

高濃度⁰ リマー溶液を使用した新しいサンプリング⁰ リング⁰ 方法の実験的研究

Experimental study on a new method of undisturbed sampling using high-concentration water-soluble polymer

柳澤 希実*・金子 進**・谷 和夫***・酒井 運雄**

Nozomi YANAGISAWA, Susumu KANEKO, Kazuo TANI and Katsuo SAKAI

A new method of undisturbed sampling using polymer is developed. This method can be applied for uncemented layers such as degraded weathered rocks and soft-rocks. The main characteristic of this method is that water-soluble polymer of high concentration can be pushed when it is enclosed in the core-barrel for rotary drilling without circulating drilling liquid. Even though this method can be used to take undisturbed samples, its mechanism has not been verified. Thus, series of experiments are conducted to elucidate its mechanism.

Key Words: polymer, undisturbed sample, sampling, rotary drilling, infiltration test

1. はじめに

風化した岩盤や固結度の低い軟岩における試料の採取方法としては、硬い粒子をも切削するビットを用いたロータリードリリングによるサンプリングが一般的である。しかし、ビットの冷却および切り屑（スライム）の排出には循環水が必要となり、これによって風化して固結度が低下した D 級岩盤や破碎帯では細粒部分や砂を洗い流してしまうという問題がある。また、最近の研究によって、試料は採取可能であるものの力学的に乱される可能性があることが指摘されている。

そこで、あらゆる地盤の乱さない試料を得る方法として、循環水を使用しないロータリードリリングによるサンプリング方法に注目してきた。これまで試料採取孔の外縁に設けた補助孔を利用して、ビットの冷却およびスライムの排出を行なうという手法が開発されてきた¹⁾。しかし、この手法は補助孔が必要となるため、経済性や深部地盤に対する適用性に劣る。そこで、新たに高濃度の水溶性高分子溶液を用い、非循環型の泥水として用いるロータリードリリングによる乱さない試料のサンプリング方法が考案され²⁾、GP サンプリング³⁾として実用化された⁴⁾。しかし、この手法は不攪乱試料の採取が可能である事は実証されているが、そのメカニズムは未だに解明されていない。また、現在開発途中の手法であるため、ポリマー溶液の試料への浸透問題や深部に適用できない等の課題が残されている。そこで、現在このメカニズムを解明するために行なっている実験的検討および提案する手法改善方法について紹介する。

2. 提案されたサンプリング

(1) サンプリングの特徴

提案されたサンプリングの特徴は、以下に示す 2 点がある。

* 工学士 横浜国立大学大学院 工学府 社会空間システム学専攻

** 正会員 工学士 基礎地盤コンサルタント(株)

*** Ph.D. 横浜国立大学大学院 工学研究院

- ①ロータリードリリングによって、岩盤の構成粒子を過度な荷重をかけずにビットでそっと切削する。
- ②ビットの冷却とスライム排出には、あらかじめサンプリングチューブ内に封入した高濃度（数％）の水溶性高分子溶液（以後ポリマー溶液と称す）を使用する。よって試料の表面を洗い出す可能性がある循環水を使用しない。

(2) 使用する装置

循環水を使用しないため、送水ポンプが不要である。そのため、必要な装置はボーリング機械とコアバレルの2点のみである。

ボーリング機械は、軸方向に载荷しながら軸回転（ロータリードリリング）が可能な簡便な構造のものであれば良い。循環水を使用しないため、ウォータースイベル等を設置する必要もない。

コアバレルは、単管式のものでも良いし、ビットの内径よりも径の大きいインナーチューブであれば多重管式のものでも良い。ポリマー溶液をサンプリングチューブ内に充填して、封入できる構造である必要がある。また、緩いマトリックス中の硬質な礫粒子もスムーズに切削できるようにダイヤモンドビットを用いることが望ましい。

