

SOLETANCHE 工法による転石地盤の掘削に関する実験的研究

齊藤 二郎
芳賀 孝成

概 要

大径の玉石が介在する砂れき地盤を SOLETANCHE 掘削機で掘削することはかなり困難であると、これまで言われてきた。そこでグラウトによって所定の地盤を固結させて、SOLETANCHE 掘削機で掘削するという工法を考案した。しかし、この工法を実際に適用するためには、(1)伏流水をしゃ断して地盤を十分に固結させるグラウトおよびその注入方法、(2)大径玉石や岩盤に対する SOLETANCHE 掘削機の破砕機構、(3)その他、孔壁の安定および掘削方法、などに関する問題点をあらかじめ解決しておかねばならない。このため以上の問題点に対して各種の実験を行ない検討を加えたが、本報告ではその主なものについて述べる。

1. まえがき

コンクリート地中連続壁は、地下外壁や土留壁あるいはフィルタイプダム止水壁などに多く利用され、その形式には柱列形式と長小判型断面のものを連続させる形式とがある。施工機械にも各種の形式があり、いずれも通常地盤に対しては相当の威力を発揮する。しかし砂れき地盤、特に大径の玉石が介在する砂れき地盤、いわゆる転石地盤に対しては SOLETANCHE 掘削機でさえ掘削不能に陥ることが多い。諸外国に比較し我が国ではゆるい転石地盤中にも地中連続壁を造成しなければならないことが多く、今後この施工上の問題点を把握して施工方法・施工機械の改良を進めて行く必要がある。

そこで以上の観点から転石地盤の掘削方法の一つとして(図-1)に示すような施工法を考えた。すなわち施工時の泥水の逸泥を防ぐために掘削位置周囲の地盤に止水グラウトを注入し、さらに掘削位置の地盤には打撃掘削時の玉石の動揺を防ぐ目的で固結グラウトを注入する。このように地盤のある範囲をあらかじめグラウトにより固結させてから SOLETANCHE 掘削機で掘削してコンクリート連続壁を造成するものである。

本工法を実現させるには伏流水があるような砂れき地盤の所定の位置を充分固結させるためのグラウトやその注入方法、あるいは砂れき地盤中の大径の玉石を効果的に破砕するための掘削機構などについて検討しなければならない。

本報告で述べる3種の実験は以上述べた工法の可能性について概念的な結論を得るために実施されたもの

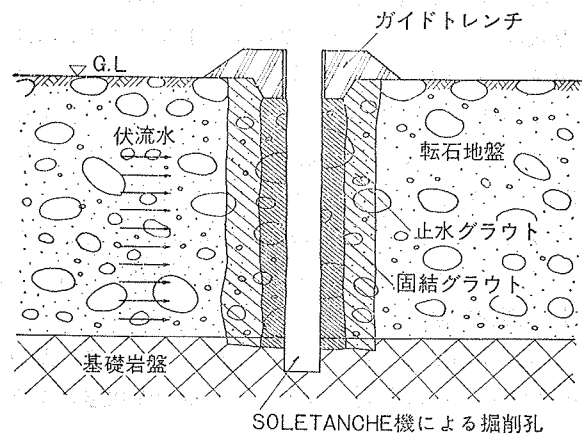


図-1 転石地盤の新しい掘削方法

である。

2. 流水地盤におけるグラウト注入実験

2.1. 実験目的

砂れき地盤の掘削方法としてはパーカッション掘削機が最も適していると考えられる。しかし地盤中に大径の玉石がある場合は、チゼル(掘削具)より受ける衝撃から玉石が孔内に転落して、孔壁は崩壊し掘削能率は極度に低下する。そのため、このような地盤を掘削するには、事前にグラウトの注入を行なって地盤を固結する必要がある。このような目的に使用されるグラウトに必要な条件としては次のようなものが挙げられる。(1)砂れき層中の比較的微細な間隙にも浸透し、かつ玉石の周囲にも充分に行き渡ること。(2)伏流水に遭遇しても遠方まで流されないようなゲル化特性を保持すること。(3)掘削時の衝撃に対して玉石を安定した状態に置くような強度を有すること。(4)止水グラウトの影響により固結グラウトの強度が低下しないこと。

