

岩盤掘削用大口径リバー サーキュレーションドリルの開発

Development of Large Diameter Hole Rock Drilling Reverse Circulation Drill

一般土質用の場所打杭工法として発達してきたリバー工法は、近年、建設構造物の大形化に伴い、掘削の対象を岩盤層まで拡大するようになってきた。日立建機株式会社は、ホンコンの海上ホテル基礎杭施工用として、本格的な岩盤掘削機を受注したのを機に、今までの一般土質用リバー機の経験を生かして、S500R岩盤掘削用大口径リバーサーキュレーションドリルを開発した。

本機は、圧縮強度 $2,000 \text{ kg f/cm}^2$ (196 MPa) の超硬岩層まで全断面掘削が可能な口径 2 m クラスのロータリ式掘削機で、鉛直精度の良い掘削孔を能率よく施工できる構造が特長である。

本機が施工したホンコンの岩盤質は、我が国では見られない複雑な硬岩質 {ショア硬度 100, 圧縮強度 $1,500 \text{ kg f/cm}^2$ (147 MPa)} であったが、その施工実績より本機の構造が有効であったことを確認するとともに、また掘削諸元などの実績値を一般に公表されている削孔方程式などを用いて検討を行ない、岩盤掘削施工技術を把握することができた。

1 緒言

西ドイツ Salzgitter 社のリバー工法が、新しい基礎工法として我が国に導入されて以来約15年が、更に日立製作所が同社と技術提携のうえ国産化してから約14年を経過した。

その間、本工法は一般土質用の場所打杭工法として定着し、広く普及してきており、特に近年の建設構造物の大形化により、リバー工法による杭基礎工事は、より大きな径で、より深くかつ硬質地盤、又は岩盤層まで掘削して根入れすることを必要としてきている。このため、この1～2年、岩盤掘削用ローラビットを使用した岩盤掘削機が、国内はもとより海外でも採用されるようになってきた。

日立建機株式会社では、ホンコン Vibro 社より基礎工事が特に難事とされているホンコンでの海上ホテル建設の基礎杭施工用として、S500R大口径岩盤掘削用リバーサーキュレーションドリル(以下、S500R大口径岩盤掘削機という)を開発し、2台を受注した。

本機はその後順調に稼働を続け昭和53年4月に一期工事が終了したので、ここにその構造、作動及び施工実績の概略について述べる。図1に現地で稼働中の本機の外観を示す。

2 構造及び作動

2.1 開発方針

岩盤を全断面掘削する口径 1 m 以上の大口径掘削機には、重錐落下式のものもあるが、ビットを回転させて掘削するロータリ式のものが一般に採用され、既に国内でも口径 $1 \sim 4.4 \text{ m}$ クラスのロータリ式掘削機が使用されてきた。これらのロータリ式掘削機には、油圧駆動機構を備えた回転テーブルによりケーリバを介してビットを回転するロータリテーブル方式のものと、ビットにトルクを供給する油圧駆動機構とスィベル部分が一体化した構造のパワースィベル方式のものとがあり、

石川泰昭* *Ishikawa Yasuaki*

酒本守作* *Sakamoto Shusaku*



図1 S500R岩盤掘削機の外観 ケリースラスタとロータリテーブルとでドリルストリングを支持している。

* 日立建機株式会社土浦工場

その採用比率はほとんど同数である。これらの掘削機は、ほとんどが外国との提携製品であり、また口径2 mクラスの国産機はまだ製作されていない。

次に、今回開発したS500R岩盤掘削機の開発方針について述べる。

- (1) 日立建機株式会社の一般土質用掘削機開発の経験を生かして、初めての純国産技術による口径2 mクラスのロータリ式大口径岩盤掘削機を完成させること。
- (2) 工事の対象となるホンコンの岩盤は、主に花崗岩質{最大ショア硬度約100、最大圧縮強度約1,500 kg f/cm²(147MPa)}であり、しかも風化している層に未風化の玉石、転石が多く介在するとともに、岩盤層の表面が最大45度も傾斜しているため、これらの岩盤層でも垂直な掘削孔を施工することができる構造にすること。

以上の開発方針により取りまとめた本機的主要仕様を表1に示す。

2.2 主構造及び掘削原理

図2に本機による施工全体図を示す。本機は、岩盤を掘削するローラビットに、掘削荷重を与えるための鉛の入ったドリルカラー及び掘削時のガイドになる上・下スタビライザなどをつなぎ、更にその上部に、ドリルパイプ、ケリーバ及び回転するケリーバと静止する排土ホースを連結するスィベルジョイントなどを接続した最大100tf(980kN)にも及ぶドリルストリング(回転掘削具部分)全体を水で満たした孔内に降ろし、ロータリテーブルを回転させると、ケリーバを介して先端のビットが回転し岩盤を掘削するものである。一方、ドリルストリングはすべて中空で、地上のサクシヨンポンプの吸込みによって、水を掘削孔から地上へ逆循環(リバーサーキュレーション)させることにより掘削岩盤屑を連続的に搬出し、ドリルパイプを継ぎ足すことにより掘進させるもの

表1 S500R岩盤掘削機の主仕様 最大圧縮強度2,000kg f/cm²(196MPa)までを対象とした口径2 mクラスのS500R岩盤掘削機的主要仕様を示す。