(3) サンプリングの手順

提案されたサンプリングの基本的な手順を図-1の①～③に示す。

- ① サンプリングチューブ内にポリマー溶液を封入したコアバレルを地盤の表面ないし孔底にセットする。（図-1の①）
- ② ロータリードリリングによって、掘進する。試料がコアバレル内に入るに従って、ポリマー溶液がビットよりアウトチューブ外に押し出される。この時ビットを冷却すると共にスライムを排出する。（図-1の②）
- ③ 試料の底部を切断して、試料をコアバレルと共に回収する。（図-1の③）

3.T地点における実証例

提案された手法を用いて、締め固めた砂および砂礫の地盤（T地点）でサンプリングを実施した事例について紹介する。砂礫地盤は未固結なため崩れやすく、不攪乱試料の採取が困難な地盤である。

(1) 使用した装置

ボーリング機械、コアバレルを使用した。ボーリング機械は、出力2200Wでストローク1.1mのハンドフィード式の簡易な装置を用いた。

コアバレルは、呼び径

160mm、採取長1600mmのもの

を使用した。単管式のもので、ポリマー充填口、ロッド、ポリマー溶液、コアバレル、ビット、ビットはインプリグネーティッド・ダイヤモンド・ビットで、ビットの内径は150mm、外径は160mmである。

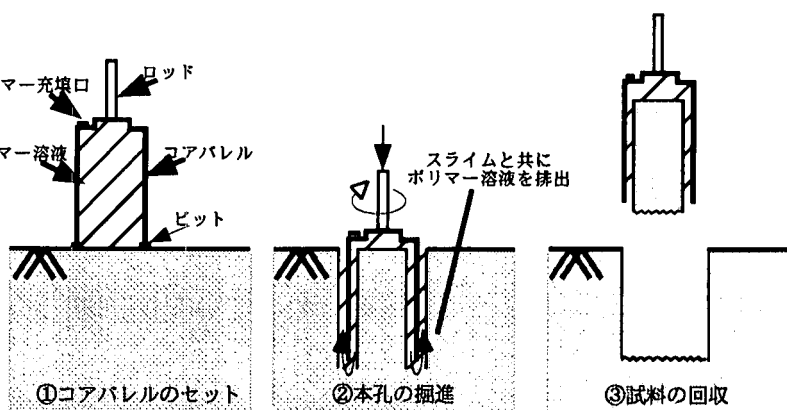


図-1.T地点における提案されたサンプリングの手順

(2) サンプルングの手順

サンプルングの手順は図-1 に示す①～③の 3 段階である。

- ① コアバレルに 20 リットル程度のポリマー溶液を充填し密閉する。ポリマー溶液は原液を数十倍に希釈したもので、濃度は数%程度である
- ② ロータリッドリリング（回転数 350rpm 程度）によって、土質地盤の通常の削孔よりも遅い掘進速度（平均 1.3cm/min）で掘削する。その際に、コアバレルに採取された試料の体積分のポリマー溶液が押し出される。
- ③ コアバレルを回収する。

(3) サンプルングされた試料の状態

提案されたサンプルングにより採取された試料等を写真-1, 2 に示す。写真-1 は本孔より採取された試料である。未固結な山砂が崩れず、側面が滑らかな円柱状の形を保っている。また、径が 2mm～数 cm の礫もきれいに切断されており、写真-2 に示すようにその切削された断面は磨いたような光沢を放っている。

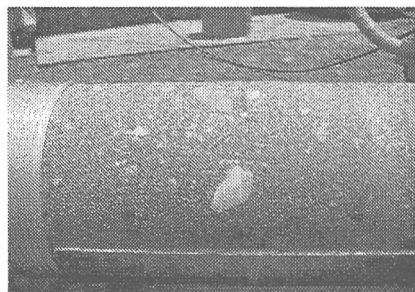


写真-1.採取された試料 (T 地点)

