

# シールド掘進による地山の乱れを考慮した合理的な裏込め注入量の算定方法について

吉田 保<sup>1</sup>・草深守人<sup>2</sup>・高橋良文<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 日本工営株式会社 都市土木部 次長 (〒102 東京都千代田区麹町5-4)

<sup>2</sup>正会員 工博 法政大学教授 工学部土木工学科

<sup>3</sup>正会員 東京都下水道局計画部 課長補佐

本論文は、テールボイド発生により生じる沈下低減のための裏込め注入の効果に関して、実シールド工事現場での調査結果をもとに検討を加えたものである。その結果、シールド掘進によるセグメント外周の乱れ状況、裏込め注入状態について明らかにした。そして地盤の種類、強度に応じた乱れ状況を考慮した合理的な裏込め注入量の算定方法を提案した。

**Key Words:** shield tunnel, backfill grouting, disturbance, settlement, site investigation

## 1. まえがき

テールボイドは、シールド内でセグメントリングを組み立てジャッキにてシールド外に押し出す過程で生じる幾何学的空隙で、本工法における不可避的な沈下発生の原因である。シールド機種の改良、掘進制御技術の開発が進みシールド切羽における崩壊や沈下現象についてはほとんど防止可能となった現在、テールボイド発生による沈下は地盤変状防止上、残された最重要課題の一つと言える。

裏込め注入は、このテールボイドに即座に注入材を充填し、応力解放によって生じる沈下を低減することを目的に行われている。しかし、種々の注入材、注入方式の改良などセグメント外周にすみやかに注入材を注入するための工夫はなされているにもかかわらず、裏込めの沈下防止効果については未解明な点が多い。すなわち、注入が充分なされた場合でも、それが沈下防止上どの程度効果があったかが不明であったり、軟弱な粘性土地盤などで定量注入した際、注入圧が過大となり、地盤を乱しかえって沈下量が増大した結果も報告されている<sup>1)</sup>。

筆者らは、これらの不明瞭や矛盾の根本的な原因是、裏込めを注入すべき空隙の設定方法に地盤の種類や強度の要素が考慮されていないためと考えている。現在、裏込め注入量の設定は、図-1(a)に示すように設計テールボイド量を基準に求めている。しかし、テールボイド発生時の地山状態は、シールド通過までの掘進状況を反映したものであり、地盤の自立性や乱れやすさによって異なるはずである。そして、沈下防止の観点からは、図

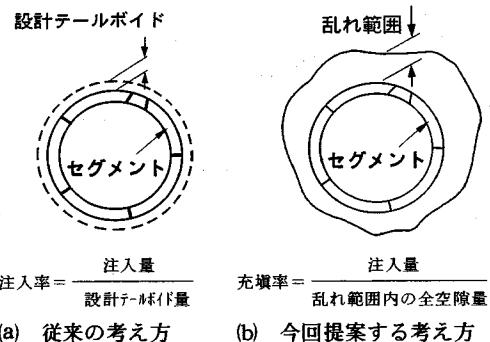


図-1 裏込め注入量算定の考え方

-1(b)に示すようにテールボイド発生時に生じている乱れ範囲内の土粒子間隙も含めた全空隙量を対象に注入量を設定する(以下充填率と呼ぶ)のが合理的であり、適切であると考えられる。

本論文は、地盤や施工条件の異なるシールド工事現場で実施した、テールボイド発生時のセグメント外周の乱れ状況、裏込め注入状態の計測データをもとに、合理的な裏込め注入量の算定方法について検討した結果を提案するものである。

## 2. 従来の研究

裏込め注入の沈下防止効果については古くから報告例が多いが、注入材料の開発<sup>2)</sup>、注入方式の改良<sup>3)</sup>に関するものが多く、注入量と沈下量の関係について研究的に

取り扱った事例は意外と少ない。古くから研究的に行われているのは、軟弱粘性土地盤を対象としたもので、その理由は、軟弱粘性土の場合テールボイドの閉塞が早く、注入効果が充分期待出来ない場合が多いためであろう。

森、赤木<sup>1),4)</sup>らは、沖積粘性土を対象に、裏込め注入時期、注入量と地盤変位の関係について解析的に検討している。その結果、注入時期が遅れると応力解放が進行し沈下量が大きくなること、テールボイド量以上に注入すると即時的に地盤隆起するが、乱れによる圧密沈下が発生し、最終沈下量がかえって大きくなることを指摘している。さらに森<sup>5),6)</sup>らは、粘性土地盤の割裂現象について室内実験を行い、割裂圧は、地盤の一軸圧縮強度、土被り厚、シールド径及び注入材の粘性によって異なるとし、実験式を導いている。また、吉沢ら<sup>7)</sup>は、同種の地盤で現場計測と室内実験を行い、沈下防止上、注入圧力を地盤圧程度に維持することが重要であるとしている。これらの成果は、沖積粘性土地盤を対象にしたシールド工事の施工管理時の限界注入圧の設定、圧力制御上は非常に有効であるが、事前に注入量を算定する際に利用することは難しい。

軟弱粘性土以外の研究例として、小山<sup>8)</sup>らの研究が挙げられる。小山<sup>8)</sup>らは、砂質土の密度、注入材料の種類を変えて、注入状態の室内比較実験を行っている。その結果、密地盤と緩地盤では注入状態に差があり、密地盤は良好な注入が可能であるが、緩地盤は注入時期が遅い、あるいは注入圧が過大になると、均等注入が難しいことを確めている。しかし、実現場との注入状態の比較はなされていない。また、野口<sup>9)</sup>は、砂質地盤を対象にした実シールド工事現場で、注入率を3通り変化させ地盤沈下量との関係を比較している。そして、注入率の増大が沈下低減に効果があることを解析結果からも裏付けている。これらの結果は貴重なデータであるが、ある限られた現場条件下での報告例である。

以上述べた研究は、いずれも裏込め注入の沈下防止効果を考える上で非常に重要な知見と示唆をあたえるものであるが、現場での検証がなされていないか、あるいは現場計測がなされている場合でも、裏込め注入前の地山状態が未確認のため、注入率の評価が難しい。

