

営団11号線扇橋シールドにおける礫対応泥水の検討

STUDY OF A NEW TYPE OF SLURRY FOR GRAVEL DEPOSIT

杉山博一¹⁾・後藤 茂¹⁾・大友信悦²⁾・原 忠²⁾・上村三幸³⁾

Hirokazu SUGIYAMA, Shigeru GOTO, Shinetsu OHTOMO, Tadashi HARA, Miyuki KAMIMURA

A new type of slurry that contains a new additive made of the polyacrylamides is developed for stable excavation in buried terrace gravel (btg) deposit by slurry shield. Three kinds of experiments were conducted in advance in order to apply the new slurry to the Ohgi-bashi shield tunnel of the Teito Rapid Transit Authority No.11 Line (Hanzomon line). From the results of the tests and the application to the excavation, the following conclusions were drawn. (1) The amount of the new slurry that leaked out of the chamber was less than the usual slurry. (2) The slurry has ground improvement effect, so that the slurry is suitable for the cohesionless sandy or gravel ground.

Key Words: slurry shield, face stability, buried terrace gravel, polyacrylamides, centrifuge model test

1 はじめに

営団11号線扇橋シールドは半蔵門線の延伸工事として東京都江東区白河3丁目の清澄変電所立坑から猿江2丁目の住吉停車場立坑にいたる延長1,359mのシールド工事である(図-1参照)。当該工区はA・B線2本の外径6.9mの単線トンネルを掘削するが、発進地点から30mまでは並列で掘進し、その後徐々に縦列に移行して立坑から約700m地点でトンネル離隔が3mの完全な縦列トンネルになる(図-2参照)。ここで報告するA線シールドは先行トンネルであり、縦列配置のうち下段を掘削するが、縦列配置になる付近で崩壊性の高い砂礫地盤(埋没段丘礫層)に遭遇する。この砂礫地盤に対応するためポリアクリルアミドを微量添加した泥水(以下、PAA泥水と呼ぶ)の配合を案出し、砂礫地盤への適用性を検討している^{1),2),3)}。本報告ではPAA泥水の砂礫地盤への適用性を検討するために行った3種類の実験の結果と、現場で得られたデータをもとにPAA泥水の砂礫地盤への適用性および有効性について述べる。