そこで以上の条件を満足するグラウトおよびその注入方法について各種の室内・野外実験を実施して検討したが、ここでは大型実験槽を用いて流水地盤中のグラウトの浸透固結状態を調査した実験とその結果について述べる。

2.2. 実験方法

実験装置は(図-2)に示すように模型砂れき地盤を作成するための大型実験槽と地下水流を生ぜしめるための2個の水槽より構成されている。実験土槽の左右には水の流れを均一にする目的で長さ20cmの水室が設けられている。伏流水の流量は実験槽左右のバルブの開閉により調節し、上下流の水頭差はビニール製スタンドパイプにより求めた。模型地盤は試料土(砂または砂れき)を約20cmずつ実験槽に投入し水締めと突き固めを行なって作成した。注入は上床版に設けられた注入孔より注入パイプを挿入して行なった。注入方式は1.5ショット方式である。注入グラウトには信頼度が高く取り扱い易いLW(セメント+ケイ酸ソーダ)、MI-1号(アルミン酸ソーダ+ケイ酸ソーダ)、エスロックU(尿素系合成樹脂)およびエスロックK(尿素系合成樹脂)の4種を用いた。

実験では流速、グラウトのゲル化時間、注入量、注入圧とグラウトの浸透状態・固結体積との関係を調べた。

2.3. 実験結果

注入実験結果を(表-1)に一覧にして示す。実験No. 1~No. 2は砂層へのグラウトの浸透状態および

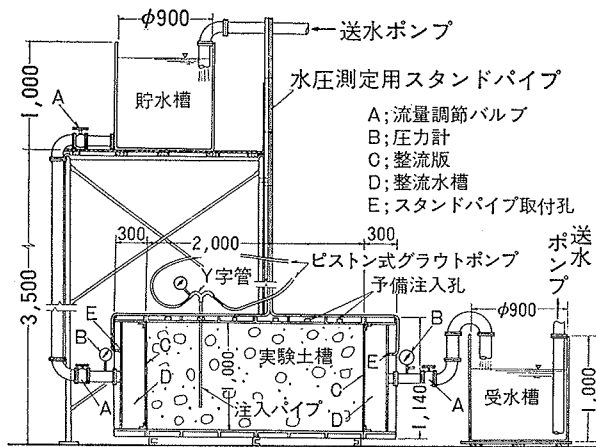


図-2 グラウト注入実験装置

異なるグラウトの相互の影響の調査を主目的としたものである。注入にはいずれのグラウトの場合も、25 l ずつ注入してその都度8割程度のゲル化待ちを行なう方法を採用した。これはグラウトが注入孔より地盤中に出てから固結するまでの時間を極力短縮し地盤中の空隙を順次閉塞させるため、この方法は地盤中の水

の流れを止める方法としてかなり効果的であった。浸透性の良いグラウトはエスロックKおよびMI-1号で次にエスロックUとなり LW は前の3種のグラウトに比較してかなり浸透状態は悪い。脈状浸透は(図-3)のようにすべてのグラウトについて認められた。また先行注入グラウトの影響による固結物の強度低下は余り認められなかった。

実験 No. 3~No. 6 は砂れき層へのグラウトの浸透状態の調査を主目的としたものである。固結グラウトとしては強度の最も大きい LW が最適であるので、ここでは止水グラウトとしてMI-1号を選定し、この2種のグラウトについてのみ実験を行なった。(図-4, 図-5)はそれぞれ LW および MI-1号の浸透固結状態を示す。グラウトはかなり脈状に走っており、固結範囲はいずれも流水のために注入パイプの位置より下流側にずれ、また下部には未固結の部分がある。(図-6)は玉石の周囲へグラウトが浸透した状態を示したもので非常に浸透状態は良好である。

グラウトの流出量は LW が最も大きい。また地下水の流速が増加すればグラウトの流出量も増加するがその増加量はわずかである。いま砂の間隙率を0.45とすれば LW の注入充填率は92%、その他の平均は61%となる。また砂れきの間隙率を0.40とすれば LW の注入充填率は73%、その他の平均は51%となる。

グラウトの浸透半径は注入圧 2kg/cm²~5kg/cm²の時 MI-1号で約60cm, LW で約30cm程度であったが実際には高压注入が可能であるのでもっと大きな浸透半径になるものと思われる。いずれにしても本実験より流水地盤の所定の位置を固結させることは困難でないということが立証された。