筆者らは、裏込め注入の沈下低減効果を適正に評価するには、このテールボイド発生直後の地山状態を把握することが重要と考え、沖積、洪積地盤を対象に、セグメント外周の乱れ状況測定を行った。同時に、同一地点で裏込め注入状態の調査も行った。これらの計測データのいくつかは既に論文報告されている<sup>10)~22)</sup>。本論文は、これらのデータも含めて集大成し再整理することにより、新たに地盤に応じた合理的な裏込め注入量の算定方法について検討を加えたものである。

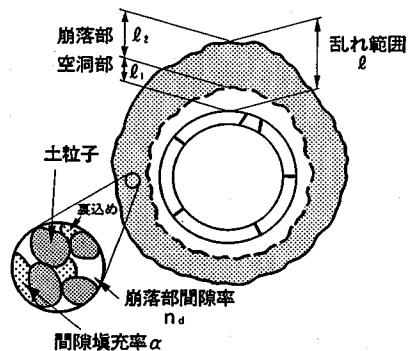


図-2 セグメント外周地山状態模式図

### 3. 亂れ状況を考慮した裏込め注入量の算定方法

セグメントリングがシールドテールを脱出した時のセグメント外周の地山状態を模式的に表わすと図-2に示す通りと考えられる。セグメント外周には、シールド掘進時の余掘りや蛇行、あるいはシールドスキンプレートと地山との摩擦などにより自然地山状態より強度低下した領域が存在すると想定される。この領域のセグメント外周面からの離隔を乱れ範囲  $l$  と定義する。そして、この領域内は、次節で述べるように、テールボイドや余掘りにより生じた空隙が残存する部分と、それ以外の強度低下した部分の2つの領域に分かれる。前者を空洞部と定義し、その長さを空洞部長  $l_1$  とする。後者を崩落部と定義し、その長さを崩落部長  $l_2$  と定義する。次に崩落部の間隙率に着目すると、空洞部が存在する場合は、間隙率の変化は少ないと考えられるが、テールボイドが瞬時に閉塞し空洞部が残存しない場合は、乱れ範囲内が疎になり、間隙率が初期値  $n_i$  から変化すると考えられる。この時の間隙率を崩落部間隙率  $n_d$  と定義する。また崩落部内の間隙に対する裏込め材の注入量の比率を間隙填充率<sup>\*注1)</sup>  $\alpha$  と定義する。

当然のことながら、乱れ範囲  $l$ 、空洞部長  $l_1$ 、崩落部間隙率  $n_d$ 、間隙填充率  $\alpha$  は地盤の種類や強度によって左右される。そして、地盤に応じた  $l$ 、 $l_1$ 、 $n_d$ 、 $\alpha$  の値を設定することができれば、シールド径、テールボイド（またはセグメント外径）は既知なので、次式により、乱れ状況を考慮した合理的な裏込め注入量の算定が可能となる<sup>23)</sup>。次節において、現場の計測データをもとに、地盤の種類や強度によって、これらの値をどのように設定すべきか検討結果を述べる。

\*注1) ここで述べる間隙填充率  $\alpha$  は、崩落部の間隙に対する注入される裏込めの量を示し、前述した充填率（テールボイドの残存した空洞部も含めた全空隙量に対する裏込め量の比率）とは異なる。