項 目		仕 様	
掘 削 駆 動 方 式		ロ ー タ リ テ ー ブ ル 式	
掘 削 具 の 支 持 方 法		ケリースラスタ(専用支持架構)使用	
穿 孔 能 力	穿 孔 口 径 (m)	1 ~ 2.5	
	穿 孔 深 さ (m)	標準50	
サクシヨンユニット	原 動 機	出 力 (kW/rpm)	41.9/2,000
	サクシヨンポンプ	流 量 (m ³ /min)	8.4
油圧ユニット	原 動 機	出 力 (kW/rpm)	137.5/1,800
	主 油 圧 ポ ン プ	吐 出 し 量 (m ³ /min)	0 ~ 0.39
		最大 圧 力 (kgf/cm ²)	240 (23.5MPa)
	副 油 圧 ポ ン プ	吐 出 し 量 (m ³ /min)	0.012 + 0.028
		回 転 数 (rpm)	0 ~ 22
ロ ー タ リ テ ー ブ ル		トル ク (tf-m)	0 ~ 12
ケ リ ー バ		長 さ (m)	2.7, 4
ド リ ル パ イ プ		長 さ (m)	1, 1.5, 2, 3
ド リ ル カ ラ ー (上)		重 量 (tf) × 本 数	8.1 × 8
ド リ ル カ ラ ー (下)		重 量 (tf) × 本 数	8.5 × 1
ス タ ビ ラ イ ザ (上)		形 式	ブレードシュー式
ス タ ビ ラ イ ザ (下)		形 式	カッターローラ式
ロ ー ラ ビ ッ ト	形 式	コンケイブ式	
	ビット外径 (mm)	1,067 ~ 1,982	

である。
本機構造上の主要特長は、掘削孔の孔曲がりを防ぐため、ロータリテーブルと上部スィベルジョイントを装着した油圧駆動のケリースラスタ(専用支持架構)のスィベルフレームとの2点(従来のパワースィベル式やロータリテーブル式では1点)によりドリルストリングを支持しながら、振り子効果を發揮させるためにケリースラスタの昇降シリンダでドリルストリングの重量の一部を保持しながら掘進量をうまく制御でき