実験番号	試料	伏流水流速 cm/sec	注入グラウト	ゲルタイム sec	注入量 l	注入方式	注入圧 kg/cm ²	注入速度 l/min	流出量 l	固結量 m ³
1	砂	0.02	エスロックK	4	400	3点注入	0.5~1.0	12~13	50	1.10
			LW	1	100	1点注入	1.0~2.0	10~12	50	0.12
2	"	0.05	MI-1号	4	400	3点注入	0.5~2.5	12~13	100	0.90
			エスロックU	4	200	1点注入	0.5~1.5	12~13	30	0.50
3	砂れき	0.05	MI-1号	1	150	1点注入	1.0~2.5	10~11	10	0.70
4	"	0.05	LW	1	200	1点注入	1.0~1.5	12~13	80	0.50
5	"	0.10	MI-1号	1	200	1点注入	1.0~5.0	10~12	20	0.90
6	"	0.10	MI-1号	1	350	1点注入	1.0~2.0	12	80	1.25
			LW	1	100	1点注入	2.0~5.0	15	80	0.08

表-1 グラウト注入実験結果

3. 岩石の打撃破碎実験

3.1. 実験目的

SOLETANCHE 掘削機はパーカッション形式の掘削

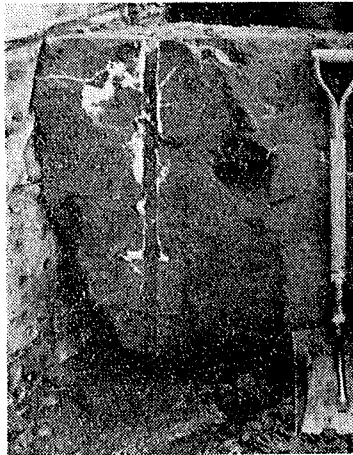


図-3 エスロックKの脈状浸透状態

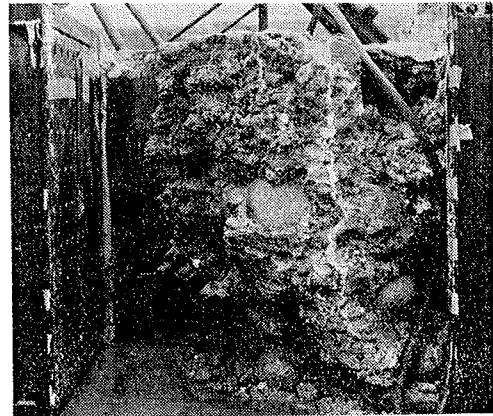


図-5 MI-1号の浸透固結状態

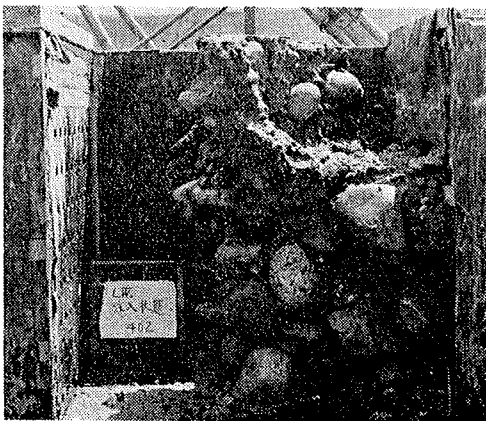


図-4 LWの浸透固結状態

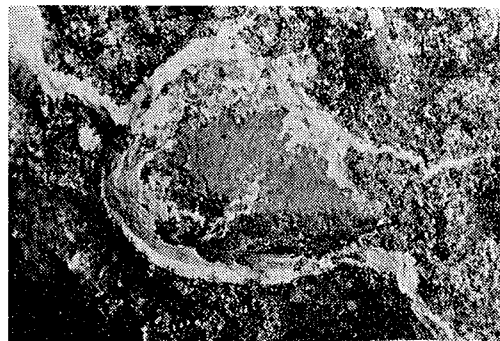


図-6 玉石周囲へのMI-1号の浸透状態

機であるが、このパークッション掘削機構についての研究はあまり行なわれていないのが現状である。SO LETANCHE 掘削機で転石地盤を掘削する際に問題となるのは次の2点である。