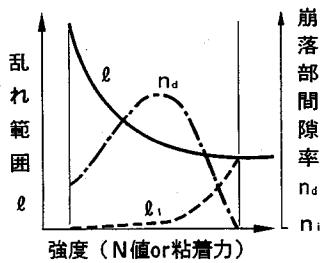


図-3 地盤強度と  $l$ ,  $l_1$ ,  $n_d$  の変化

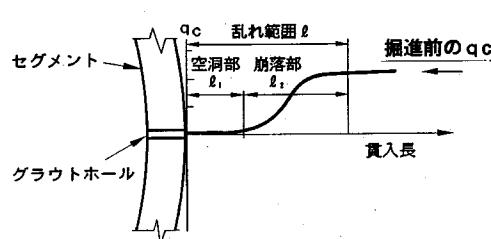


図-4  $q_c$  値による乱れ範囲の定義



写真-1 コーン貫入試験による乱れ状況調査

表-1 現場条件、裏込め施工状況と調査結果

地盤 種類	調査工事 No.	現場条件				裏込め施工状況				セグメント外周乱れ状況						裏込め注入状況		灌下量S(m) + 後続沈下 (m)	$s/t$ (%)	合理的 注入量 (m <sup>3</sup> ) (%)				
		J-標準 D(s)(m)	D(s)(m)	t(cm)	実注入率 n <sub>d</sub> (%)		裏込め材 (kg/m <sup>3</sup> )	注入圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	注入時期 (年)	$\ell$ (cm)	$\ell_1$ (cm)	$\ell/D$	巣 隙 率 $n_d$ (%)	巣 隙 率 $n_d$ (%)	巣 隙 率 $n_d$ (%)	コアーア シ ル 充 填 率 $R_c$ (%)								
					注入率 n <sub>d</sub> (%)	注入量 (m <sup>3</sup> )																		
砂質 質 土	1-1	5.24	5.10	7.0	—	0.49	普通 64.6	181	1.49	1~2.5 90分後	11 21 25	0 18 0	11 21 25	2.0 1.9 4.8	0 0 0	0 0 0	0.68	39	7 専用注入 (注入初期 のみ)	6.6	94	3.10	48	
	1-2	5.24	5.10	7.0	—	0.49	普通 64.6	181	1.49	1~2.5 90分後	21 25	0 18 0	21 25	4.0 4.8	0 0	0 0	—	—	—	—	—	—	—	
	1-3	5.24	5.10	7.0	—	0.49	普通 64.6	181	1.49	1~2.5 90分後	21 25	0 18 0	21 25	4.0 4.8	0 0	0 0	—	—	—	—	—	—	—	
	1-4	5.24	5.10	7.0	—	0.49	普通 64.6	181	1.49	1~2.5 90分後	21 25	0 18 0	21 25	4.0 4.8	0 0	0 0	—	—	—	—	—	—	—	
	2-1	4.69	4.55	7.0	—	0.48	普通 64.6	170	1.73	5	数え ソーニング 40	36 36 40	0 1 5	25 39 40	7.7 8.3 8.5	0 0.7 0	0.2	0.51	19	17 専用注入 (注入初期 のみ)	3.0	43	2.87	60
	2-2	4.69	4.55	7.0	—	0.48	普通 64.6	170	1.73	5	数え ソーニング 40	36 36 40	0 1 5	25 39 40	7.7 8.3 8.5	0 0.7 0	0.2	0.51	19	17 専用注入 (注入初期 のみ)	3.0	43	2.87	60
	2-3	4.69	4.55	7.0	—	0.48	普通 64.6	170	1.73	5	数え ソーニング 40	36 36 40	0 1 5	25 39 40	7.7 8.3 8.5	0 0.7 0	0.2	0.51	19	17 専用注入 (注入初期 のみ)	3.0	43	2.87	60
	2-4	4.69	4.55	7.0	—	0.48	普通 64.6	170	1.73	5	数え ソーニング 40	36 36 40	0 1 5	25 39 40	7.7 8.3 8.5	0 0.7 0	0.2	0.51	19	17 専用注入 (注入初期 のみ)	3.0	43	2.87	60
	3-1	4.422	4.30	6.1	33	27	—	0.44	普通 64.6	128	1.07	2~3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	3-2	4.422	4.30	6.1	33	27	—	0.44	普通 64.6	128	1.07	2~3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	3-3	4.422	4.30	6.1	33	27	—	0.44	普通 64.6	128	1.07	2~3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
堆積 質 土	4-1	3.97	3.85	6.0	22	17	—	0.55	普通 64.6	160	1.18	0.5~3.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	4-2	3.97	3.85	6.0	22	17	—	0.55	普通 64.6	160	1.18	0.5~3.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5-1	4.95	4.80	7.5	31	24	—	0.50	普通 64.6	120	1.88	2~3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5-2	4.95	4.80	7.5	31	24	—	0.50	普通 64.6	120	1.88	2~3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	6-1	3.95	3.80	7.5	25	—	0.45	普通 64.6	202	1.84	2~3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	7-1	3.75	3.60	7.5	48	49	—	0.48	普通 64.6	120	1.04	1~3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	7-2	3.75	3.60	7.5	48	49	—	0.48	普通 64.6	120	1.04	1~3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	8-1	3.75	3.60	7.5	48	—	0.48	普通 64.6	160	1.39	2~3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	9-1	8.21	8.05	8.0	50	—	0.51	普通 64.6	104	2.13	2~3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	9-2	8.21	8.05	8.0	50	—	0.51	普通 64.6	89	1.63	2~3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
堆積 質 土	10-1	5.54	5.40	7.0	35	—	0.51	普通 64.6	96	1.15	2~3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	11-1	8.48	8.30	9.0	0	0	3.4	0.62	普通 64.6	143	3.40	2~3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	11-2	8.48	8.30	9.0	0	0	3.4	0.62	普通 64.6	143	3.40	2~3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	11-3	8.48	8.30	9.0	0	0	3.4	0.62	普通 64.6	143	3.40	2~3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	12-1	3.70	3.60	6.0	2	2	4.3	0.61	普通 64.6	196	0.61	3~5.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	12-2	3.70	3.60	6.0	2	2	4.3	0.61	普通 64.6	196	0.61	3~5.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	12-3	3.70	3.60	6.0	2	2	4.3	0.61	普通 64.6	196	0.61	3~5.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	13-1	3.70	3.60	5.0	2	4.3	0.61	普通 64.6	102	0.59	2~5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	14-1	3.70	3.60	5.0	2	2	4.3	0.61	普通 64.6	125	0.73	3~5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	14-2	3.70	3.60	5.0	2	2	4.3	0.61	普通 64.6	125	0.73	3~5.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
洪積 質 土	15-1	5.18	5.04	7.0	1	2.5	0.64	普通 64.6	120	1.35	2~3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	16-1	4.42	4.27	7.5	1	5.5	0.66	普通 64.6	120	1.23	2~3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	17-1	7.00	6.85	7.5	1	2.5	0.66	普通 64.6	120	1.96	2~3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	18-1	3.28	3.15	5.3	4	5.5	0.65	普通 64.6	120	0.64	2~3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	19-1	6.75	6.60	7.5	0	4.1	0.69	普通 64.6	120	1.89	4~5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
複合 地盤	20-1	5.84	5.70	7.0	11	8.0	0.52	普通 64.6	160	2.03	3~4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	21-1	8.21	8.05	8.0	18	8.5	0.54	普通 64.6	116	2.37	2~3.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

$$\begin{aligned} \text{合理的注入量} &= \pi \left[ n_d \cdot \frac{\alpha}{100} \cdot l^2 + n_d \cdot \frac{\alpha}{100} \cdot (D - 2t) \cdot l \right] \\ &+ \left( 1 - n_d \cdot \frac{\alpha}{100} \right) l_1^2 + \left( 1 - n_d \cdot \frac{\alpha}{100} \right) (D - 2t) \cdot l_1 \end{aligned} \quad (1)$$

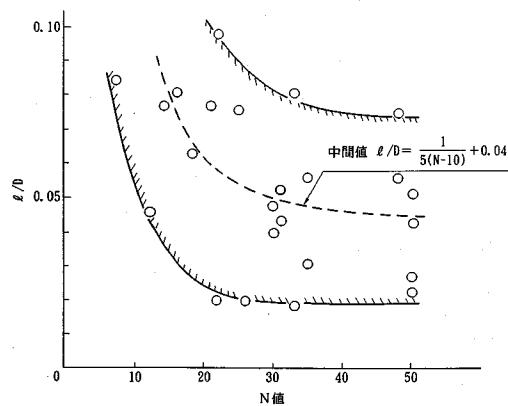
$D$ : シールド径       $l_1$ : 空洞部長  
 $t$ : テールボイド       $n_d$ : 崩落部間隙率  
 $l$ : 亂れ範囲       $\alpha$  (%): 間隙填充率

#### 4. セグメント外周の乱れ状況

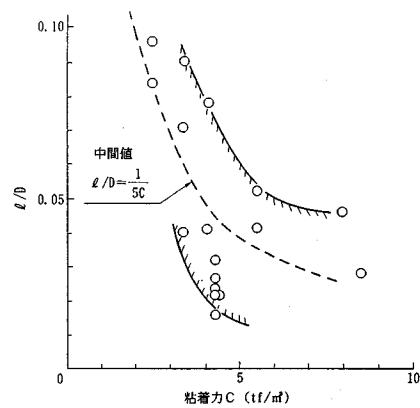
地盤強度と、 $l$ ,  $l_1$ ,  $n_d$  の関係は、定性的に図-3 に示す通りと考えられる。強度が小さい場合は、地山の自立