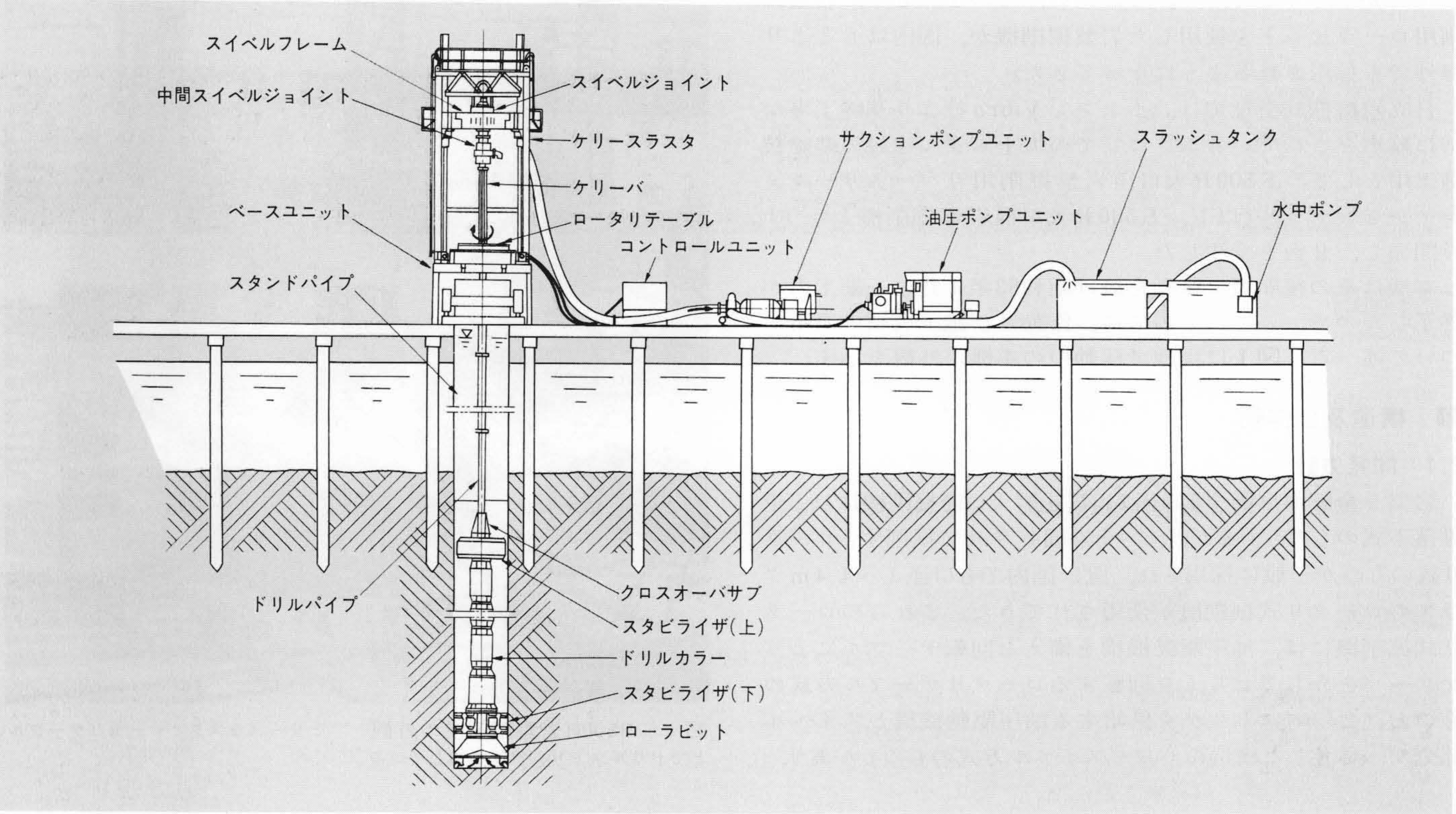


図2 S500R岩盤掘削機施工全体図 ローラビットで掘削した岩盤屑を地上のポンプにより掘削孔孔底から水とともに吸い上げる。

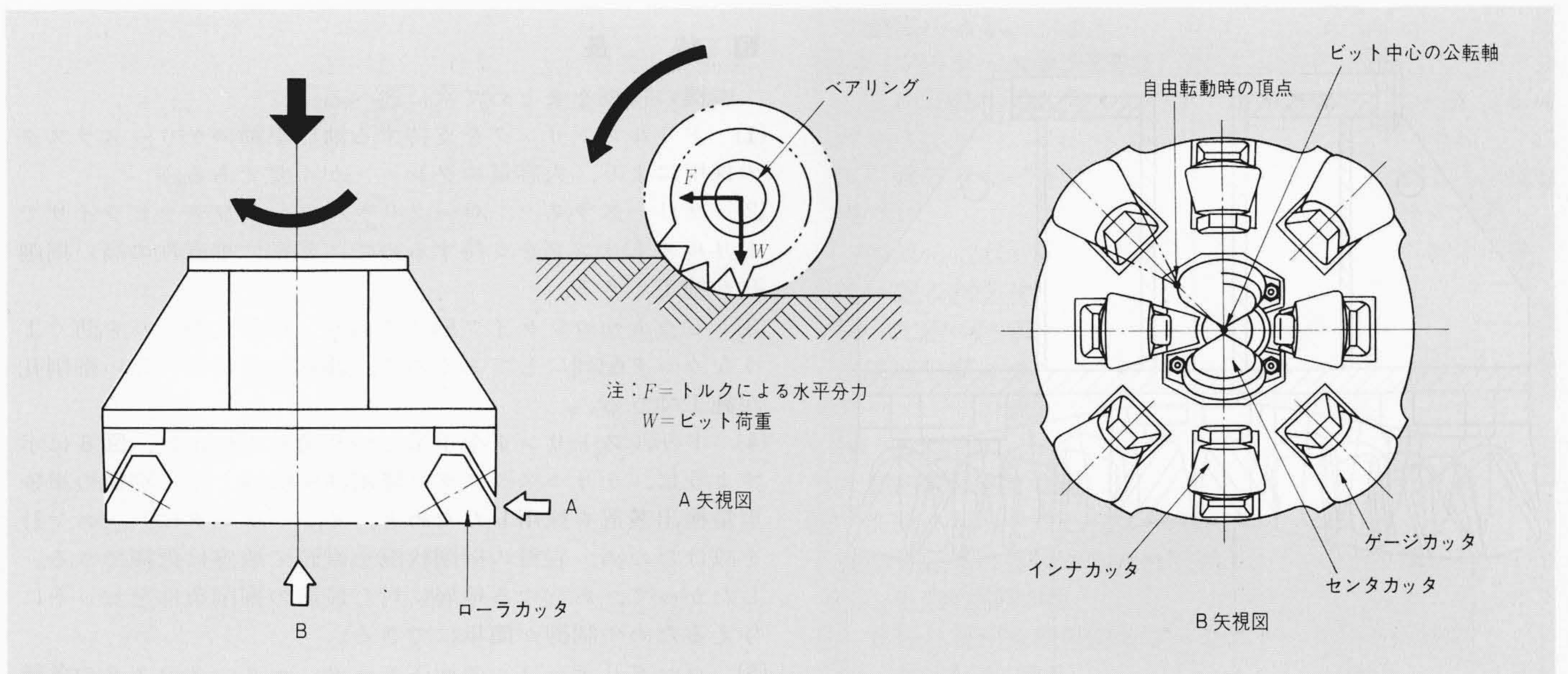


図3 ローラビットの掘削原理図 主掘削は、くさび作用による破碎や圧壊であるが、カッタの自由転動時の頂点とビット中心の位置の差から生ずる回転のずれによる掘削作用もある。

るようにしたことである。

2.3 ローラビット

ローラビットは、図3に示すように、回転可能な歯車のような形をしたローラカッタ(中心部のセンタカッタ、中間部のインナカッタ、外側のゲージカッタ)をビットボディに複数個取り付け付けた形状で、全断面を掘削するようにしたものである。

このビットに、ドリルストリングの大重量をかけて掘削面

に押し付けながら回転させると、それぞれのローラカッタは自転しながら、表面の刃先のくさび作用により岩盤を砕いてかき取るというのがその掘削原理である。その他に、カッタ自身の形状やカッタ配列に起因する回転のすべり、及び衝撃荷重による掘削作用もある。

次に、ローラカッタの一般的な選定基準を図4に示す。圧縮強度 $1,000 \text{ kg f/cm}^2$ (98MPa) 未満の岩盤にはツース形カッタを使用し、 $1,000 \text{ kg f/cm}^2$ (98MPa) 以上の岩盤にはチップ

		圧 縮 強 度 (kgf/cm^2)				
サドル形カッタ		100	500	1,000	1,500	2,000
ツース形カッタ ツースカッタ		○ 切頭円錐形のカッタの外周に歯列を形成したもので、掘るべき地層の全面に歯があたるように設計されている。軟岩掘削用には高く広い間隔をもった歯を使用し、スキューイングを付けたものもある。硬岩掘削用には低く短い間隔で角度の大きい歯を使用し、歯の側面に硬装肉盛が施してある。				
チップインサート形カッタ チップカッタ	チゼル形チップ	○ 掘削する岩石の研摩性が熱処理された鋼歯の耐摩耗限界を越える場合に、タングステンカーバイド製のチップをインサートした歯をもつカッタを使用する。このチップは、鋼歯に比べて小さく高さも低いので、孔底に掘残し面積ができるが、チップは余り摩耗しないので掘進率を保持できる。チップ材の硬度が異なる左図のチップ形状のものを岩盤の圧縮強度により使い分ける。				
	コーン形チップ					
	半球形チップ					

