

岩盤不撓乱試料サンプリング装置の開発

吉田 次男^{1*}・大西 有三²・西山 哲²

¹関西電力株式会社 電力技術研究所（〒661-0974 兵庫県尼崎市若王寺 3 丁目11-20）

²京都大学大学院 工学系研究科都市環境工学専攻（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂）

*E-mail: yoshida.tsugio@e3.kepco.co.jp

代表的な岩盤サンプリング手法としてボーリングが挙げられるが、軟岩等に対しては必ずしも不撓乱状態でサンプリングできないのが現状である。そこで、簡便に試料の乱れを抑える手法として、削孔水流出機構の改良や先端駆動型装置の開発を行った。削孔水流出機構については、ウォーターウェイの形状を工夫し、軟岩等の弱層部では削孔水量を抑えることで、ビット部からやや外向きに流出させ粘土分の洗掘を低減する機構である。一方、硬岩に対しては、従来程度の削孔水量で下向きにも相当量流出させ、効率的にビットを冷却する機構である。先端駆動型装置は、ロッドの回転によるブレを低減するために、地上よりロッドを通して送られた圧送水により、先端のビット部のみ回転させる方式である。

Key Words : *sampling, soft rock, hard rock, boring, water way, tip drive type boring*

1. はじめに

岩盤構造物の安定性は、岩盤の不連続面特性や軟岩などの弱層部の物性に大きく支配される。これらの物性を評価するための代表的なサンプリング手法としてボーリングが挙げられるが、必ずしも不撓乱状態でサンプリングできないのが現状である^{1), 2), 3)}。そこで、簡便に試料の乱れを抑える手法として、削孔水流出機構の改良や先端駆動型装置の開発を行った。

従来ボーリングの場合、削孔水がビット部のウォーターウェイより下向きに流出するため、軟岩等の弱層部をサンプリングする場合、削孔水の一部が試料に浸透し、粘土分を洗掘する。そこで、軟岩や粘土層などの弱層部をサンプリングする際には、削孔水がやや外向きに流出することで試料の洗掘を防止するウォーターウェイの開発を行った。軟岩や粘土層などの弱層部は、硬岩と混在している場合が多い。そのため、開発においては同一のビットで対応できる工夫を行った。軟岩や粘土層に対しては、硬岩に比べ削孔水を抑えることでやや外向きに流出させ、硬岩に対しては従来程度の削孔水量で下向きにも相当量流出し、効率的にビットを冷却するウォーターウェイ形状を考案した。

ボーリングでサンプリングする際は、地上に設置した削孔装置によりロッド全体を回転させる。そのため、深度が大きくなるとロッドのぶれにより試料の乱れが生じる⁴⁾。サンプラーのぶれを抑える手法として、ロッド

の数箇所にはスペーサーを取り付け孔壁とのクリアランスを少なくする方法等が考えられるが、簡便な手法として先端駆動式ボーリングを採用した。

2. 削孔水流出機構の改良

(1) 室内実験によるウォーターウェイ形状評価

軟岩や粘土層などの弱層部をサンプリングする際には、削孔水を抑えることでやや外向きに流出し、硬岩に対しては、従来程度の削孔水量で下向きにも相当量流出し効率的にビットを冷却できるウォーターウェイの形状を考案するために、ボーリング装置のコアチューブとビット部を模擬した装置で室内実験を行った。装置は削孔水が目視できるようアクリルで作製し、アウターチューブ（外径 66mm）とインナーチューブ（外径 57mm）の間に削孔水を流し、ウォーターウェイの形状を種々変化させ、削孔水流出状況を確認して最適な形状を評価した。流量は、過去のボーリング実績を勘案し、軟岩は 5 ℓ /min 程度、硬岩は 10 ℓ /min 以上として評価した。

主な検討項目は以下のとおりであり、種々のウォーターウェイ形状で削孔水の流出特性を評価した。①ウォーターウェイ底面の V 字切り込みの有無および方向②ウォーターウェイ底面の V 字切り込み長さ③ウォーターウェイ側壁の拡がり方向④ウォーターウェイ内面の V 字切り込み長さ⑤ウォーターウェイ幅である。