性が小さいので、空洞部は存在せず乱れ範囲が大きくなる。一方、強度が大きい場合は、地山の保持能力が大きく、乱れ範囲は空洞部と同等となる。間隙率の変化が著しいのは、空洞部も崩落部も存在する中間的強度の場合である。以下、地盤強度によって、これらの値がどのように変化するか、実測データをもとに分析する。

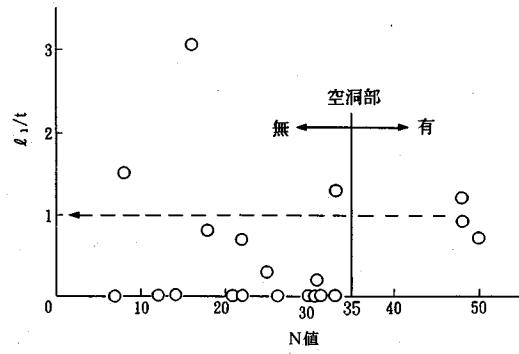
シールド掘進に伴う外周地山の乱れ状況は、写真-1 に示す要領<sup>24)</sup>で、セグメントリンググラウトホール位置がシールドテールを脱出した直後に、グラウトホールよりコーン貫入試験を実施し調査した。セグメント外周面からシールド半径方向に測った地山の乱れ範囲の深さは、図-4 に示すように、コーン指数  $q_c$  が掘進前と同



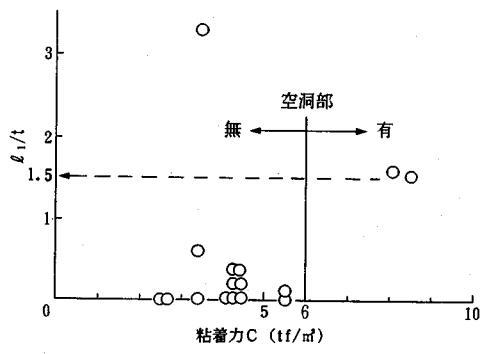
(a) 砂質土



(b) 粘性土

図-5 地盤強度と  $I/D$ 

(a) 砂質土



(b) 粘性土

図-6 地盤強度と  $l/t$ 

等の値になるまでの深さとした。調査は 21 工事 40 地点で実施した。これらの地点の現場条件、裏込め施工状況とセグメント外周の乱れ状況調査結果をまとめて表-1 に示す。

これより、乱れ範囲  $l$  はシールド径  $D$  の 1~10% であるが、地盤の種類や強度によって異なることがわかる。特に、沖積地盤と洪積地盤とでは、乱れ状況に明らかに差があり、洪積地盤の場合は、セグメント外周面からあるところまで  $q_c = 0$  の範囲があることが確認された。これは、テールボイドや余掘りによる空隙が残存している空洞部と考えられる。沖積地盤の場合は、ほとんどの調査工事が  $q_c$  値が掘進前の  $q_c$  値よりも低下している崩落部のみで、空洞部は確認されなかった。これらの差は、両者の地山の自立性の相違によるものと考えられる。

### (1) 乱れ範囲 $l$

表-1 より、砂質土、粘性土別に  $N$  値および粘着力  $C$  と  $l/D$  の関係を整理すると図-5 に示すとおりであ

る。図よりばらつきは大きいが、地盤強度が増すと  $l/D$  が減少する傾向が読みとれる。これらのはらつきは、主にシールド掘進時の施工の良否を反映していると推察される。それぞれの中間値を双曲線で近似すると、次式が得られる。図 (a) より、砂質土の場合、 $N$  値が約 30 以上になると、 $l/D$  は 4~5% 程度でほぼ一定になる。また図 (b) より、粘性土の場合、粘着力  $C$  が約 5  $\text{tf}/\text{m}^2$  以上になると  $l/D$  は 2~3% でほぼ一定に近づく傾向が見られる。

$$\left. \begin{aligned} l/D &= \frac{1}{5(N-10)} + 0.04 \quad (\text{砂質土の場合}) \\ l/D &= \frac{1}{5C} \quad (\text{粘性土の場合}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、  $D$  : シールド径

$l$  : 乱れ範囲

$C(\text{tf}/\text{m}^2)$  : 粘着力

$N$  :  $N$  値 ( $N > 10$ )

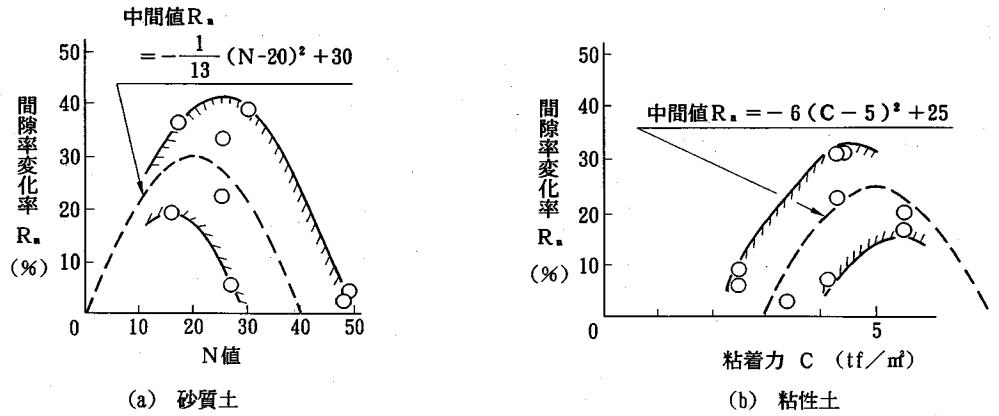


図-7 地盤強度と間隙率変化率  $R_n$

## (2) 空洞部長 $l_1$

同様に、表-1より、砂質土、粘性土別に、地盤強度と空洞部長との関係を求めるとき図-6に示すとおりである。この場合、空洞部の大きさは、崩壊や著しい余掘りがある場合を除いて、主にテールボイドにより発生する空洞の残存と解釈できるので、テールボイド長  $t$  に対する空洞部長  $l_1$  の比率で表現するものとした。図より、砂質土の場合  $N$  値が約 35 以上、粘性土の場合粘着力  $C$  が約 6  $\text{tf}/\text{m}^2$  以上になると空洞が残存している可能性が高いが、それ以下ではシールド掘進状況に左右され、空洞がある場合とない場合があるようである。従って、事前調査等により空洞部の確認がなされていない段階では、上述の値を目安に空洞部の有無を判断するのが適当と考える。空洞部がある場合の空洞部長  $l_1$  としては図より、砂の場合テールボイドの 1.0 倍、粘性土の場合 1.5 倍程度見込むのが適当と考える。