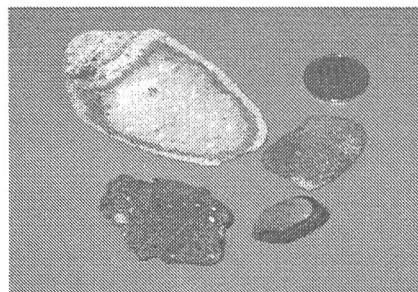


写真-2.採取された試料の表面より取り出した礫

4. ポリマー溶液

(1) ポリマー溶液の一般的な特性

使用している水溶性高分子は合成高分子に属するもので、通常のボーリングを行なう際に使用する泥水作製用の増粘剤である。その成分表を表-1 に示す。

表-1.増粘剤の成分表

主成分	ポリアクリルアミド
外観	乳白色液体
比重	1.10±0.02
pH (1%溶液)	7.8±0.2

ポリマー溶液は非ニュートン流体で、せん断速度の増加に伴い見かけの粘性係数が減少する擬塑性流体である。この性質により、掘進に伴ってサンプルングチューブ内からアニユラス部（コアバレル側面と孔壁の空間）に押し出されるポリマー溶液が、狭隘部であるビット刃先部分を通過する時は粘性が低く、アニユラス部やサンプルングチューブ内では粘性が大きくなる。この性質が大きいほど掘進率が速く、坑井内洗浄能力が大きくなる⁵⁾。

また、一般的な水溶性高分子の機能は、①レオロジー的性質の改善（例えば増粘作用）、②界面活性作用（表面張力低下作用・乳化作用）、③皮膜形成作用、④保湿作用、⑤包接作用、⑥殺菌作用等の多岐にわたる機能を持つと言われている。さらに配管抵抗減少を促すトムズ効果⁶⁾や法線応力効果の一種であるワイセンベルグ効果⁷⁾という特殊な性質も有している。

(2) ポリマー溶液の粘性特性

回転式粘度計（Thermo Haake 社製, Visco Tester VT6）を用いて、温度 20℃において計測した粘性係数を図-2 に示す。0.1%から 5.0%の各濃度に希釈したポリマー溶液の粘性係数 μ と粘度計のローターの回転数 R_{spin} との関係は、両対数グラフ上で線形であるので、 $\mu = A \times R_{spin}^B$ の式（ A, B : constant）で表すことができる。ただし、図-2 の横軸は粘度計のローターの回転数であって、コアバレルの回転数ではない。そこで、回転する円環にはさまれた溶液のせん断速度を評価する式（図-3 を参照）を用いると、掘削中のコアバレル（内径 150mm, 回転数 350rpm）の内側面と試料（外径 150mm）の側面の間に充填されたポリマー溶液のせん断速度は $1400s^{-1}$ 程度と推定できる。このせん断速度は、粘度計のローターの回転数では 6500rpm 程度に相当する。200rpm 以上の高回

転域のデータは、装置の制限によって計測できなかったもので、両対数プロットの粘性係数 μ と粘度計のローターの回転数 R_{spin} との線形な関係を高回転域にまで外挿して推定する。その結果、掘削中における濃度が数%のポリマー溶液の粘性係数は図-2のAの部分に示すように10~1000mPa・s程度と見積もることができる。

コアバレルが回転していない状態では、粘性係数が10の5~6乗オーダー(mPa・s)と非常に粘性が高く、透水係数が低い。つまり、試料にポリマー溶液が浸潤しにくいことが期待できる。また、掘進中には粘性が比較的に低く、試料に作用するせん断応力は抑えられていることが分かる。

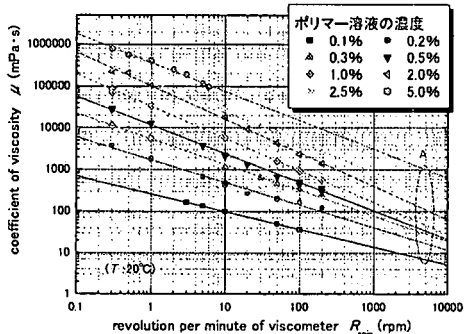


図-2. ポリマー溶液の粘性係数の測定結果

$$\frac{du}{dy} = \frac{2r_1^2 r_2^2 (\omega_1 - \omega_2)}{(r_1^2 - r_2^2) r^2}$$

$$\frac{du}{dy} : \text{せん断速度}$$

$$r : \text{半径} \quad \omega : \text{角速度}$$

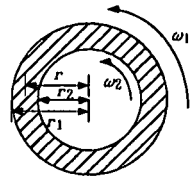


図-3. 回転する円環にはさまれた溶液のせん断速度

(3) 提案されたサンプリングにおけるポリマー溶液のメカニズム

乱さない試料が得られるメカニズムは、まだ分かっていない。現在、表-2に示すように、コアバレルが回転している掘進中と、回転が終了して試料を回収するプロセスの2つの作業工程で機能するメカニズムに分けて検討している。