表-1 実験結果

①ウォーターウェイ底面のV字切り込みの有無, 方向	アウターチューブの内側が広くなる方向にV字切り込みを入れることで, 流量が少ない場合に削孔水がやや外側に流出する. 外側に広くなる方向にV字切り込みを入れる場合や切り込みを入れない場合は, 流量に関係なく削孔水は下向きに流出する.
②ウォーターウェイ底面のV字切り込み長さ	V字切り込みの先端がアウターチューブの外周と一致した場合, 削孔水の乱れが小さい. V字切り込みの先端がアウターチューブの外周と一致しない場合は, 削孔水の乱れが大きい.
③ウォーターウェイ側壁の拡がり方向	ウォーターウェイ側壁がアウターチューブ外方向にやや拡がると, 流量が少ない場合に削孔水が外方向に流出しやすい. 側壁が平行の場合や外方向に狭くなる場合は, 流量に関係なく削孔水は下向きに流出する.
④ウォーターウェイ内面のV字切り込み長さ	ウォーターウェイ内面のV字切り込み長さが2.5mm程度で, 流量が少ない場合に削孔水が外方向に流出しやすい. 5mm以上では流量に関係なく削孔水は下向きに流出する.
⑤ウォーターウェイ幅	ウォーターウェイが3mm以下では, 流量が少ない場合に削孔水が外方向に流出しやすい. 6mm以上では外向きに流出しにくい.

ウォーターウェイ底面のV字切り込みは、図-1のaの部分の切り込みであり、ウォーターウェイ内面のV字切り込みはbの部分の切り込みである。ウォーターウェイ側面はcの部分である。これらの形状により、水量が少ない場合、削孔水をアウターチューブ外側に導く工夫を行った。

実験結果を表-1に示す。図-1に実験結果から提案した形状を示す。ウォーターウェイ底部にV字型の切り込みを入れるとともに、ウォーターウェイ側壁を外向きに2mm程度拡げることで、軟岩で削孔水量が5ℓ/min程度以下の場合にはやや外向きに流出し、硬岩に対する削孔水量が10ℓ/min程度以上の場合下向きにも相応の流量が流出する機構とした。また、ウォーターウェイの幅を狭くすることで、弱層部で流量が特に少ない場合でも外向きに流出させることができる。

写真-1に従来型のウォーターウェイと提案したウォーターウェイの削孔水流出特性を示す。従来型では、削孔水量が少ない場合、下向きに流出し、流量が増えるに従って外側に拡がるのに対して、提案型では、流量が少ない場合、やや外向きに流出し、水量が増えると内側に拡がる特性を有する。