## (3) 崩落部間隙率 $n_d$

テールボイドにより生じた空隙が収縮することにより、その分の空隙量が乱れ範囲内の崩落部分に均等に分配されたと仮定すると、崩落部間隙率  $n_d$  は次式により求めることができる。

$$n_d = \frac{n_i + \frac{\Delta V}{V}}{1 + \frac{\Delta V}{V}}$$

ただし

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{t^2 - l_1^2 + D_s(t-l_1)}{l^2 - t^2 + D_s(l-t)} \quad (3)$$

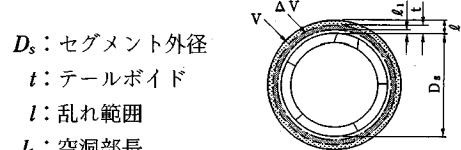
ここに

$n_i$ ：自然状態の土粒子間隙率

$n_d$ ：崩落部の土粒子間隙率

$V$ ：テールボイド発生時崩落部体積

$\Delta V$ ：テールボイドの発生による空隙発生量



次に、 $n_d$  と  $n_i$  より間隙率の変化率  $R_n$  は次式のように定義される。

$$R_n = \frac{n_d - n_i}{n_i} \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

ここに  $R_n$  (%) : 間隙率変化率

$n_i$  : 自然状態の土粒子間隙率

$n_d$  : 崩落部の土粒子間隙率

表-1より、 $n_d$ 、 $R_n$  を求めると、地盤強度との関係は、図-7に示すとおりである。ただし、空洞部長がテールボイドよりも大きかった洪積地盤の場合は、地山は自立しており、崩落部の間隙率の変化はほとんどないと推察される。

まず、砂質土について述べると、図(a)より  $N$  値が 20~30 以上の領域では  $N$  値が大きいほど  $R_n$  が小さくなる傾向が見られる。しかし、 $N$  値がそれ以下では逆に  $N$  値が小さくなると、 $R_n$  が小さくなる傾向が読み取れる。これは、図-5に示したように前者の領域では、乱れ範囲がほぼ一定なのに対し、後者の領域では  $N$  値が小さいと乱れ範囲が大きくなるためである。すなわち地盤強度が弱い領域では、崩落部が広範囲に及ぶため、間隙率の変化は少ないといえる。中間値を二次曲線(放物線)で近似すると次式が得られる。これより、 $N$  値 40 以上の地盤は、ほとんど間隙率の変化はないと言えよう。

$$R_n = -\frac{1}{13}(N-20)^2 + 30 \quad (N < 40) \quad (5)$$

ここに  $R_n$  (%) : 間隙率変化率

$N$  :  $N$  値

次に図(b)粘性土の場合を見ると、砂質土と同様に、

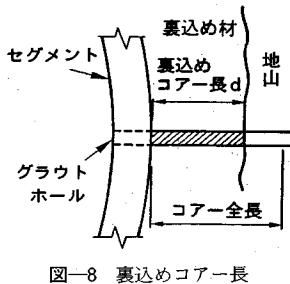


図-8 裏込めコアー長

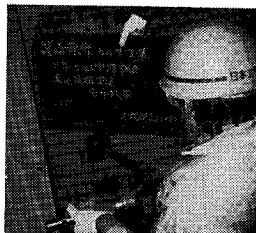


写真-2 裏込めコアー採取

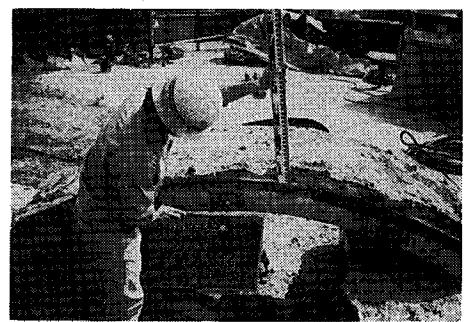


写真-3 セグメントリング外周の裏込めの注入状況  
(均一な場合)

乱れ範囲がほぼ一定となる  $C$  が  $5 \text{ tf/m}^2$  以上の領域では、 $C$  の増加とともに  $R_n$  は減少するのに対し、 $C$  の低下とともに乱れ範囲が増大する  $C$  が  $5 \text{ ft/m}^2$  以下の領域では、 $C$  の低下とともに  $R_n$  も減少する傾向が見られる。中間値を二次曲線（放物線）で近似すると次式が得られる。これより、粘着力  $C$  が  $3 \text{ tf/m}^2$  以下、 $7 \text{ tf/m}^2$  以上では、間隙率の変化はほとんどないと推察される。

$$R_n = -6(C-5)^2 + 25 \quad (3 \leq C \leq 7) \quad (6)$$

ここに  $R_n$  (%): 間隙率変化率

$C$  ( $\text{tf/m}^2$ ): 粘着力

以上の検討結果より、崩落部  $n_d$  は式 (5), (6) により求めた  $R_n$  を用いて、次式により算定することができる。

$$n_d = n_i \left( 1 + \frac{R_n}{100} \right) \quad (7)$$

ここに  $n_i$ : 自然状態の土粒子間隙率

$n_d$ : 崩落部の土粒子間隙率

$R_n$  (%): 間隙率変化率

## 5. 裏込めの注入状態と間隙填充率 $\alpha$

裏込め注入状態は、裏込め注入後充分時間が経過し、裏込め材が固結した時点で、図-8, 写真-2 に示す要領でグラウトホールよりコアーサンプリングを行い調査した。

コアーサンプリング結果より、裏込め注入状態は、特に沖積地盤の場合森<sup>11</sup>らも指摘しているように注入時期によって大きく異なることがわかった。セグメントがテール脱出直後に注入を行った工事の場合は、セグメントリングのどのグラウトホールからも裏込め材が確認された。これは、写真-3<sup>25</sup>に示す沖積地盤を対象にした同種の工事で、シールド施工後地表面からトンネル位置まで試掘を行い確認された状況写真が示すように、セグメント外周にはほぼ均等に裏込めが注入されていることを