2 PAA泥水の砂礫地盤への有効性に関する実験的検討

崩壊性の高い砂礫地盤を安定して掘進するためには、逸泥しにくい性状を有する泥水により切羽泥水圧を有効に地

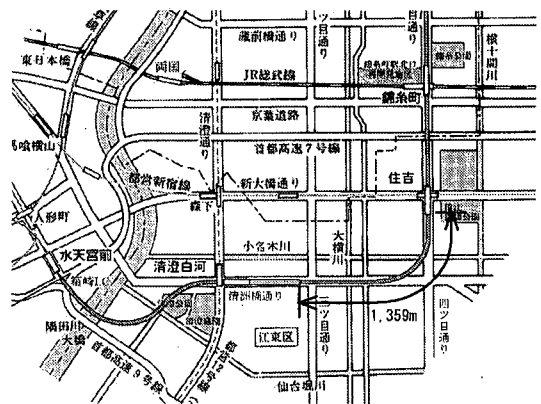


図-1 現場概要図

- 1) 正会員 清水建設(株)技術研究所
- 2) 清水建設(株)土木東京支店土木第一部
- 3) 帝都高速度交通営団 建設本部

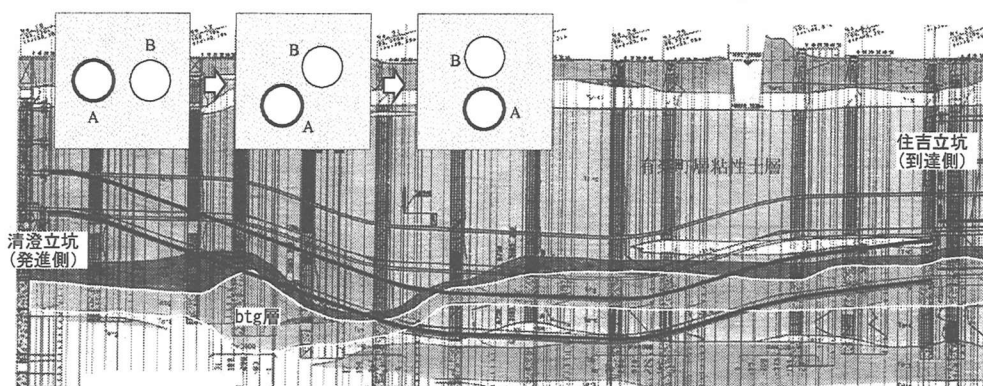


図-2 地盤の状況

表-1 検討した泥水の配合 (10リットル分) と特性

	配合名：備考	配合					性状	
		現地発生泥水 (g)	市販粘土 (g)	ベントナイト (g)	水 (g)	PAA (g)	比重	ファンネル粘性 (s)
新規配合泥水	N-1: PAA 無添加	—	950	850	9,290	0.0	1.11	23
	N-2: PAA1cc 添加					1.0		23
	N-3: PAA2cc 添加					2.0		32
	N-4: 高濃度泥水	2,900	1,100	8,400	—	—	1.24	39
現地発生泥水	G-1: 現地発生泥水のみ	11,900	—	—	—	—	1.19	23
	G-2: PAAのみ添加	11,900	—	—	—	2.0	1.19	23
	G-3: PAA,ベントナイトを添加	3,500	—	809	6,751	2.0	1.11	36

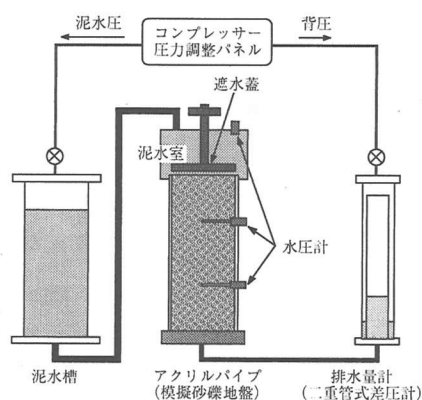


図-3 泥水浸透実験装置の概念図

盤に伝達しながら掘進すること、および適正な泥水圧管理のもとで掘進することが重要である。そこで掘進に先立って3種類の実験を行い、PAA 泥水の btg 層等の砂礫地盤への適用性について検討した。

2.1 PAA 泥水の基本的性質

実験で用いた各種泥水の配合を表-1 に示す。PAA 泥水は固体分としてベントナイトとポリアクリルアミドを泥水容量に対して 0.02%程度と微量添加することの特徴としている。実験では比較のために新規に配合した泥水その他、現場で発生している泥水にポリアクリルアミドを添加した場合の泥水も用いた。

2.2 泥水の浸透実験

本実験は各種泥水の逸泥の可能性を検討するための実験であり、btg 層を模擬した模型地盤に各種泥水に圧力をかけて作用させたときの地盤への浸透状況を確認した。

図-3 に装置の概念図を示すが、模擬地盤を入れるアクリルパイプ (内径 20cm、長さ 50cm) と模擬地盤端部に泥水圧を作用させるための泥水室とから成っており、また、アクリルパイプには地盤内の間隙水圧が計測できるように水圧計が設置されている。実験では泥水室の遮水蓋を開放することにより加圧された泥水を一気に模擬地盤の端面に作用させ、地盤内の間隙水圧の変化や排水量から逸泥の有無を判定する。実験に用いた模擬地盤は btg 層の地盤調査結果を基に礫含有量が 55%となるようにコンクリート用の粗骨材と細骨材を混ぜ合わせて作成した。

図-4 および 5 はそれぞれ泥水が逸泥した場合と逸泥が停止した場合の結果を示す。図-4 に示したように、逸泥した場合は蓋の開放時に上昇した模型地盤の間隙水圧が時間が経過しても元の値まで低下しないが、逸泥を抑止できた場合は元の間隙水圧まで低下していることが特徴である。実験の結果、新規配合泥水の場合は PAA を 0.02%添加

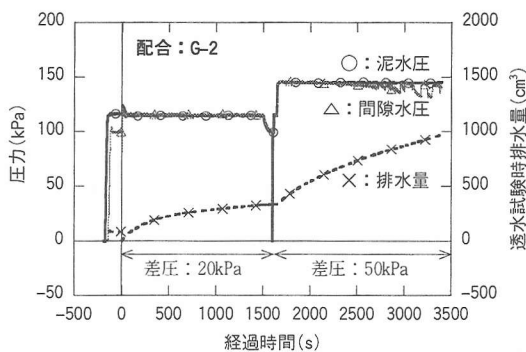


図-5 逸泥した場合の実験結果例 (G-2)