注：ローラカッタには、サドル形のほかにコーン形カッタをカンチレバー形に支持したものもあり、

最近の大口径ローラビットには、中心部のセンタカッタにだけこのタイプが用いられる。

図4 ローラカッタの選定基準 岩質により最も適したカッタ及びチップを選定する。

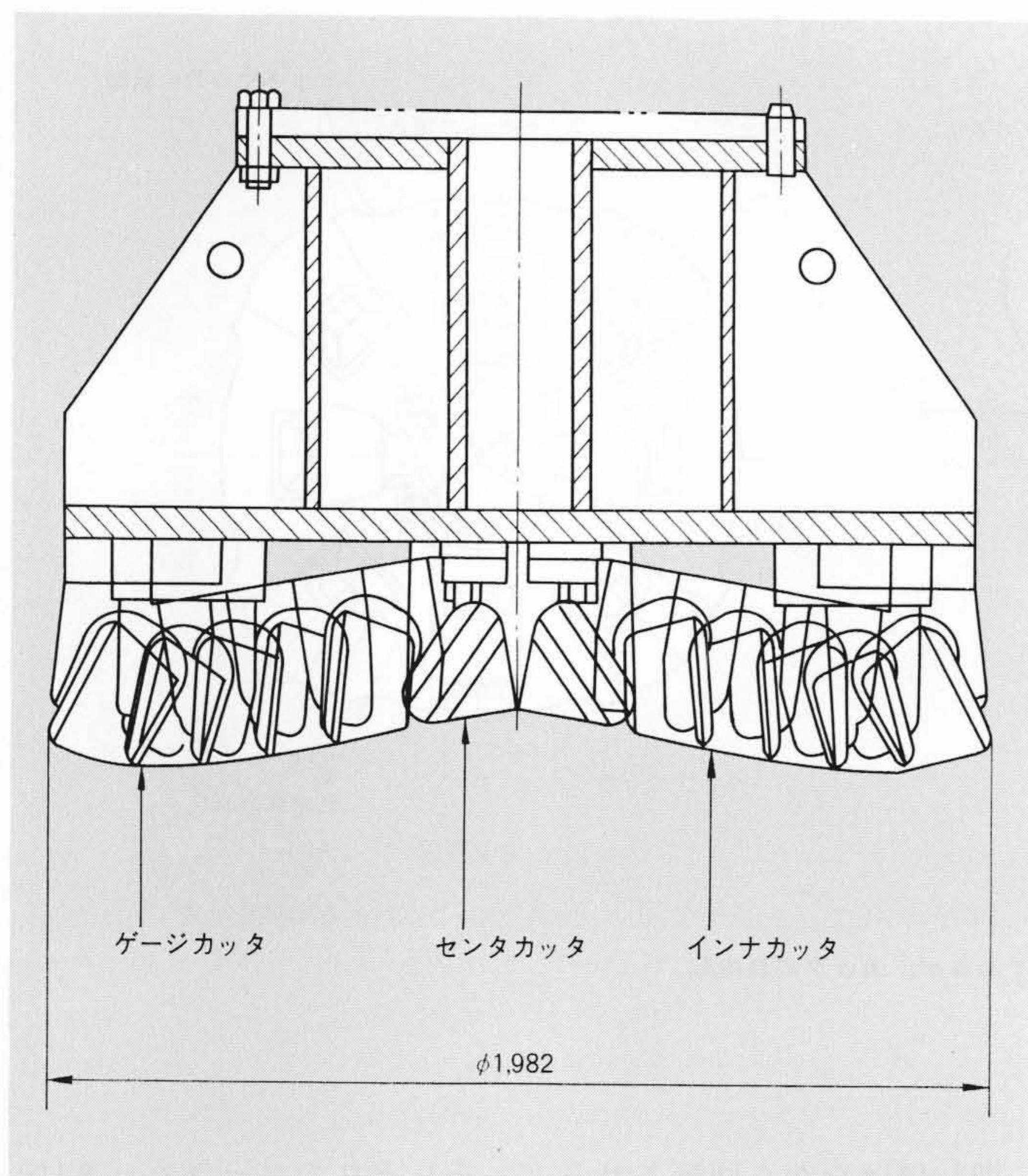


図5 コンケイブ形ローラビット ビット底面が中にくぼんだ形になっているので、掘削孔は孔曲がりしない。

インサート形カッタを使用する。今回は最大圧縮強度 $1,500 \text{ kg f/cm}^2$ (147 MPa) というので、チゼル形チップインサートカッタを使用した。

また、今回の岩盤質は非常に複雑であり、垂直な掘削孔を掘るため、底面が中にくぼんだ、いわゆる逆コーン形になったコンケイブ形状の特殊ローラビットとした。図5にこのビットを示す。これは、掘削口径を決めるゲージカッタをまず転石層や傾斜した岩盤層の表面に付かせて掘削孔曲がりをさせないという考えのものであり、このような考え方は以前からもあったが、本格的に採用したのは今回が初めてである。