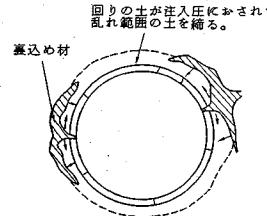


図-9 裏込め注入状態  
(セグメント外周に回っていない場合)

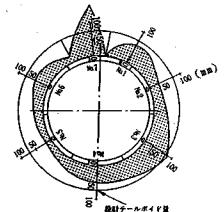
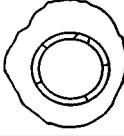
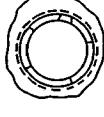


図-10 裏込め注入状態  
(不均一な場合)

裏付けるものである。一方、テール脱出後 50 分以上遅れて裏込めがなされた、No. 1, 2, 3, 11 工事の場合は、注入実施孔で裏込めが確認されたものの、それ以外のグラウトホールでは、裏込めは確認されなかった。これらの調査工事の注入率が 128~170% と多いにもかかわらず、裏込めコアーが確認されなかった原因として、裏込めの注入状態が模式的に図-9 に示す注入形状であったことが考えられる。即ち、小山<sup>8</sup>らの室内実験でも確認されているように、注入時期が遅いと地山の崩落が進み、セグメント外周部分が閉塞され、裏込めがその部分に回ることができなかったものと推察される。これらの結果は、裏込めをセグメント外周に均等に注入する上で、テール脱出後、注入開始までの時間をいかにして短縮するかが非常に重要であることを示すものである。また、沖積粘性土地盤を対象にした工事で、セグメント外周に裏込めが回っていることは確認できたが、裏込め注入厚さが著しく不均一であった No. 19 工事の注入状況を図-10 に示す。本工事の注入率は 120% であったにもかかわらず、平均注入厚さはテールボイド (7.5 cm) 以下でグラウトホールの位置による注入厚さの差も大きかった。これは、地盤が鋭敏性の高い(自然含水比  $w_n = 60 \sim 100\%$  で液性限界  $w_L = 55 \sim 70\%$  よりも大きい) 粘性土であることから、注入圧力が  $4 \sim 5 \text{ kgf/cm}^2$  と比較的大きかつたため、注入孔付近で地山を著しく乱したことが原因と考えられる。

表-2 地盤の種類、強度別の  $l$ ,  $l_1$ ,  $n_d$  の算定式

地盤の分類	非自立性地盤 地盤強度小 $N < 10$ (砂質土) $C < 3$ (粘性土)	半自立性地盤 地盤強度中 $10 \leq N < 40$ (砂質土) $3 \leq C < 7$ (粘性土)	自立性地盤 地盤強度大 $N \geq 40$ (砂質土) $C \geq 7$ (粘性土)
		 $N : N$ 値 $C(\text{tf/m}^2) : \text{粘着力}$	
乱れ範囲 $l$		$\ell = \left\{ \frac{1}{5(N-10)} + 0.04 \right\} D$ (砂質土 $N > 10$ ) $\ell = \frac{1}{5C} \cdot D$ (粘性土)	$N : N$ 値 $C(\text{tf/m}^2) : \text{粘着力}$ $D : \text{シールド径}$
空部洞長 $l_1$	$l_1 = 0$	$0 < l_1 < \begin{cases} 1.0t & (\text{砂質土}) \\ 1.5t & (\text{粘性土}) \end{cases}$ $t : \text{テールボイド長}$	$l_1 = \begin{cases} 1.0t & (\text{砂質土}) \\ 1.5t & (\text{粘性土}) \end{cases}$
崩落部間隙率 $n_d$	$n_d = (1 \sim 1.2)n_i$ $n_i : \text{自然状態の土粒子間隙率}$	$n_d = n_i \left[ 1 + \frac{1}{100} \left\{ -\frac{1}{13}(N-20)^2 + 30 \right\} \right]$ (砂質土) $n_d = n_i \left[ 1 + \frac{1}{100} \left\{ -6(c-5)^2 + 25 \right\} \right]$ (粘性土)	$n_d \approx n_i$

なお、洪積地盤の場合は、いずれの調査工事においても、全てのグラウトホールで裏込めコアーが採取された。注入率が比較的小さい工事でも、裏込めコアーが確認されたのは、前節で述べたように、地山の自立性が高くセグメント外周に空洞部があったため、裏込めが回りやすかったことを示すものである。

次に、調査工事の中からセグメント外周の全てのグラウトホールで裏込め材が確認された調査工事を抽出し、間隙填充率  $\alpha$  の算定を行った。間隙填充率  $\alpha$  は、乱れ範囲の崩落部内への裏込め貫入長を算出し、それが崩落部内の土粒子間隙に均等に分配された場合を想定すると、次式により求めることができる。ただし、裏込めコアー長  $d$  の方が乱れ範囲  $l$  よりも大きいケースは、高圧で乱れ範囲外にも注入がなされた結果であり、好ましい施工とはいえないで除外した。また、空洞部長  $l_1$  と裏込めコアー長がほぼ等しいケースは算定上、誤差が大きいので省いた。

$$\alpha = \frac{d(D_s + d) - l_1(D_s + l_1)}{n_d \{V(D_s + d) - l_1(D_s + l_1)\}} \times 100$$

ここに  $\alpha$  (%): 崩落部間隙填充率

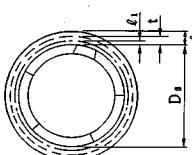
$n_d$ : 崩落部間隙率

$D_s$ : セグメント外径

$d$ : 裏込めコアー長

$l$ : 乱れ範囲

$l_1$ : 空洞部長



算定結果を表-1 中に示す。これより、沖積粘性土の場合は、比較的強度の大きかった No. 18 工事を除

いて間隙填充率  $\alpha$  は 20~30% である。一方、洪積粘性土及び砂質土の場合はいずれも 100% を越えている。注入方法は異なるが同じ注入工法の薬液注入工法の場合は、地盤の種類に対する間隙填充率<sup>26)</sup>を、ゆるい砂質土の場合 75~90%，中位の粘性土の場合 25~30% としており、算定結果は概ね妥当な値といえよう。従って、今回の調査の範囲では、間隙填充率  $\alpha$  の値としては、沖積粘性土の場合 20~30%，洪積粘性土及び砂質土の場合 100% に設定するのが適切と考えられる。これらの結果は、洪積粘性土、砂質土などの自立性の高い地盤の場合は  $\alpha$  を 100% にすることにより、充填率を 100% にすることが可能なのに対し、沖積粘性土などの非自立性地盤の場合は、 $\alpha$  に限界があり、充填率を 100% にすることが難しいことを示すものである。