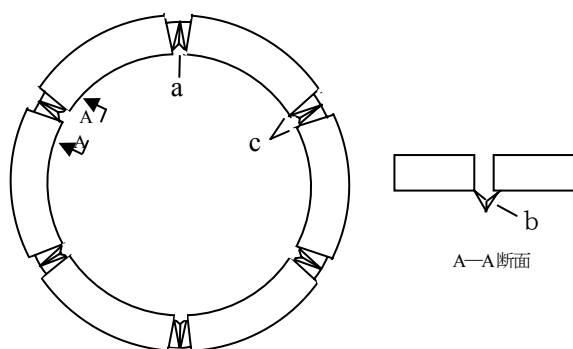


図-1 提案型ウォーターウェイの形状

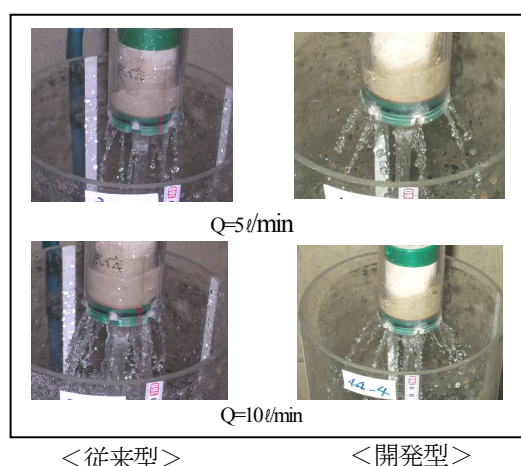


写真-1 削孔水流出特性の比較

(2) ウォーターウェイの妥当性検証

ウォーターウェイの妥当性を検証するために、室内実験結果を基にし、ビットを試作した。水量に応じて削孔水流方向を調整可能であり、削孔水量が少ない場合はやや外向きに流出し、削孔水量が多い場合は下方向にも相当量流出する機能を有するように以下の仕様とした。

- ①採取コア径はφ52mm、コアチューブ外径66mmとした。
 - ②ダイヤモンドビット肉厚は4mmとし、従来より薄くすることで切り込みやすくした。
 - ③ウォーターウェイの形状は、内側の幅3mm、外側の幅5mm、深さ3mmとし、外側の幅を2mm拡げた。
 - ④ウォーターウェイの底部に、V字の切り込みを入れた。
 - ⑤ウォーターウェイの内側に、V字の切り込みを入れた。
 - ⑥コアチューブは、アウターチューブとインナーチューブは二重管式で、スィベルタイプであるため、アウターチューブの回転はインナーチューブに伝達しない。
- 提案型ボーリングビットを備えたボーリング装置を用いて、妥当性の検証を行った。

表-2 供試体作製方法

不連続面が少ない供試体	不連続面が多い供試体	軟岩供試体
平均圧縮強度 37.5N/mm ² の凝灰岩および砂岩の岩塊(1 辺 10～30cm 程度)を縦 585mm, 横 480mm, 高さ 900mm の型枠に投入し, 間隙を平均圧縮強度 1.19N/mm ² の人工軟岩で充填して作成した。人工軟岩の配合は, 重量比で砂 69.3%, 笠岡粘土 7.1%, 普通ポルトランドセメント 6.3%, 水 17.3%である。	平均圧縮強度 0.59N/mm ² の安山岩の岩塊を 1 辺 1 cm から 10cm 程度に砕いた後, 縦 585mm, 横 480mm, 高さ 900mm の型枠に投入し, 間隙を平均圧縮強度 0.59N/mm ² の人工軟岩で充填して作成した。人工軟岩の配合は, 重量比で砂 69.3%, 笠岡粘土 10.1%, 普通ポルトランドセメント 3.3%, 水 17.3%である。	平均圧縮強度 0.03N/mm ² のひん岩および平均圧縮強度 0.59N/mm ² の安山岩の軟岩 (1 辺 5～10cm 程度) を縦 585mm, 横 480mm, 高さ 900mm の型枠に投入し, 間隙を強度 1.19N/mm ² の人工軟岩で充填して作成した。人工軟岩の配合は, 重量比で砂 69.3%, 粘土 7.1%, 普通ポルトランドセメント 6.3%, 水 17.3%である。

供試体は, ①不連続面が少ない供試体②不連続面が多い供試体③軟岩供試体の 3 種類作製した。各供試体の作製方法を表-2 に示す。

作製した供試体を用いて, サンプルング試料の品質確認を行った。回転数は500rpm, 削孔水量は, 2.6ℓ/min と4.1ℓ/min の2ケースで行った。結果は, 写真-2 および表-3 に示す。写真-2 における亀裂発生要因を以下の4 種類に分類して記した。

- ①ボーリングによって発生した亀裂
- ②コアをインナーチューブからの抜き取り作業により発生した人為的亀裂
- ③モルタルと岩塊の付着不足による自然的亀裂
- ④モルタル打設時に発生した亀裂

