認するとともに、掘削のトルクと荷重の計測を行った。また、掘削終了後に切断面の状況と掘削の磨耗の状況を観察した。これらの計測の観察結果を元に、最適な掘削ビットを選定することにした。なお、送水量も掘削の良否を決定する重要なパラメータであるが、今回は $1.0\text{L/min}$ に固定した。

## 6. 掘削ビットの選定試験の結果

### (1) 掘削中の観察（掘削のメカニズム）

掘削中の観察では、ビットの違いによる明瞭な差は確認できなかった。というのも、当初予想したよりも精度よくきれいな溝（スリット）を掘削することができなかった。下降量が当初の $1.2\text{mm}$ の時はまだ比較的よかったものの、下降量が $2.4\text{mm}$ になるとかなり底面や側面から碎石が浮出したり、剥落したりする現象が見られた。また、図-9に示すとおり、剥落した碎石はビットの回転に巻き込まれ、巻き込んだ碎石が側壁に衝突し、さらに側壁を損傷させてしまう悪循環がみられた。以上のことから、碎石や掘削ズリをビットに近づけないことがきわめて重要である。

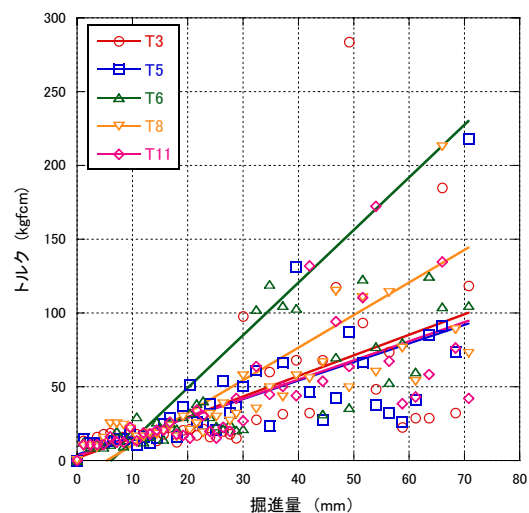


図-10 トルクの計測結果

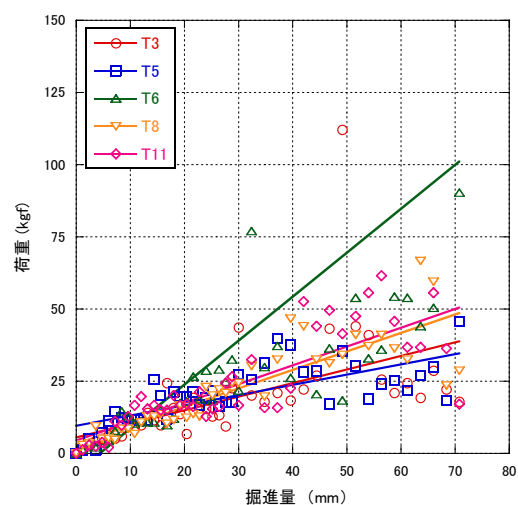


図-11 荷重の計測結果

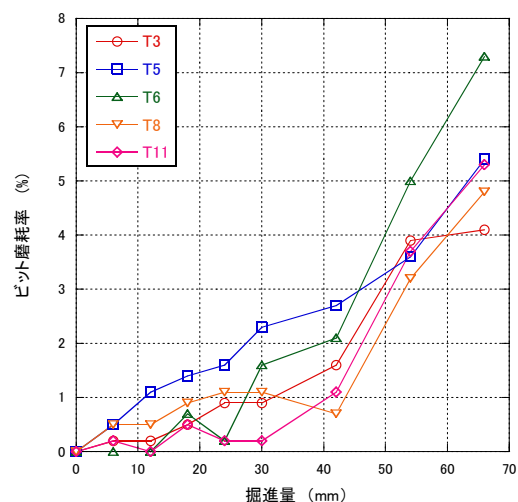


図-12 ビットの磨耗率

### (2) 荷重とトルクの計測結果

掘削一往復中のトルクと荷重の最大値の計測結果を図-10、図-11に示す。掘進量が進むにつて、トルクも荷重も値が大きくなる傾向がある。これは、剥落した碎石

| No. | 底面～端部                                                                               | 側壁面                                                                                  |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| T3  |    |    |
| T5  |    |    |
| T6  |   |   |
| T8  |  |  |
| T11 |  |  |