3 特 長

本機の特長をまとめて次に述べる。

- (1) ドリルストリングを支持する油圧駆動のケリースラストの採用により、大容量のクレーンが不要である。
- (2) ケリースラスト、ロータリテーブル及びスタビライザでドリルストリングを支持するので、非常に垂直性の高い掘削孔が施工できる。
- (3) ビットがコンケイブ形状であり、掘削孔曲がりを防ぐようなカッタ配列にしてあるので、非常に垂直性の高い掘削孔が施工できる。
- (4) ドリルストリング全重量とつり荷重の検出は、図6に示すように、ケリースラスト昇降用油圧機構と全く別個の単独重量検出装置を採用したためと、インジケータにバーニヤ針を設けたため、岩盤の掘削状況を直読で敏感に把握できる。したがって、あらゆる地層に対し最適の掘削条件をビットに与えるための制御が簡単にできる。
- (5) ロータリテーブルの油圧モータ、ケリースラストの各種油圧シリンダを能率よく操作するため、主ポンプと二重の副ポンプを装備して、掘削時の昇降用シリンダの超低速操作から段取り時の最高速操作まで、すべて遠隔操作ができる。
- (6) 油圧系統に各シリンダの同調回路、逸走防止回路及びケリースラストへの掘削振動伝達緩和回路を組み込んであり、安全かつスムーズな施工の確保と各油圧機構の寿命を延ばすことへの配慮が払われている。

4 掘削施工実績

今回の基礎工事は、杭総本数約350本のリバース杭による海中場所打杭造成工事で、杭径は $1,067 \sim 1,982 \text{ mm}$ 、深さ $19 \sim 35 \text{ m}$ である。この工事のうちホテル部の一期工事は解体した旧建物の床のコンクリートスラブを作業足場にして施工し、遊歩道部の二期工事は完全な海上施工である。

図7に、完了した一期工事の杭のうちの最大杭径の $1,982 \text{ mm}$ の掘削実績を、図7に、その掘削から杭打設までの施工法を示す。杭根入れ部の深さ 2.5 m の新鮮花崗岩は、ショア硬度が100(我が国の花崗岩の最大硬度は約85程度)あり、非常に掘削性の悪い岩であったが、その根入れ部だけの平均掘進速度