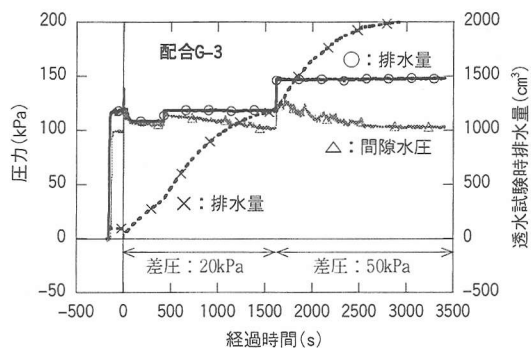


図-4 逸泥を抑止した場合の実験結果例 (G-3)

した N-3 の配合、現場発生泥水を再調整した場合でもベントナイトおよび PAA を 0.02% 添加した G-3 の配合が逸泥を抑止できることが明らかとなった。写真-1 は浸透実験時の状況であり、このように PAA 泥水は泥膜を形成しないが、地盤にある程度浸透して停止することが特徴である。また、写真-2 は実験後の砂礫地盤を示したものであるが、全く自立性の無い地盤が実験後にはアクリルパイプを横倒しにしても崩落しなかった。これは、PAA 泥水が浸透することにより地盤の自立性が改善されたことを示している。



写真-1 浸透実験状況

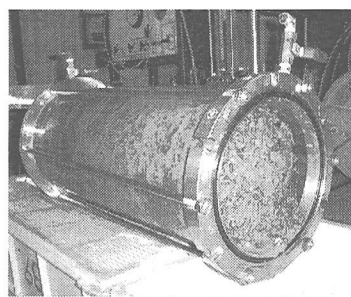


写真-3 実験後の模擬砂礫地盤

2.3 CD 三軸試験

PAA 泥水が浸透した部分の地盤が固結する現象について、その地盤改良効果を定量的に評価する目的で CD 三軸試験を行った。実験は粒径が粗めの 4 号珪砂（平均粒径 0.7mm）の間に泥水を満たした供試体を作成し、数種類の拘束圧で供試体を圧密したのちに排水条件下で圧縮試験を行い、地盤の強度定数である粘着力 c および内部摩擦角 ϕ を求めた。また比較のために通常行われているように清水で満たされた供試体の実験も行った。図-6 に破壊時のモール円を示したように、多少の差異は見られたものの有意な差は表れなかった。ただし、清水や PAA の含まれない通常の泥水で満たした供試体は実験後も全く自立しないが、間隙を PAA 泥水で満たした供試体は写真-3 に示すように実験後に拘束圧を取り除いた状態で自立していた。

2.4 遠心模型実験

PAA 泥水（配合：N-3）を用いた場合のシールド切羽に与える安定効果を定量的に把握するため、シールド切羽の応力状態を模擬できる遠心模型実験手法により検討を行った。図-7 に泥水シールドの切羽の応力状態を再現するための遠心模型実験用土槽の概念図を示す。実験装置および方法の詳細については参考文献 2) を参照

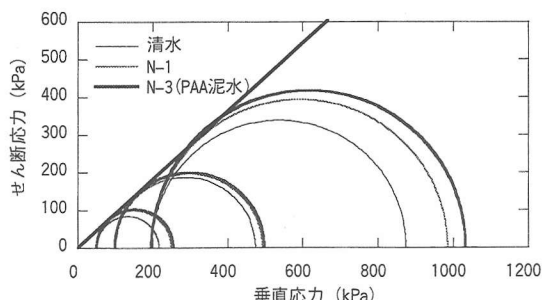


図-6 破壊時のモール円

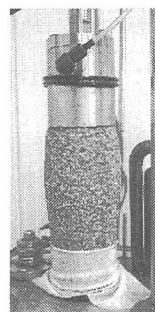


写真-2 供試体が自立している状況

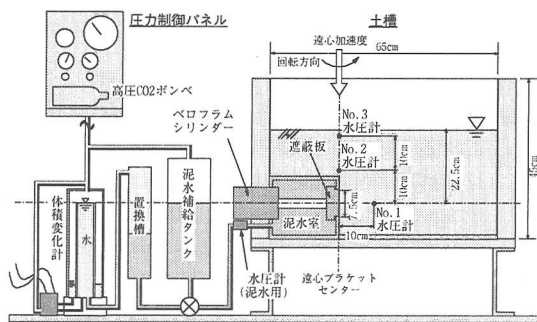


図-7 遠心模型実験用土槽の概念図

されたい。実験では PAA 泥水により模型地盤（4 号珪砂）を保持させた後、泥水圧を除荷しながら切羽を保持しうる最低限の泥水圧を観察した。図-8 および図-9 はそれぞれ実験時の各種圧力と地盤崩壊時にチャンバーに流入してくる土砂量の経時変化を示しており、泥水圧が地盤の間隙水圧とほぼ等しくなった時点で切羽が崩壊したことを示している。つまり、PAA 泥水が地盤に浸透したことにより主働土圧が 0 とみなせる程度まで地盤の自立性が改善された結果であり、崩壊性の高い砂礫地盤に PAA 泥水を用いる有効性を示すことができた。