表-3 に示すとおり, コアの採取率については, いずれも100%である。削孔速度については, 削孔水量が2.6ℓ/min と4.1ℓ/min のそれぞれのケースにおいて, 不連続面が少ない供試体で6.9cm/min, 8.4cm/min, 不連続面が多い供試体で8.2cm/min, 10.1cm/min, 軟岩供試体で6.6cm/min, 28.0cm/minであり, 効率的にサンプルングを行うことができた。

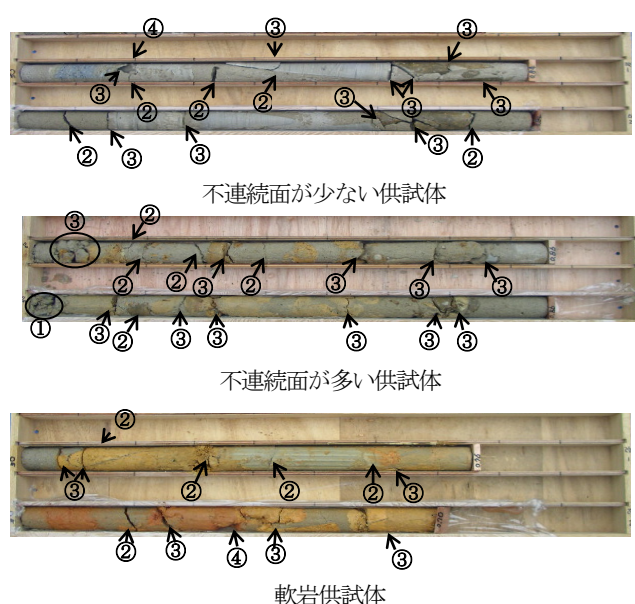


写真-2 開発ビットによるサンプルングコア

表-3 サンプルング結果

削孔条件		回転数 500rpm, 削孔水压 15～50kPa	
削孔水量(ℓ/min)		2.6	4.1
不連続面が少ない供試体	削孔長(cm)	8.4	8.4
	コア長(cm)	8.4	8.4
	採取率(%)	100	100
	削孔速度(cm/min)	6.9	8.4
不連続面が多い供試体	削孔長(cm)	8.6	8.6
	コア長(cm)	8.6	8.6
	採取率(%)	100	100
	削孔速度(cm/min)	8.2	10.1
軟岩供試体	削孔長(cm)	7.6	7.0
	コア長(cm)	7.6	7.0
	採取率(%)	100	100
	削孔速度(cm/min)	6.6	28.0

表-4 に各供試体における亀裂発生要因をまとめた。亀裂の発生要因として②③が大部分である。①のボーリングによって発生した亀裂は, 不連続面が多い供試体で削孔水量 4.1ℓ/min の場合の 1 本のみであり, 不連続面が少ない供試体, 軟岩供試体および, 不連続面が多いの供試体で削孔水量 2.6ℓ/min の場合では, 認められなかった。

表-4 亀裂発生要因

削孔水量(ℓ/min)	亀裂発生要因	2.6	4.1
不連続面が少ない供試体	①	0	0
	②	3	2
	③	6	4
	④	1	0
	合計	10	6
不連続面が多い供試体	①	0	1
	②	4	1
	③	7	6
	④	0	0
	合計	11	8
軟岩供試体	①	0	0
	②	3	1
	③	3	3
	④	0	1
	合計	6	5

3. 先端駆動方式サンプリング装置の開発

(1) 先端駆動型装置の開発

先端駆動式ボーリングでは、ロッドは回転せずビットとアウターチューブのみ回転する。ビットに回転力を与えるために流体を利用する方式と電力を利用する方式があるが、機構が簡便な流体を利用する方式を採用した。開発装置では、図-2に示すとおり、地上よりロッドを通して水を圧送し、コアチューブ上部に設置した駆動装置内のローターを回転させる。ローターは、スパイラル状で断面が楕円の溝が切っており、流体の圧力により回転する。ローターの回転により、それに連結したアウターチューブとビットを回転させる。先端駆動方式では、サンプリング時にロッドが回転しないため、中深度や大深度においてもロッドのぶれを抑制できる。開発装置の諸元を表-5に示す。