(1)くり返し打撃に対する玉石の挙動：玉石に打撃が加えられた場合、周辺地盤は変位を生ずる。そのため玉石は沈下し、回転し、あるいはせん断破壊される。周辺地盤の変位と玉石の挙動は衝撃力、周辺地盤の固結度、玉石の形状により異なる。

(2)打撃に対する玉石、岩盤の破碎機構：玉石はSO LETANCHE 掘削機のサクシオンパイプ内径以下に破碎されなければならない。玉石の破碎には圧碎およびせん断破壊があり、これらは打撃力、岩石の破碎特性、岩石の形状、風化度に大きく左右される。

以下はこの2つの問題点に関する基本的な実験とその結果について述べたものである。

3.2. 実験方法

本実験には(図-7)に示すような打撃試験機を用いた。落錘は5kg~120kgまで5kgずつ変化できるようになっており、落錘の落下高は0~70cmである。ビットの刃先長は30mm、刃先角度は60°~120°である。実験に用いた岩石は閃雲花崗岩、花崗閃緑岩

および閃緑玢岩で直径は約10cmである。またその強度試験結果を(表-2)に示す。供試体は(図-8)のごとく岩石を直径20cmのモールドに入れ周囲をモ

岩石名称	比重	ショア硬度	曲げ強度 kg/cm ²	引張強度 kg/cm ²	圧縮強度 kg/cm ²
閃雲花崗岩	2,616	85.4	151	53.8	817
花崗閃緑岩	2,683	83.2	186	62.9	1420
閃緑玢岩	2,707	-	-	92.2	1733

表-2 岩石強度試験結果(平均値)

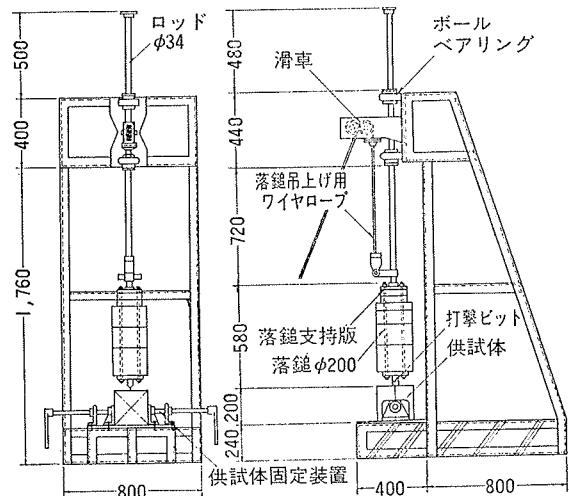


図-7 打撃破碎試験機

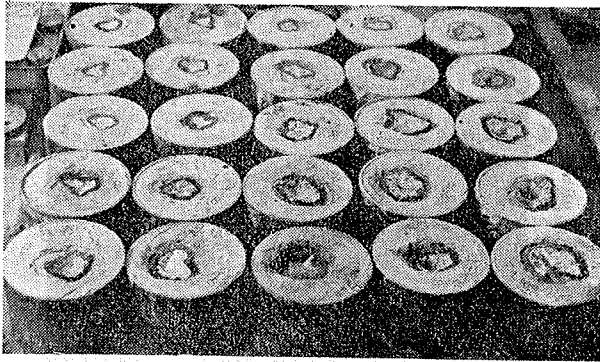


図-8 打撃試験用供試体

ルタルで固めて作成した。玉石の挙動に関する実験ではモルタルの強度は 0.3 kg/cm^2 から 42.9 kg/cm^2 まで7段階変化させ玉石に種々の打撃力を加えて沈下量、破碎状態、モルタルとの附着状態を調べた。玉石の破碎機構に関する実験では周辺モルタル強度は 200 kg/cm^2 以上とし落錘重量、落下高、刃先角度を変化させて裂砕溝の体積、面積、深さおよび破碎粉の粒度分布、ビットの摩耗状態を測定した。