3 PAA 泥水の適用性の検討

前述した実験結果を基にし、PAA 泥水を現場に適用した。PAA 泥水を現場で使用するにあたり、btg 層が出始める 400 リング付近で試験的に PAA 泥水を使用する区間を設け、現場における作泥方法を決定した。その結果、2 リングごとに PAA 泥水を作液して添加することを基本としたが、途中、礫分が多くなった 730～820 リングでは PAA 泥水と PAA を含まないベントナイト泥水を交互に添加した。したがってリングごとの泥水の調整方法は、0～400 リングまでは通常の調整①だけであるが、400 リング以降は添加物等を加えない通常の調整②と、ベントナイト泥水を添加する場合③、PAA 泥水を添加する場合④のように合計で 4 種類に区分できる。

3.1 泥水性状試験結果

図-10～13 は掘進に用いた泥水の性状試験（比重、ファンネル粘性、イールドバリュウ、ろ過水量試験）の結果であり、PAA 泥水を使用開始した 400 リング以降より泥水の性状をチェックする目的で各リングの掘進前に実施したものである。図より当然の結果ではあるが、泥水の調整方法によってほとんど比重は変わらないが、PAA 泥水を添加した場合④はファンネル粘性およびイールドバリュウ等の粘性が通常の調整時②より高くなり、また、ろ過水量は小さくなる傾向として分かる。なお、800 リング付近よりイールドバリュウおよびろ過水量の傾向が変化しているが、730～820 リングで PAA 泥水を添加して調整する場合④とベントナイト泥水を添加して調整する場合③を繰り返したことにより良質な泥水性状が保たれたことと、820 リング以降は btg 層上部の埋没段丘ローム層（bl 層）が切羽に現れるため、泥水中の細粒分が増加したことによるものと思われる。