図-13 切断面の状況（写真）

にビットが噛むために発生するようである。特に下降量を2.4mmに変更した掘進量30mm以上ではその値が大きくなる傾向が見られる。

トルク、荷重ともにばらつきが多いが、T6のみは他と比較して若干を大きな値を示している。その他については目立った差は認められない。

### (3) 掘削ビットの磨耗状況

掘削中にノギスでビットの厚みを計測した結果を図-12に示す。図の縦軸であるビット磨耗率（%）は磨耗量を初期のビットの厚みで割った値である。ノギスの計測は計6点で行い、その平均値を図にプロットしている。

計測誤差により磨耗量が上下しているものも見られるが、T6のみは他と比較したやや磨耗量が多いように見られる。その他については目立った差は認められない。

#### (4) 掘削後の切断面

掘削後の試験体の底面～端部と側壁部の写真を図-13に示す。開発した掘削装置では側壁部の一方が試験体となる構造である。図より、T3、T5、T6については、底面部や側壁部が剥離し、一部型枠がむき出しの状態になっている。特にT6については、残っている部分の方が少ないような状況である。他と比較して明らかにT8の加工精度は最もよいことがわかる。

### 7. 考察

前節の結果(2)～(4)の検討結果を表-2にまとめた。これらから総合評価するとT8が最も適したビットであり、T6が最も適さないビットであることがわかる。それ以外については明瞭な違いを判断することができない。T6とT8の違いを表-1で確認すると、違うのはダイヤモンドの量のみである。よって、今回の掘削方法においてはダイヤモンドの量が重要であると判断される。

表-2 掘削ビットの種類一覧

| No  | 荷重 | トルク | ビット<br>磨耗 | 切断面<br>状況 | 総合評価 |
|-----|----|-----|-----------|-----------|------|
| T3  | ○  | ○   | ○         | △         | ○    |
| T5  | ○  | ○   | ○         | △         | ○    |
| T6  | △  | △   | △         | ×         | △    |
| T8  | ○  | ○   | ○         | ◎         | ◎    |
| T11 | ○  | ○   | ○         | ○         | ○    |

### 8. おわりに

大型の円柱試験体を掘削するための新しい掘削装置を開発し、モルタルを用いた装置の確認試験を行った。その結果、想定どおりの動作を確認することができた。また、本装置を不連続性岩盤に適用するに当たり、現地の碎石を用いた人工岩盤を作製し、掘削に適した掘削ビットを選定するための室内実験を行った。その結果、最も適すると思われるビットを1つ選定することができた。

今後はこれらの結果を踏まえ、開発した掘削装置を現地に適用する予定である。

謝辞：掘削装置の設計・作製については、立川機械製作所の立川日出男氏、立川智勝氏にご協力いただきました。また、実験を行うにあたり、株式会社セレスの平賀健史氏にご協力いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 谷和夫、立川日出男、金子進、豊岡義則：孔底の中空円筒試験体を利用した新しい岩盤試験装置の開発、第31回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.82-86、2001。
- 2) Tani, K., Nozaki, T., Kaneko, S., Toyooka, Y. and Tachikawa, H. : Down-hole triaxial test to measure average stress-strain relationship of rock mass, *Soils and Foundations*, Vol.43, No.5, pp.53-62, 2003.
- 3) 岡田哲実、野崎隆司、池見元宣、谷和夫：電中研式原位置岩盤力学試験法の開発、電力中央研究所研究報告U02023、2003。
- 4) 岡田哲実・谷和夫・大津仁史・小早川博亮・金谷守・伊藤洋：原位置三軸圧縮試験の礫岩地盤への適用性の検討、第35回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、2006。

## STUDY ON THE DIAMOND BIT FOR EXCAVATION DEVICE OF LARGE-SCALE CYLINDRICAL SPECIMEN FOR ROCK MASSES

Tetusji OKADA, Kouhei HIRANO and Takayasu HOSONO

In-situ triaxial test for rock masses is conducted on a cylindrical specimen of 400mm in diameter and 1050mm in height. Trial series of the tests were successfully conducted at the site of rhyolitic tuffaceous rock and rudaceous rock. In order to put this test method to practical use, further examinations are needed to enhance applicability to discontinuous rocks, and thus it is important to improve the drilling method of the specimens. A new excavation device was developed to make a large cylindrical specimens and was applied in the mortar. Moreover, the diamond bit was selected based on the results of the laboratory test using the artificial discontinuous rock.