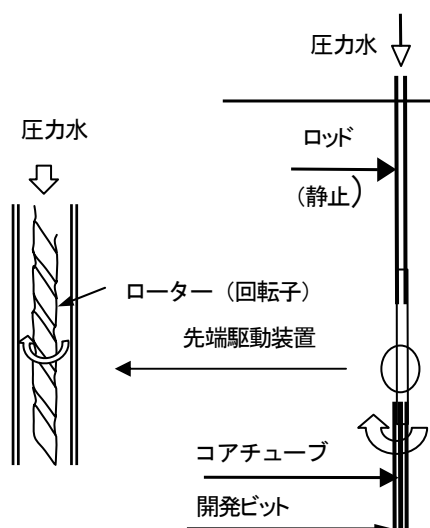


図-2 先端駆動型装置

表-5 先端駆動型装置の諸元

項 目	仕 様
最大トルク	17kg・m
ビット回転数	200～360RPM
送水量	95～190ℓ /min
最大差圧	2.1MPa
アウターチューブ外径	110mm
アウターチューブ長	1300mm
ビット内径	96mm
インナーチューブ内径	96mm
インナーチューブ長	960mm

(2) ビット部送水量調整装置の開発

先端駆動型ボーリングは、石油掘削のため開発されたものであり、最近では石炭や地熱開発等で採用されてお

り、主に硬岩を対象としている。当ボーリングは、本来、硬質粘性土のサンプリングを目的に開発されたものではないため、ローターの回転に使われた大量の圧送水をそのままビット部へ循環する機構である。不攪乱サンプリングに用いるためには、最適な削孔水量のみをビット部に送水し、他は駆動装置下部で排水する必要がある、ビット部送水量調整装置を開発した。

ビット部送水量調整装置は、図-3に示す通りダート、穴開き六角ボルト、スプリングから構成され、設置位置は駆動装置とコアチューブの間である。駆動装置でローターを回転させた圧送水のうち、ダートと六角穴開きボルトのノズルを通った水が削孔水としてビット部へ循環される。他の水は、ダート上面部で外部に排水される。給圧力の微変動に対応してスプリングの作用により排水量を調整する。

ビット部への送水量は、ダートと六角穴開きボルトのノズル径により調整する。サンプリング時に、駆動装置への給圧力は、地盤の物性にに応じて調整する必要がある、岩盤が硬い場合は、給圧力を増大し、逆に、岩盤が軟らかい場合は、給圧力を抑える必要がある。そこで、各給圧力に対応するため、ノズル径は2, 4, 6, 8 mm の4種類作製した。各ノズル径におけるビット部への送水量を試験により評価した。駆動用の圧送水量については、対象とする地盤により 40ℓ /min から 100ℓ /min 程度であるので、それぞれ 40, 60, 80, 100ℓ /min のケースについて、ビット部への循環水量を評価した。結果は、表-6に示すとおりである。ビット部への循環水量については、実績より軟岩の場合、5ℓ /min 程度でボーリングを行う場合が試料の乱れが小さく、硬岩の場合、10ℓ /min 以上必要であることから、ノズル径は4～6 mm程度が妥当であると評価できる。

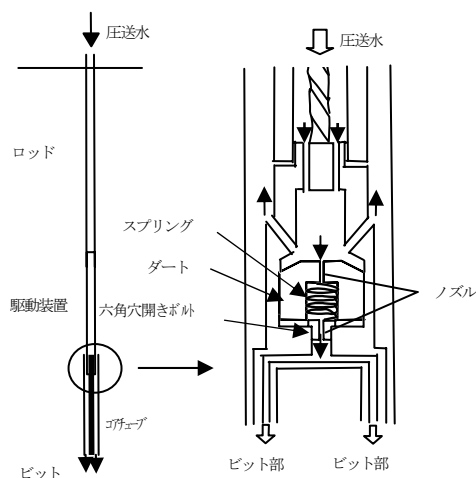


図-3 ビット部送水量調整装置

表-6 各ノズル径における送水量 (ℓ /min)