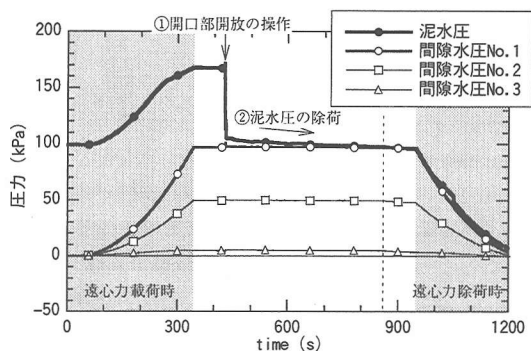


図-8 圧力の経時変化

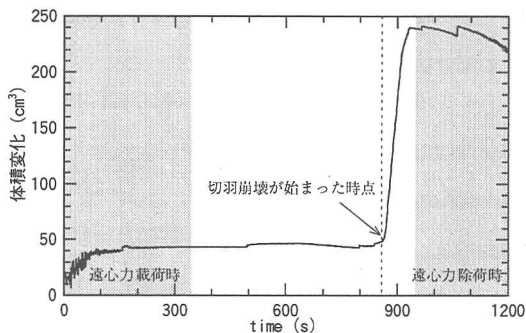


図-9 体積変化の経時変化

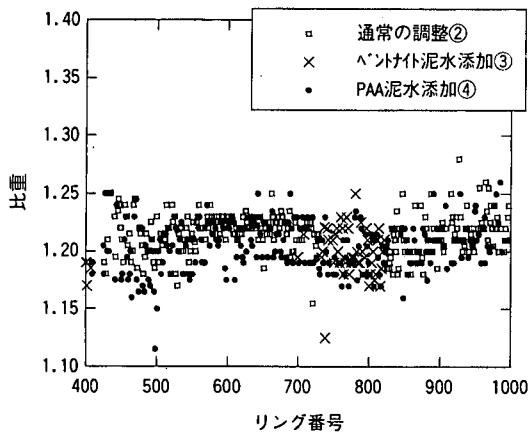


図-13 泥水比重の変化

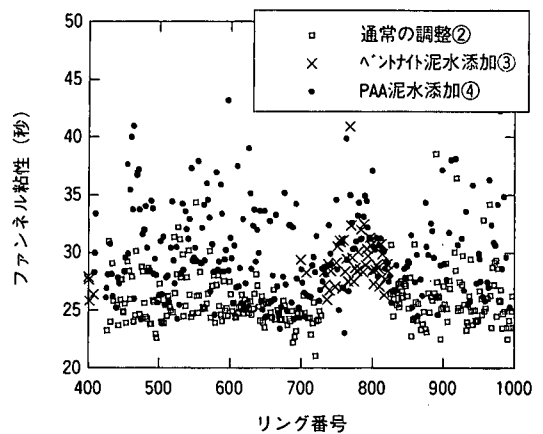


図-12 ファンネル粘性の変化

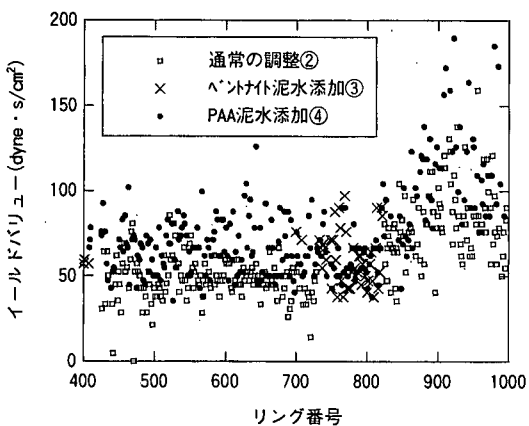


図-11 イールドバリューの変化

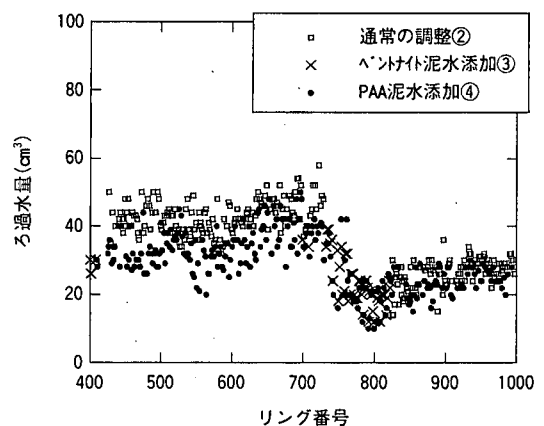


図-10 ろ過水量の変化

3.2 施工実績からみた定量的な PAA 泥水の効果

図-14 は掘削土中の砂礫の含有率をある程度反映している乾砂偏差量のリングごとの変化である。現場では当初 PAA 泥水を使用し始めた 400 リング以降より *btg* 層が出現すると予想していたが、200～300 リング付近にも切羽下半部に *btg* 層が出現した箇所があり、その区間では PAA が全く含まれていない泥水により掘進していた。そこでこの区間と乾砂偏差量がほぼ同じであり、PAA 泥水を用いて掘進していた 800 リング付近での掘進結果を比較する。なお、800 リング付近は PAA 泥水を添加する場合と添加しない場合があるが、基本的には泥水中に PAA がある程度残留していると考えられるため PAA 泥水を使用した場合とみなす。

図-15 は掘削偏差流量の変化であり、リングごとに平均した瞬間逸泥量を示している。また、図-16 は掘削偏差量の変化であり、リングごとの全逸泥量を示している。これらのグラフから明かなように、PAA 泥水を用いていなかった 250 リング付近の逸泥量は、PAA を用いていた 800 リング付近の値のほぼ 2 倍であり、逸泥に関しては PAA 泥水の方が効果があったことが分かる。なお、掘削偏差流量と掘削偏差量にはある程度の相関はあるが、厳密には異なる指標である。

3.3 施工時に現れた定性的な PAA 泥水の効果

掘進中に現れた定性的な効果としては、200～300 リング付近ではアジテータが過負荷で停止する事例が 40 リングあたりで 5 回ほど発生していたが、PAA 泥水を使用した後はほとんど生じていない。つまり、PAA 泥水による地