## 6. 合理的注入量算定方法の提案とその適用性

前節までの検討結果から、シールド掘進による地山の乱れ状況の相違は、地盤の種類と強度にもとづく自立性の差異に起因することが明らかになった。地盤の自立性を非自立性（砂質土の場合  $N < 10$ 、粘性土の場合  $C < 3 \text{ tf/m}^2$ ）、半自立性（砂質土の場合  $10 \leq N < 40$ 、粘性土の場合  $3 \text{ tf/m}^2 \leq C < 7 \text{ tf/m}^2$ ）、自立性（砂質土の場合  $N \geq 40$ 、粘性土の場合  $C \geq 7 \text{ tf/m}^2$ ）の 3 通りに分類し、検討結果を整理すると表-2 に示すとおりである。

調査工事に関して表-2 に示す算定式により、 $l$ ,  $l_1$ ,  $n_d$  を求め、式 (1) により、合理的注入量を求める

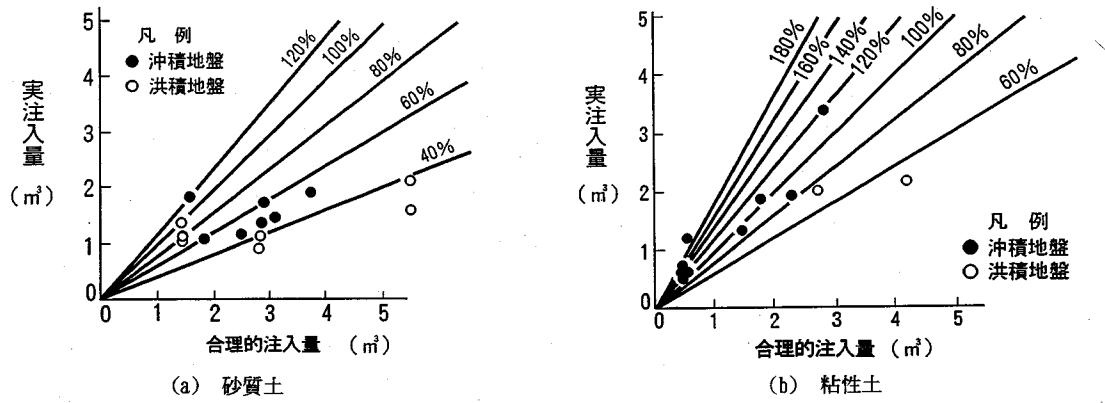


図-11 合理的注入量と実注入量

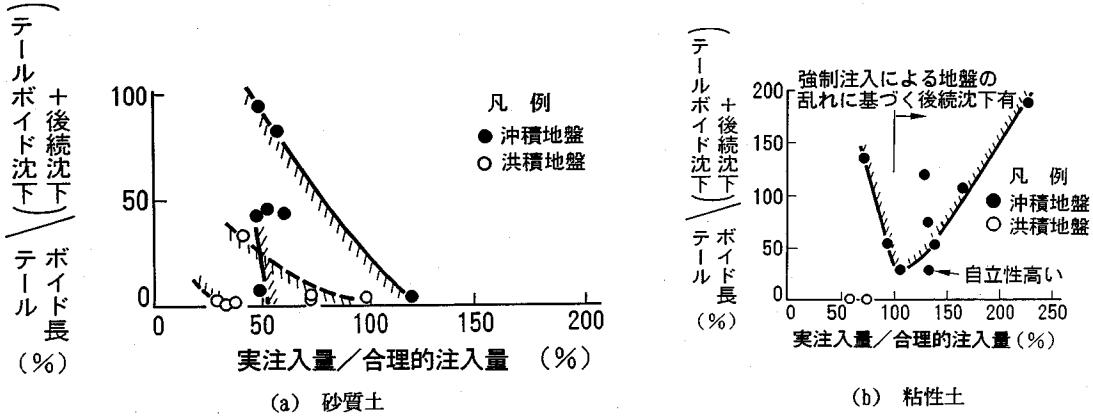


図-12 実注入量／合理的注入量と沈下量

表-1 中に示す通りである。算定の際の間隙填充率は前節の検討結果から、沖積粘性土は 30%，洪積粘性土、砂質土は 100% とした。

合理的注入量と実注入量を比較した結果を図-11 に示す。これより、砂質土の場合は、実注入量が合理的注入量よりも少ないが、粘性土の場合は逆に実注入量が合理的注入量を上回っている傾向がうかがえる。この理由は、従来の注入量算定に、地盤の条件が考慮されていなかったと考えられる。すなわち、砂質土の場合は、地盤の透水性が大きいので、さらに注入量を増加させることができるのであるのに対し、粘性土の場合は、透水係数が小さく間隙填充率  $\alpha$  に限界があるという実態が従来の注入量算定式に反映されていないためと考えられる。

なお、砂質土、粘性土の場合とも、洪積地盤の方が沖積地盤よりも実注入量が少ないので、地山の自立性が高く、空洞がある程度残存していても沈下が進行しないので、それ以上の注入を行っていないためと推察される。

次に、実注入量の合理的注入量に対する比率と沈下量の関係を図-12 に示す。沈下量としては、裏込め注入後のテールボイド沈下、後続沈下<sup>27)</sup>を対象とし、テール

ボイド長で除して無次元化している。これより、沖積の砂質土の場合、前述した様にさらに注入量を増加させることができ、それにより、より沈下量を低減することができたことがわかる。また、沖積粘性土の場合、特徴的なのは、実注入量／合理的注入量が約 100% までは、比率の増加に伴い沈下量は低減するが、比率が 100% を越えると逆に沈下量が増加する傾向があることである。この現象は、森<sup>1)</sup>らも指摘しているように高い注入圧力で必要以上の注入を行ったために、割裂状態で裏込めが注入され、その結果地山を乱し、乱れにもとづく後続沈下が増大したためと考えられる。