ノズル径	40ℓ /min	60ℓ /min	80ℓ /min	100ℓ /min
2mm	0.6	0.9	1.2	1.5
4mm	2.0	3.0	4.0	5.0
6mm	6.0	9.0	12.5	15.0
8mm	8.0	12.0	16.0	20.0

(3) 現場サンプリング

軟岩が分布するサイトにおいて、開発装置の性能評価を行った。サイトの地盤は D 級ひん岩であり、試料の品質を評価するためにブロックサンプリングも併せて行った。写真-3は開発装置によるサンプリング状況である。

開発装置によるボーリング試料と、ブロックサンプリング試料の含水比を比較すると、ボーリング試料は 39.9%に対し、ブロックサンプリング試料は 46.3%であり、削孔水のボーリング試料への浸透は小さいと評価できる。表-7は、両者の粒度分布を示す。粘土分含有率はともに 15%程度で整合していることから、ボーリング試料において削孔水による粘土分の流出はほとんど生じていないと評価できる。写真-4に開発装置によるサンプリング試料の一例を示す。

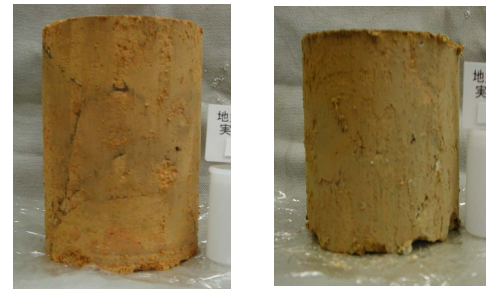
サンプリング時の乱れによる物性劣化を評価するために、圧密—非排水せん断試験を行い、ブロックサンプリング試料の結果と比較した。結果は図-4に示すとおりであり、圧密特性、せん断特性ともブロックサンプリング試料と整合し、物性劣化は小さいと評価できる。



写真-3 サンプリング状況

表-7 粒度分布の比較 (%)

粒度	開発装置	ブロックサンプリング
砂 75~200 μ m	63.0	59.5
シルト 5~75 μ m	22.0	26.0
粘土 ~5 μ m	15.0	14.5



(a) EL. 4.8~4.9m

(b) EL. 6.85~6.95m



(c) EL. 6.3~6.4m

(d) EL. 15.3~15.4m

写真-4 サンプリング試料

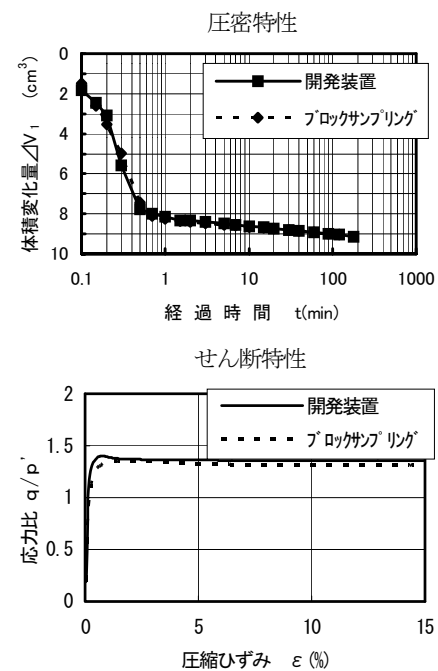


図-4 三軸試験結果の比較

表-8にボーリング試料の各深度における試料径および超音波速度測定結果を示す。各深度においてコアチューブ径 96mm に対して試料径はほぼ整合し、深部においてもサンプリング時におけるロッドやビットのぶれによるコアやせは小さい。超音波速度測定結果についても、深部での速度低下が認められず、ロッドやビットのブレによる乱れは小さいといえる。