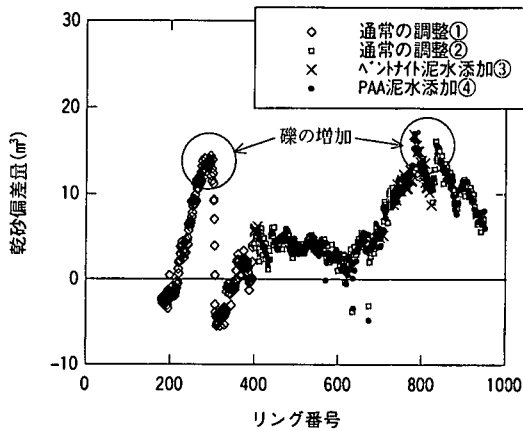


図-16 乾砂偏差量の変化

盤改良効果によりチャンバー内への砂の剥落が生じなかった結果であると思われる。

4 まとめ

崩壊性の高い砂礫地盤を掘進する泥水シールドに有効な泥水として PAA 泥水が案出され、その適用性および有効性を検討することを目的として 3 種類の実験（泥水の浸透実験、CD 三軸試験、遠心模型実験）を実施し、砂礫地盤に対する有効性を検討した。また施工時に得られた各種データから PAA 泥水の適用性について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- ① PAA 泥水は従来の高濃度泥水のように切削した表面に泥膜を形成して逸泥を抑止するメカニズムとは異なり、ある程度砂礫地盤に浸透して PAA の粘性効果により逸泥が抑止される。
- ② PAA 泥水の地盤改良効果について、地盤強度定数の粘着力および内部摩擦角には明確な差が現れなかったが、CD 三軸試験および遠心模型実験の結果より地盤改良効果が期待できる。
- ③ 掘進データより、PAA 泥水を用いた場合では用いなかった場合より逸泥量が少なかった。

逸泥量は切羽安定効果を定量的には表しているとはいえないが、PAA を用いなかった場合に発生していたトラブルが PAA 泥水を用いた後には激減したことや、実験結果等から定性的ではあるが PAA 泥水には切羽安定効果があると言えよう。今後はさらに PAA 泥水の地盤改良効果のメカニズムについて検討していきたい。

謝辞:本論文を作成するにあたり、扇橋シールド工事関係の方々より貴重なデータおよびご意見をいただきました。謹んで感謝いたします。

参考文献:

- 1) 「営団 11 号線扇橋シールドにおける礫対応泥水の検討 (その 1)、工事の概要とポリアクリルアミド配合泥水の基本的な性質」、第 36 回地盤工学研究発表会、2001.6
- 2) 「営団 11 号線扇橋シールドにおける礫対応泥水の検討 (その 2)、遠心模型実験による切羽保持性能の検討」第 36 回地盤工学研究発表会、2001.6
- 3) 「営団 11 号線扇橋シールドにおける礫対応泥水の検討 (その 3)、現場発生泥水にポリアクリルアミドを配合した泥水の性質」、土木学会第 56 回年次学術講演会、2001.10

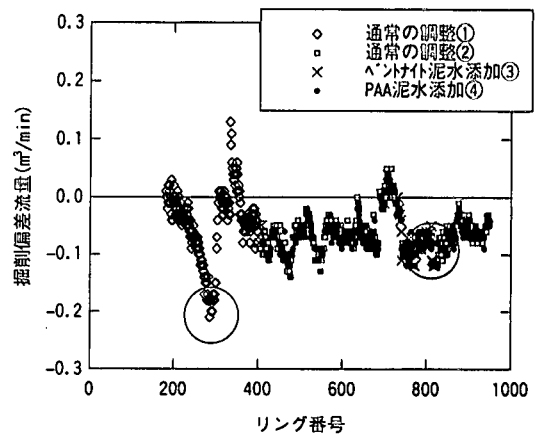


図-15 掘削偏差流量の変化

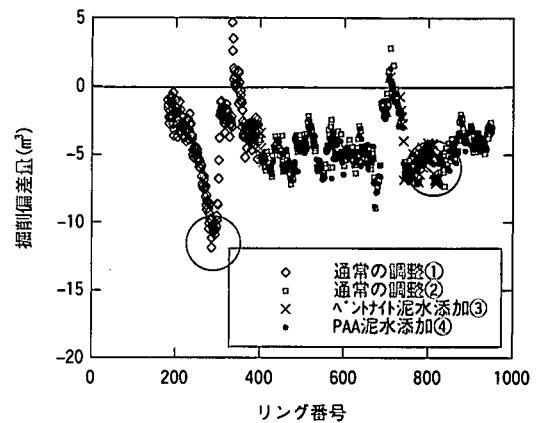


図-14 掘削偏差量の変化