まず掘進中には、①ポリマー溶液は粘性を有しているが、回転するコアバレルの内側に立つ試料の側面にはせん断応力がほとんど作用せず、さらに②機械的な振動やトルク（ねじれ）に対して試料が充分なせん断強さを有するように拘束圧が作用している、と推測される。また、③試料の表面から粒子が剥離しないように試料を包み込んで一体化させる効果が働いていることも考えられる。試料を回収する段階では、②および③の効果が発揮されているはずである。

①の試料に作用するせん断応力がゼロとなるメカニズムを説明するモデルとして、渦モデルとトムズモデルを考えている。図-4の①に示す渦モデルは、高速で回転するコアバレルと試料の間のポリマー溶液に剛体渦またはキャタピラーのような構造が形成され、この渦がベアリングの機能を発揮するというモデルである。試料の表面近傍にあるポリマー溶液の流体粒子と試料の表面には相対速度が生じず、粘性に起因するせん断応力も非常に小さくなると考えている。一方、図-4の②に示すトムズモデルは、ポリマー溶液のトムズ効果により、試料の表面近傍に特殊な境界層が形成されて摩擦抵抗が減少する⁶⁾というモデルである。

また、図-4の③の皮膜形成モデルは、試料の表面にポリマー溶液による薄い皮膜（メンブレン）が形成されるというモデルである。皮膜が形成される理由としては、粒子間へのポリマーの目詰まりや、ポリマーの凝集作用が考えられる。試料を包み込むように形成される皮膜は、掘進中にも試料回収時にも、③試料の表面から粒子が剥がれ落ちることを防止する。また、皮膜が試料中の間隙とポリマー溶液を分離するメンブレンとなり、②ポリマー溶液の圧力が拘束圧（図中の p ）として試料に加わるメンブレン効果も期待できる。図-4の④のワイセンベルクモデルはワイセンベルク効果により流線方向にポリマーが配向され、せん断応力および張力が発生し、これと②垂直な方向に圧力（拘束圧）が生じる（法線応力効果が発揮する）⁷⁾というモデルである。この配向が試料回収時も保存されれば、試料には拘束圧が加わり続けるはずである。

5. 浸潤試験

表-2 に示した 3 つのメカニズムを図-4 のモデルに照らし合わせながら挙動確認実験を行ない、検証していく必要がある。行なう実験は浸潤試験¹⁾とアクリル回転実験の 2 種類である。浸潤試験は、試料へのポリマー溶液の浸潤程度および浸潤条件を調査することを目的とし、アクリル回転実験は試料部に加わるトルク・拘束圧という影響を計測し、ポリマー溶液の挙動を可視化することを目的とする。本論文では、前者の浸潤試験について報告する。

表-2 掘削中に試料が乱されないメカニズム

メカニズム	作業工程 ^(注)		モデル
	掘進中	試料回収	
①トルクが極小	○	—	渦モデル・トムズモデル
②拘束圧が作用	○	△	皮膜形成モデル (メンブレン効果) ワイヤハベルクモデル
③粒子の剥落防止	○	○	