3.3 実験結果

(1)玉石の挙動に関する実験：玉石は小径のものほど打撃に対する抵抗力は少ない。本実験に用いた玉石の大きさは 10 cm であるが、これはサクションパイプで吸いあげることのできる限界の大きさで、これ以下のものに対する検討は不必要であろう。(図-9)は玉石周辺固結土の圧縮強度と打撃力・ $30 \text{ kg} \cdot \text{m}$ を玉石に加えた時の玉石の沈下量および玉石をせん断破壊させるに要する打撃力との関係を示したものである。沈下量は打撃回数の増加と共に大きくなっているが一定値に収束する傾向を示している。また周辺固結土の圧縮強度の増加による沈下量の減少割合は著しい。

玉石が最もせん断破壊を受け易いのは周辺固結土の圧縮強度が $1.0 \text{ kg/cm}^2 \sim 2.0 \text{ kg/cm}^2$ の時である。周辺固結土の強度がこれより小さいと玉石に加えられた打撃エネルギーは玉石の沈下に消費されて玉石はせん断破壊を受けにくくなる。またこれより大きくても玉石のせん断破壊効果は小さい。

以上2つの基本的な実験結果から玉石の周辺地盤に要求される強度はある範囲内にあることがわかる、玉石の破壊効率よりも孔壁の崩壊に、より重点を置くならば周辺地盤の強度は $10 \text{ kg/cm}^2 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$ 程度が適当であると思われる。

(2)玉石、岩盤の破碎機構に関する実験：(図-10)は打撃力と破碎量との関係を示したものである。ここで示す破碎量とは刃先を 90° ずつ回転されて10回の打撃を玉石に加えた時の裂砕溝の体積である。なお破碎量は打撃回数に比例して増大する事が認められている。

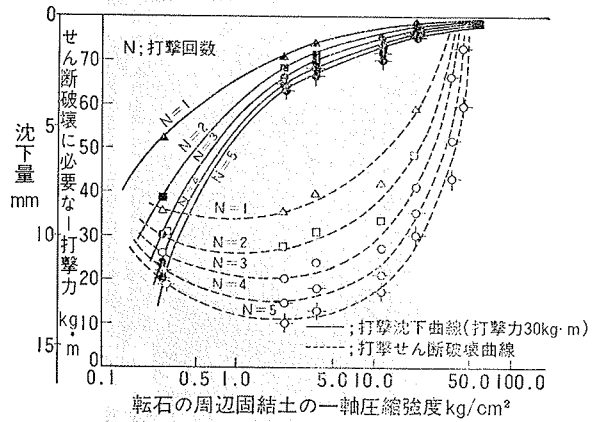


図-9 玉石の挙動

実際には玉石は玉石内部に発達する大きなせん断面より破壊されて破碎量はやがて飛躍的に増大するのであるが、ここではその状態に至るまで実験を行っていない。破碎量はある打撃力を越えると直線的に増加してゆく。また岩石の圧縮強度よりも、むしろビットの刃先角度、摩耗状態に大きく影響を受けるといことがわかる。また10打撃破碎量の $1/10$ は初期1打撃破碎量の約2倍で、このことから打撃破碎方法にもかなり影響されることがわかった。