表-8 試料径, 超音波速度

深 度 (m)	直 径 (mm)	超 音 波 速 度 測 定	
		縦波伝播 速度(km/s)	横波伝播 速度(km/s)
4.80~4.90	95.4	0.55	0.19
5.70~5.80	96.3	0.33	0.12
6.30~6.40	96.0	0.35	0.15
6.85~6.95	96.2	0.41	0.11
8.20~8.30	95.9	0.22	0.10
11.20~11.30	95.9	0.51	0.17
15.30~15.40	95.9	0.28	0.13

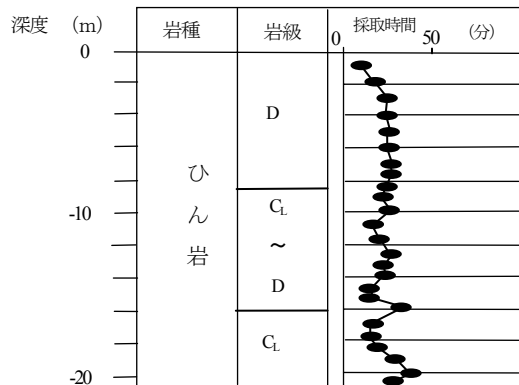


図-5 サンプル時間

サンプリング時間については、図-5に示すとおり 1 m当たり 30 分程度で効率的であることが確認できた。

4. まとめ

ボーリングによるサンプリング品質を向上するために

ウォーターウェイの改良と先端駆動装置の開発を行った。結果は以下のとおりである。

- ①ウォーターウェイ底面にV字型の切り込みを入れるとともに、ウォーターウェイ側壁を外側にやや拡げること、硬岩、軟岩対応型の削孔水流出機構を提案した。軟岩等削孔水による洗掘の恐れのある岩盤に対しては、削孔水量を抑えることで、ビット部からやや外向きに流出し、試料に接触するのを軽減する。一方、硬岩に対しては、従来程度の削孔水量で、下向きにも相当量流出し、効率的にビットを冷却する。
- ②ロッドやビットのブレによる試料の乱れを低減するために、ロッドは回転せず先端ビット部のみ回転する先端駆動方式の装置を開発した。この際、駆動のための大量の水のうち適量のみを削孔水としてするビット部送水量調整装置を開発した。
- ③開発技術の妥当性については、模擬供試体を用いサンプリングや現場サンプリングにより確認を行った。

参考文献

- 1) 小高猛司, 早野公敏, 古関潤一, 龍岡文夫, 壺内達也, 松本正志: 堆積軟岩試料のサンプリングによる乱れの評価法, 土と基礎, Vol.46, No.5, pp.11-14, 1998.
- 2) 小高猛司, 王林, 龍岡文夫, 中丸伸一: 堆積軟岩の変形係数に及ぼすサンプリング時の乱れの影響, 土木学会第 51 回 年次学術講演会講演概要集, pp.686-687, 1996.
- 3) 松下政司, 早野公敏, 松本正志, 小高猛司, 龍岡文夫: 堆積軟岩の変形係数に及ぼす試料の乱れの検討, 土木学会第 52 回 年次学術講演会講演概要集, pp.548-549, 1997.
- 4) 谷和夫, 金子進, 豊岡義則, 川崎了: ロータリー・コア・サンプリング時のコア・バレルの揺動と新しいサンプリング法の提案, 土木学会第 53 回 年次学術講演会講演概要集, pp.810-811, 1998.

DEVELOPMENT OF UNDISTURBED CORE SAMPLING EQUIPMENT FOR ROCK MASS

Tsugio YOSHIDA, Yuzo OHNISHI and Satoshi NISHIYAMA

Boring is used for rock core sampling technique most generally, but it is the present situation that a core cannot always be sampled by an undisturbed state. So in order to reduce disturbance of a core sample easily, the authors have improved drilling water discharge mechanism. For soft rock, drilling water discharge a little bit outward to prevent from eroding with a core. For hard rock, it discharge lower to cool off the bit effectively. The authors have also developed the drive type equipment that only the tip of the bit rotates and the rod itself does not. This equipment reduces the disturbance of a core sample caused by deflection of the rod.