(注)○:機能している, △:機能している可能性がある, —:機能していない

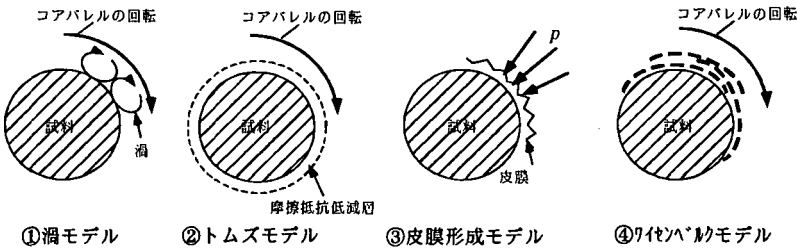


図-4. 試料が乱されないメカニズムのモデル

(1) 実験方法

図-5 に浸潤試験装置を示す。供試体を作製し、その上にポリマー溶液を載せ、浸潤深さを経過時間と共に計測する試験である。現状の技術での掘削時間が1時間30分程度でありポリマー溶液の圧力が最大で100kPa程度であることから、計測時間を3時間、ポリマー溶液の圧力を200kPaまでとした。

表-3. 計測事項

計測項目	浸潤試験
	浸潤深さ L (mm) 時間 t (sec)
変化項目	ポリマー濃度 C (%)
	拘束圧 P_p (kPa)
	間隙比 e (相対密度 D_r)
	有効径 D_{10} (mm) 湿潤条件

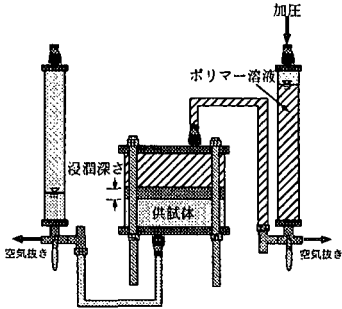


図-5. 実験装置図

表-4. 使用した試料

試料	密度	相対密度	有効径	湿潤条件
豊浦砂	2.65 g/c m ³	85%	0.116mm	乾燥

表-3 に試験の計測事項を、表-4 に使用した試料について示す。表-3 に列挙した変化項目について、計測項目である浸潤深さについて比較検討する。

(2) 実験結果

まず、図-6、7 に浸潤深さと時間 ($L-t$) の関係を示す。図-6 は拘束圧 $P_p=1\text{kPa}$ としてポリマー濃度を变化させたときのグラフである。このグラフよりポリマー溶液が高濃度になるほど浸潤深さが浅くなっていることが分かる。また、図-7 はポリマー濃度 $C=1.0\%$ のときに拘束圧を变化させたグラフであるが、拘束圧が高くなるほど浸潤深さが深くなっていることが分かる。つまり、高濃度で低拘束圧になるほど試料部にポリマー溶液が浸潤しにくくなる。

コアに対する浸潤程度を決定するために、 $L-t$ 関係から 2 つのモデルを考えた。1 つ目のモデルは、ダルシー則を基にしたもので、 $L = A\sqrt{t}$ (A : constant) で表す平方根モデルである。このモデルは定数 A と経過時間が決定すれば浸潤深さが決定するモデルである。そこで、この定数 A とポリマー濃度、拘束圧の関係を示したものが図-8 である。2 つ目のモデルは、浸潤深さが収束すると仮定したもので、 $L = a(1 - e^{-bt})$ (a, b : constant) で表す指数関数モデルである。定数 a, b を求めたところ、定数 b は 0.0001~0.02 程度だった。定数 a は $t=\infty$ のときの浸潤深さに相当する。そこで、平方根モデルと同様に定数 a とポリマー濃度、拘束圧の関係を示したものが図-9 である。

図-8, 9は1つの曲面で表現されており, 浸潤程度をある一定の制限値以下にするために, サンプリグ時間, 濃度, 拘束圧を決定する事が可能となる。今後は, 間隙比 e (相対密度 D_r), 有効径 D_{10} , 湿潤条件を変化させた供試体を用いて実験を続け, モデル化していく予定である。

6. 提案するサンプリグ方法

提案されたサンプリグの改善方法を, 掘削方法とコア回収方法に別けて考えている。まず掘削方法についてであるが, 図-8, 9の浸潤試験と, 今後行なうアクリル回転実験の結果に基づいて決定される最適な条件 (ポリマー濃度などの特性, 拘束圧, 回転数) によって図-1に示す手順にしたがって行なう。また, 現状ではコアの底部で試料を地盤から分離して地上に回収することが容易ではないため, 浅部での適用に限定されている。よって深部地盤でも容易にコアの底部を切断する技術を考案し, 深部地盤にも適用できるようにする必要がある。