(図-11)は打撃力と裂砕溝形状との関係を示したも

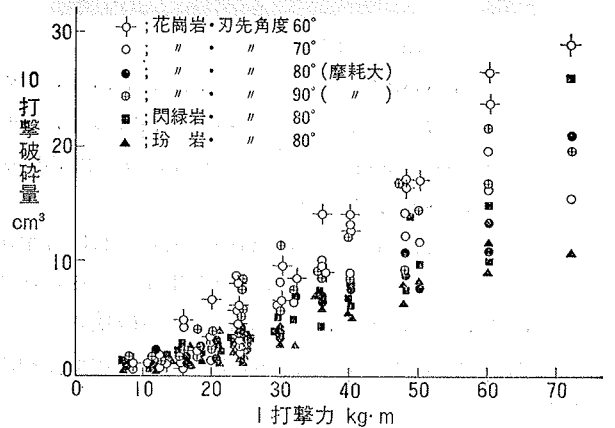


図-10 打撃力と破碎量

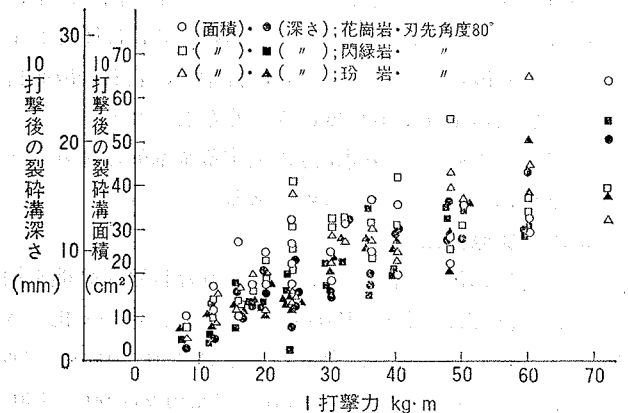


図-11 打撃力と裂砕溝形状

のである。深さには打撃力比例して増加するが、面積の増加には限界があるようである。

(図-12)は打撃力と破碎粉の粒度、粒径との関係を示したものである。打撃力の増大に伴ない平均粒径も均等係数もわずかながら大きくなっており打撃力が大きい程、打撃エネルギーは効果的に使われていることになる。

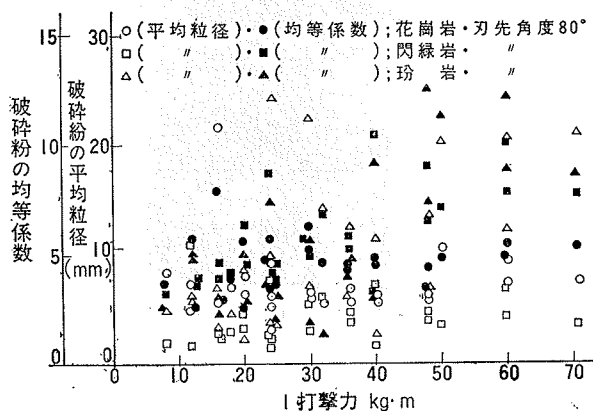


図-12 打撃力と破碎粉

4. 転石地盤の掘削試験

4.1. 実験目的

流水地盤におけるグラウト注入実験では適切な注入方法を探ることにより所定の地盤を固結できることが判明し、また岩石の打撃破碎実験では周辺地盤の固結強度はそれほど大きくなくても良いこと、掘削能率を向上させるためには、岩石の打撃破碎機構を充分考えて掘削方法を改良すれば良いことがわかった。しかしこれだけで転石地盤の掘削が可能であると断定することはできない。そこで大径の玉石を含む砂れき模型地盤を作成し、ここに実際と同様なグラウト注入を行なった後、SOLETANCHE 模型掘削試験機を作成して掘削試験を行なうこととした。試験は玉石の挙動状態、掘削状況を調査するもので、これによって実際の掘削における種々の問題点を把握することができると考えられた。

4.2. 実験方法

実験は(図-13)に示す掘削試験機を作成して行なった。実験土槽の容積は 1.6m³ である。チゼルは直径 20cm で総重量は 400kg である。また刃先形状は十字字型で総延長は 32cm である。チゼルの上下作動には落下高を正確にすることと実験作業を能率よくするためエアーシリンダーを用いた。なお落下高は 45cm である。削孔にともなうチゼルの位置の調節はエアーシリンダーを取り付けた二重台車を移動させて行なっ

た。模型地盤の作成に用いた砂れきの最大径は 60cm である。グラウトは LW を使用し、注入圧 5kg/cm² ~ 10kg/cm² で約 350 l 注入した。

掘削試験は 2 回実施したが(図-14)に示すように実験 I ではチゼルを水平方向に動かさず回転させて円柱状に 3ヶ所削孔した。実験 II ではチゼルを水平方向に順次 5 回ずつ移動させて長小判型に掘削した。