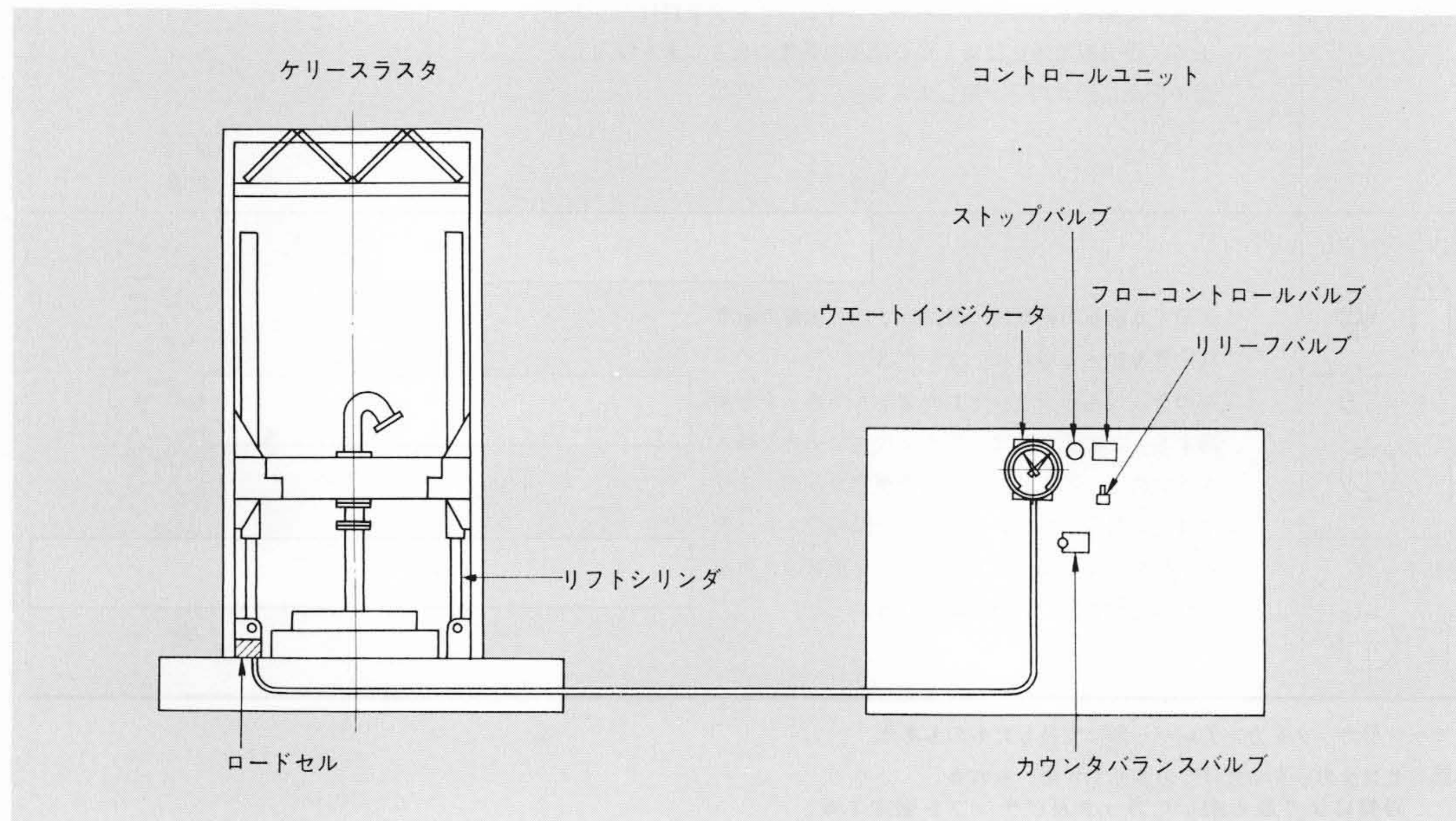


図6 荷重検出系統及び制御図 独特の単独荷重検出装置と制御ユニットにより、微妙な制御ができる。

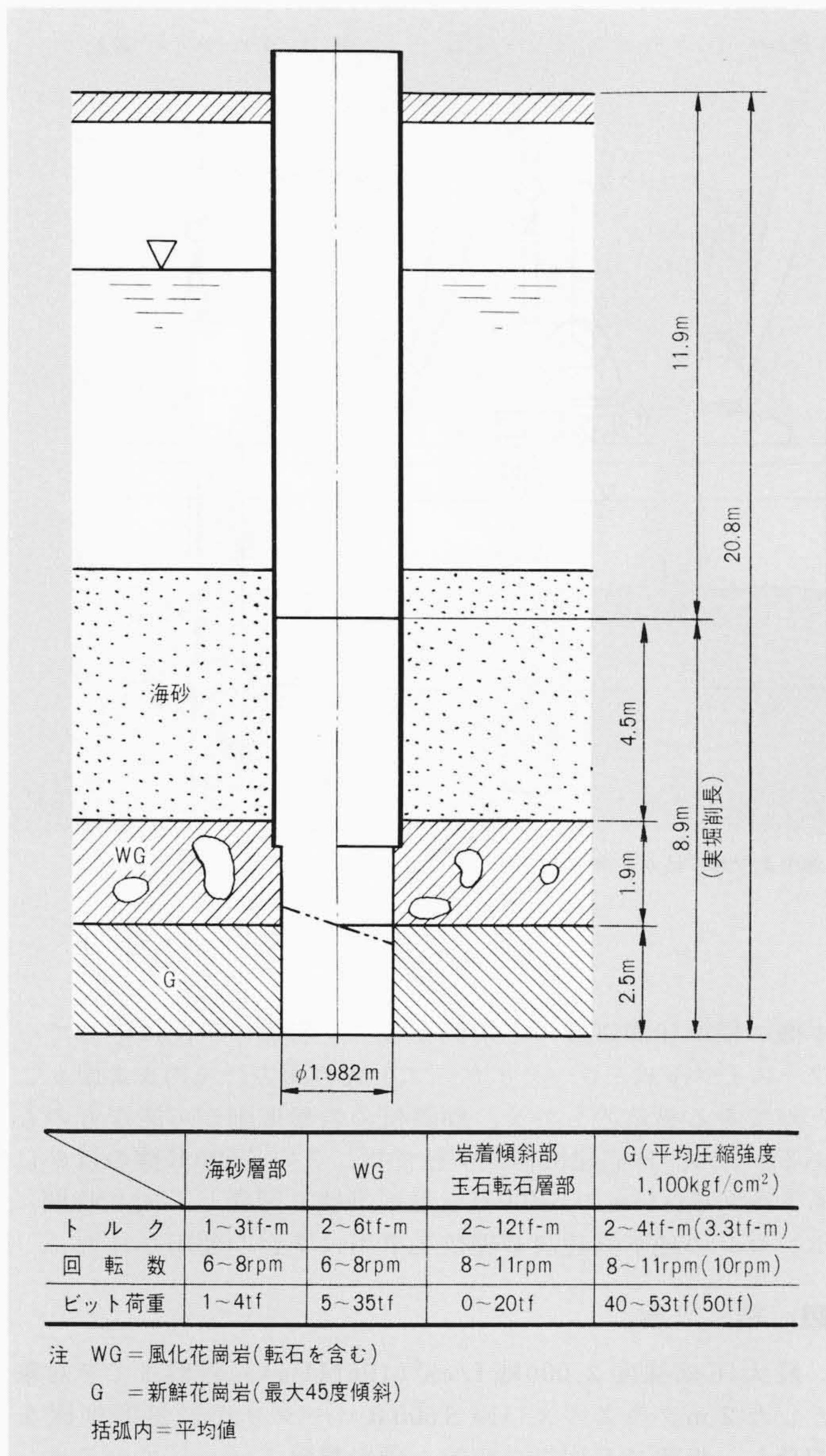


図7 杭径1,982mmの掘削施工データ 最大杭径1,982mmの平均掘削施工データを示す。

として0.2m/hが得られた。また、掘削孔の垂直精度は、掘削孔の心ずれ量を掘削深さで割ったもので表わされるが、転石混じりで最大45度の傾斜岩盤層にもかかわらず、最悪でも $\frac{1}{500}$ という高い実績が得られた。

なお、施工は海中場所打コンクリートリバース杭のため、図8に示すような特殊な施工法が採用された。

以下、今までに一般に公表されている岩盤掘削の削孔方程式による掘削諸元の計算値と今回の実績値とを比較検討した結果及び今までの施工で判明した事項などについて項目ごとに述べる。

4.1 掘削トルク

口径2m程度までのツース形カッタのビットに対して、比較的よく実際と合うとされている掘削トルク T (kgf-m)の実績式¹⁾は次の(1)式である。

$$T = 2.96 \times 10^{-2} k W d^{1.5} D^{2.5} \dots \dots \dots (1)$$

ここに k : 地質係数 ($4 \times 10^{-5} \sim 14 \times 10^{-5}$)

Wd : 単位口径当たりビット荷重 (kgf/cm)

D : ビット口径 (cm)

そこで、(1)式による今回のチップインサート形カッタを装着したローラビット口径1,982mmの新鮮花崗岩での掘削トルクの計算値と実測値とを比較検討した結果について述べる。