7. おわりに

従来のロータリードリリング技術では, 細粒部分などが循環水で洗い出されたりする問題があった。しかし, 高濃度の水溶性高分子溶液をサンプリグチューブに封入したサンプリグ方法を用いることによって, 試料を乱さない状態でそと (過度の環境変化を与えずに) 切り出すことが可能であることが実証された。また, 乱さない試料の採取を可能にするメカニズムを解明するための実験方法を考案し, 現状のサンプリグ技術の改善点を定めた。今後は具体的な改善方法を考案していく予定である。

参考文献

- 1) 酒井運雄: 地盤試料採取方法とその装置, 特許番号第2696472号, 1993.
- 2) 酒井運雄, 金子進, 川原隆: 粒状体地盤コアバーレル, 特許出願公開番号P2001-98539A, 1999.
- 3) 基礎地盤コンサルタンツ株式会社: 高機能サンプリグシステム技術資料「GPサンプラー」, 1999.
- 4) 横田聖哉・久保正顕ほか: 礫質土不攪乱試料サンプリグと大型三軸圧縮試験結果, 土木学会第57回年次学術講演会, pp.1625-1626, 2002.
- 5) 沖野文吉: ポーリング用泥水, pp.29, 1981.
- 6) 堀内照夫: 水溶性高分子の最新技術, pp.2 pp.69, 2000.
- 7) 中村喜代治: 非ニュートン流体力学, pp.3, 1997.
- 8) 井上誠・小峰秀雄ほか: メスシリンダーを用いたベントナイト系緩衝材・埋め戻し材の浸潤・膨潤特性の簡易な実験法の提案, 第37回地盤工学研究発表会, pp.2411-2412, 2002.

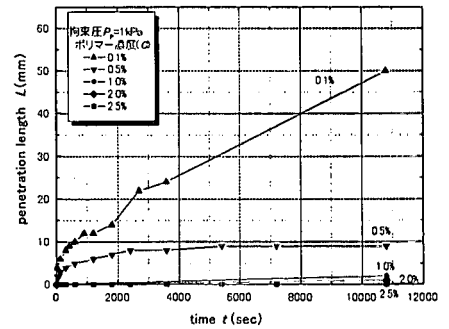


図-6. $L-t$ 関係 ($P_p=1\text{kPa}$)

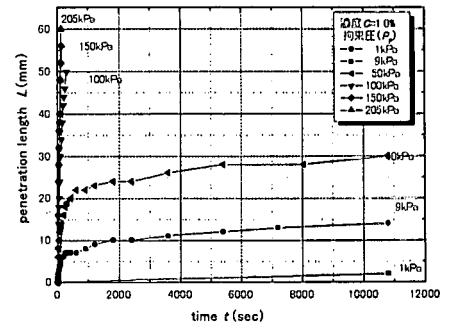


図-7. $L-t$ 関係 ($C=1.0\%$)

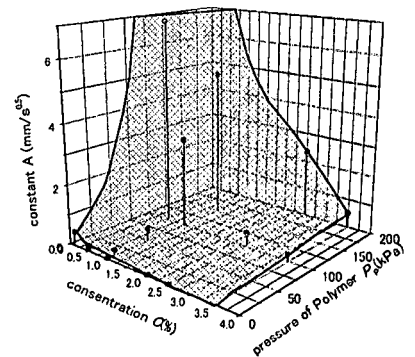


図-8A. $C-P_p$ 関係 (平方根モデル)

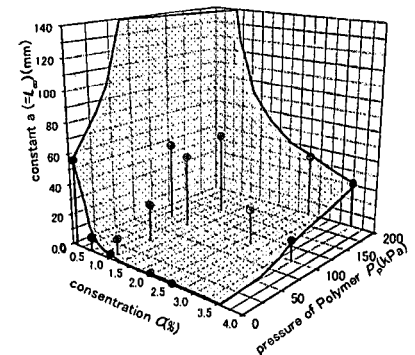


図-8B. $C-P_p$ 関係 (指数関数モデル)