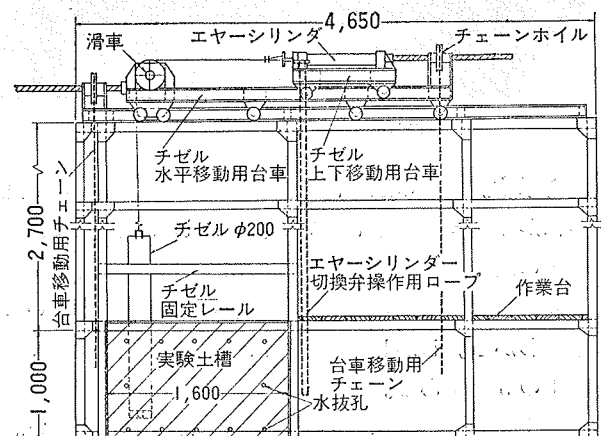


図-13 掘削試験機

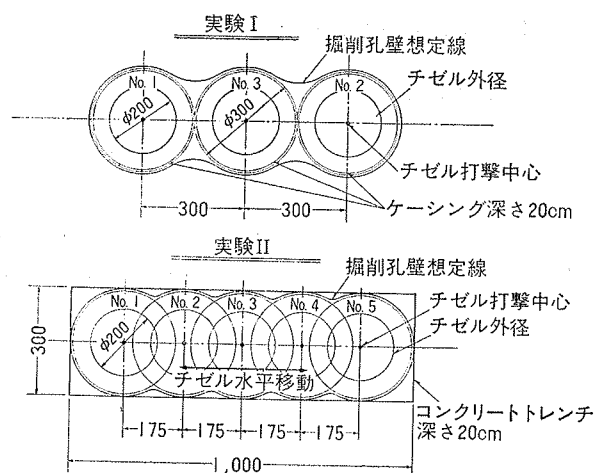
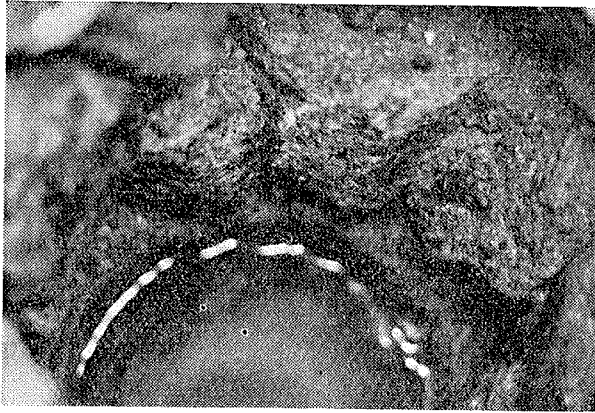


図-14 削孔方法

4.3. 実験結果

(1)実験 I : 本実験では地表面のゆるみを防ぐためケーシングを地表より約 20cm 挿入して掘削した。(図-15)は No.1 孔を地表面下 70cm まで掘削した時の掘削孔壁面の状況を示す。壁面には片側を削り取られ破碎された花崗岩が見られる。掘削中、孔壁に露出した玉石のうち直径 10cm 以下のものは打撃振動で順次孔底に崩落するのが見られ、掘削孔の最終直径は平均 30cm となった。掘削速度は 20mm/100 打撃である。

(2)実験 II : 本実験では深さ 20cm のコンクリートトレンチをあらかじめ設けてから掘削を開始した。(図-16)は地表より 80cm 迄掘削した時の掘削孔壁面の状



図一15 実験Ⅰ：掘削孔内部

況を示す。壁面の玉石は片側を削り取られながらも互いにかみ合っ固定している。しかしこの実験では実験Ⅰの時よりも大径の玉石が振動で崩落し、円形断面より長小判型断面の方が孔壁崩壊の可能性が大きいことがわかる。しかし掘削速度は 60mm/100 打撃で実験Ⅰの3倍である。

以上2回の実験における掘削能率は比較的小さい。これは掘削ずりの排除方法と打撃時における下部地盤の変位にも原因があるが、やはり単位刃先長当りの打撃力不足によるものであろう。

5. あとがき

これまで述べた3種の実験から転石地盤の掘削は可能であることがわかった。しかし本実験結果からチゼルが大径の玉石や岩盤に遭遇した時、掘削能率はかなり減ずるものと考えられ今後この点に対して掘削機や



図一16 実験Ⅱ：掘削孔内部

掘削方法の改善を掘らう必要がある。

これまで地中連続壁の施工例は多いにもかかわらず本報告で述べたような掘削に関する基本的研究は数少ない。本報告は今後この種の研究が各方面でなされるための先導的な役割を果たすものと考えられる。反面種々の点でまだ検討不足であると思われ、これから数多くの施工例調査と実験とを積み重ねて掘削機構を解明して行きたいと考えている。

最後に本実験に際して多大な助力を戴いた日本総合防水研究室および当社東京機械工場の方々に対して改めて厚く御礼を申し上げます。