(1)式による掘削トルクの計算値は、

$$T = 2.96 \times 10^{-2} k W d^{1.5} \times 198.2^{2.5}$$

$$\text{ここに } Wd : \frac{50,000(\text{図7より})}{198.2} = 252 \text{ kgf/cm}$$

k : 7×10^{-5} (平均圧縮強度1,100kgf/cm²の場合)

$$\therefore T = 4.58 \text{ tf-m} (=44.9 \text{ kN} \cdot \text{m})$$

これに対し実測値は平均3.3tf-mであり、したがって、チップインサート形カッタの実際の掘削トルクは、ツース形カッタの場合に適用される(1)式による計算値の約70%に低下するといえる。ただし、図7から明らかなように、岩盤掘削機の所要トルクは、今回のように特に複雑な地層を含む場合、均一な新鮮花崗岩を掘削するのに要するトルクの約3倍程度必要である。

4.2 掘進速度

掘進速度 R は、ビット荷重 W とビット回転数 N を主要因として変化し、一般に $R = C W^a N^b$ で表わされている。大口径の場合は、回転によってカッタが掘削面の水を攪拌して掘削岩屑の吸込み状態を良好にすることから、ビット回転数 N のべき定数は $b \geq 1$ といわれ、またビット荷重 W のべき定数に関しては理論解析などから $a = 1.5$ になるといわれている。

そして、口径0.75~3mの範囲のツース形カッタのビットに対して比較的よく実際と合うとされている掘進速度 R (m/h)の実績式²⁾は次の(2)式である。

$$R = K \frac{N^{1.1} r^{0.8} W^{1.5}}{D^{1.2} \sigma^{1.5}} \dots \dots \dots (2)$$

ここに K : 刃先摩耗定数 (0.4~0.7)

r : ローラカッタの半径 (=15cm)

D : ビット口径 (=1,982mm)

σ : 被削材圧縮強度 (=1,100kgf/cm²)

そこで、(2)式による今回のチップインサート形カッタを装着したローラビット口径1,982mmの新鮮花崗岩での掘進速度の計算値と実績値とを比較検討した結果について述べる。

(2)式による掘進速度の計算値は、

$$R = (0.4 \sim 0.7) \frac{N^{1.1} 15^{0.8} W^{1.5}}{1.982^{1.2} 1,100^{1.5}}$$

ここに N : ビット平均回転数 (図7より10rpm)

W : ビット平均荷重 (図7より50tf)

$$\therefore R = 0.18 \sim 0.32 = 0.25 \text{ m/h (平均値)}$$

これに対し実績値は平均0.2m/hであり、したがって、チップインサート形カッタの実際の掘進速度は、ツース形カッタの場合に適用される(2)式による計算値の約80%に低下するといえる。この低下の理由は、ツース形カッタが全断面掘削できるのに比べ、チップインサート形カッタは一部掘り残しができるためと思われる。

4.3 垂直精度

今回の施工実績から、掘削孔をより鉛直に掘るには、常にドリルストリングが振り子になるような状態にして削孔することが最大のポイントであることが明確になった。すなわち、地層の不均質さに応じてドリルストリング全重量の $\frac{1}{3} \sim \frac{2}{3}$ をつり上げて、その引張荷重と圧縮荷重(ビット荷重)との接点は必ず剛性の高いドリルカラー以下に来るように荷重制御する必要がある。また、表面が傾斜した岩盤層では、ビット中心部のセンタカッタがその傾斜部にくい付くまでは、ドリルストリングの全重量のほとんどすべてをつる必要がある。

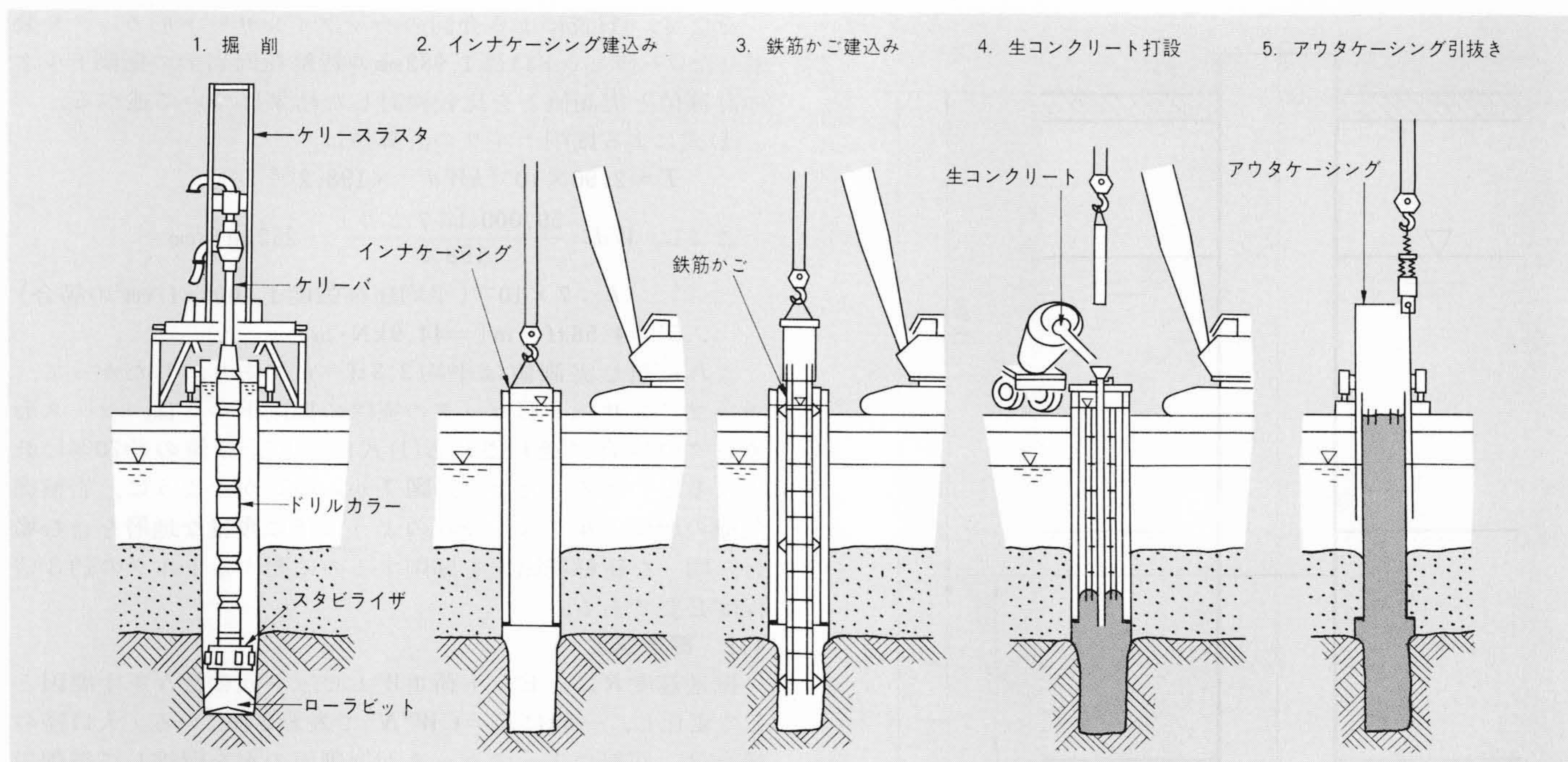


図8 ホンコン海上ホテル杭基礎工事の施工法 インナケーシングを杭の途中まで建て込み、海中で生コンクリートを打設する施工法である。

このように、微妙なビット荷重の制御が要求される今回の岩盤に対して、このたび開発したケリースラスタ、コントロールユニット及び荷重検出装置は極めて有効であった。

また、実掘削時の掘削孔内水中でのドリルストリングの挙動を実測して解析した結果、ローラビットのカッタ配置も垂直精度に関連することが判明したので、次に述べる。

4.4 ローラビットのカッタ配置

一般に、ローラビットのカッタ配置例としては、すべての同心円列上のカッタがビット中心に対して非対称の位置に配置されたものと、すべての列上のカッタがビット中心に対して対称の位置に配置されたものとに大別される。そして、両者の配置の場合の挙動を解析した結果、それぞれ欠点があることが判明した。前者は、ビットの回転角度に伴いビット中心に大きな偏荷重が生じ、ドリルストリングに大きな曲げ荷重を与えるとともに掘削孔が曲がりやすい。また後者は、各列のカッタに常に等しい荷重が加えられているため、カッタが岩盤に衝撃的な力を余り与えることができず岩盤の破碎性が悪い。

このように、ドリルストリングの曲げ、すなわち岩盤掘削孔の孔曲がりと削孔性とはカッタ配置にとって相反する面をもっており、今回ビットカッタ配置の設計ノウハウを把握することができた。

4.5 ローラビットカッタの寿命

ビットカッタの寿命は、チップの寿命又はローラカッタのベ어링寿命のいずれか短いほうで決まり、いずれもビット荷重とビット回転数に逆比例することが判明した。すなわち、今回の掘削施工条件でのチゼル形のチップ寿命として、約500時間が得えられることが分かった。

また、チップ形状及び岩盤の強度(圧縮強度、表面硬度)と寿命との関係を把握できたが、岩盤質によりどのようなチップ形状及び材質を選定するかがチップ寿命を伸ばすポイントであることが明確になった。

以上が今回開発した本機の実績とその解析結果であるが、

本機の標準仕様以外の応用例として、岩盤の状況に応じてパワースイベル式とロータリテーブル式の両方にそのまま使うことができる構造のものや、傾斜杭の岩盤掘削が可能なものもある。また、日立建機株式会社では、このS500R機のほかにもトルク6t・f-mのS400H岩盤掘削機も開発し、同じ時期にホンコンの地下鉄建設基礎杭工事用に7台が使用された。

5 結 言

最大圧縮強度2,000kgf/cm²(196MPa)の岩盤までを対象とした2mクラスの大口径S500Rロータリ式岩盤掘削機を開発し、世界でも屈指の複雑な硬岩盤質といわれているホンコンの海上ホテル基礎杭工事用に使用した結果をまとめると次のことがいえる。

- (1) 転石混じりで最大45度傾斜した硬岩盤層 {最大ショア硬度100, 最大圧縮強度1,500kgf/cm²(147MPa)} の掘削で本機の構造は極めて有効であり、かつ垂直精度の高い掘削孔を能率よく施工することができた。
- (2) 岩盤掘削機の所要トルクは、今回のように特に複雑な地層がある場合、均一な地層の約3倍程度を見込む必要がある。
- (3) チップインサート形カッタの掘削トルクは、ツース形カッタの約70%になると考えられる。また、掘進速度については前者は後者の約80%になると考えられる。
- (4) 岩盤掘削孔の垂直精度を高めるには、ドリルストリングの荷重制御が最も重要であるが、ローラビットカッタの配置も無視できないことが判明した。

最後に、本機の現地稼動に当たり終始適切な御助言をいただいた帝石鑿井工業株式会社の関係各位に対し深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) E. A. Morlan: Designing Large Diameter Hole Drilling Programs, World Oil, 154, 5, p. 133~138(April 1962)
- 2) 千田: 大口径掘削機のドリルビットとドリラビリティ, 建設機械, 8, 9, p. 33~40(昭47-9)