以上の結果より今回の提案式を用いれば、地盤の種類と強度に応じた裏込め注入を行うことができ、従来合理的な算定式がなかつたため発生していた注入不足による沈下及び過注入による後続沈下の増大を防止することが可能といえる。

## 7. 結論

実シールド工事現場で行ったセグメント外周の乱れ状

況測定及び裏込め注入状態調査結果をもとに、地盤条件を考慮した合理的な裏込め注入量の算定方法について検討した結果、次の様な結果を得た。

① 従来、裏込め注入量は、設計テールボイド量を基準に算定されていた。しかし、テールボイド発生時の地山状態は、シールドの掘進状況を反映したものであり、地山の自立性や乱れやすさによって異なるはずである。そして、沈下防止の観点からは、乱れ範囲内の土粒子間隙も含めた全空隙量を対象に注入量を算定するのが適切である。このような考え方のもとに地盤の種類、強度に応じた合理的な裏込め注入量の算定式として式(1)が提案される。

② セグメントリングが、シールドテールを脱出した直後のセグメント外周の地山状態は、地盤の種類や強度によって異なる。沖積粘性土のような非自立性地盤の場合は自然状態よりも強度の低下している乱れ範囲 $I$ は大きいが、乱れ範囲内に空洞部は確認されず崩落部のみであった。一方洪積粘性土、砂質土のような自立性地盤の場合は空洞部があることが確認された。また、崩落部間隙率 $n_d$ の変化は、両領域の中間の半自立性地盤の場合大きいことがわかった。地盤の種類と強度に応じた $I$ 、 $n_d$ の算定式として、式(2)及び式(7)が提案される。

なお、空洞部は、粘性土の場合 $C$ が $6 \text{ tf/m}^2$ 以上、砂質土の場合 $N$ 値35以上の地盤に対して適用するものとし、それぞれテールボイドの1.5倍、1.0倍程度見込むのが適当と考える。地盤の自立性に応じたこれらの算定方法をまとめて表-2に示す。

③ 裏込めの注入状態は、地盤条件の他に注入時期によって左右され、注入時期が遅いと特に沖積地盤の場合は、テールボイド発生により生じた空隙が閉塞し、注入量を多くしてもセグメント外周に裏込めを均一に充填することが難しいことが確認された。コアーサンプリング結果をもとに、崩落部間隙填充率 $\alpha$ を求めた結果、今回の調査の範囲では $\alpha$ の値は沖積粘性土の場合20~30%、洪積粘性土及び砂質土の場合100%に設定するのが適切と考えられる。これらの結果は、洪積粘性土、砂質土の場合は充填率を100%にすることが可能であるが、沖積粘性土の場合は、充填率を100%にすることが難しいことを示すものである。

④ 上記の結果をもとに、式(1)により、地盤の種類、強度に応じた合理的注入量を算定し、実注入量との比較を行った。その結果、砂質土の場合は、実注入量が合理的注入量よりも少なく、逆に粘性土の場合は実注入量の方が多いという結果が得られた。この原因是、砂質土は透水性が大きく崩落部間隙率 $\alpha$ を上げることが可能なに対し、粘性土は透水性が小さく $\alpha$ に限界があるという地盤の特性が従来の算定式に反映されていないためである。また、実注入量と合理的注入量の比率と沈

下量の関係を分析した結果、砂質土は、注入量が増大すると沈下量が低減するが、粘性土の場合は最適な注入量があり、それを越えて注入すると裏込めが地山内に割裂状態で注入され、かえって地盤を乱し沈下量が増大することが確認された。

## 8. あとがき

現在から近未来にかけて、都市基幹施設整備のためシールド工法により多くの都市トンネルが構築されることが予想される。その際、避けて通ることができないのが既設構造物との近接施工であり、これから地下の輻輳化、シールドの大断面化などが進み、また要求される管理基準の精度もあがり、従来にも増して厳しい施工環境になることが予想される。従って、今後とも既設構造物防護のため、地盤変状を最小限に抑えることは、工事を円滑に進める上での重要なキーポイントであり、裏込め注入が、沈下の大半をしめるテールボイド沈下を低減させるため、最有力工法であることは間違いないと考えられる。本論文は、実シールド工事現場での調査結果をもとに、合理的な裏込め注入量の算定方法について検討した結果を述べたものであるが、成果が実際のシールド工事にフィードバックされればこの上ない喜びである。

最後に現場での計測調査に御協力いただいた関係各位に紙面を借りて深く感謝する次第である。

## 参考文献

- 1) たとえば、森麟ほか：軟弱粘性土地盤の最適裏込め注入量、トンネルと地下、第15巻12号、pp.51-56、1984年12月。
- 2) たとえば、三木五三郎、下田一雄：シールドトンネル裏込め注入の問題点と今後の動向、第6回トンネル技術シンポジウム、pp.1-8、1984年9月。
- 3) たとえば、平田武弘：軟弱地盤における同時裏込め注入、第6回トンネル技術シンポジウム、pp.9-17、1984年9月。
- 4) 森麟、赤木寛一：軟弱粘性土地盤のシールド工事における裏込め注入量と沈下防止効果の関係、第29回土質工学シンポジウム、pp.35-40、1984年11月。
- 5) 森麟ほか：シールド工事における粘性土地盤の割裂現象（その2）、第25回土質工学研究発表会、pp.1773-1774、1990年6月。
- 6) 森麟ほか：シールドトンネルの裏込め注入圧および切羽泥水圧による粘性土地盤の割裂現象、トンネルと地下、第22巻1号、pp.41-46、1991年1月。
- 7) 吉沢慶蔵ほか：軟弱粘性土地盤での裏込め注入効果と地盤沈下挙動の実験的考察、第29回土質工学シンポジウム、pp.41-48、1984年11月。
- 8) 小山幸則ほか：シールドトンネルの裏込め注入実験、第3回トンネル工学研究発表会、pp.245-250、1993年11月。
- 9) 野口利雄、山本征彦：裏込め注入量を変化させたシールドトンネルの地表面沈下の実測と評価、第21回土木学会年次学術講演会、pp.831-832、1986年11月。

- 10) 間片博之：下水道シールド工事における地盤沈下対策(その3)，下水道協会誌，Vol.17，No.193，pp.20-34，1980年6月。
- 11) 吉田保ほか：シールド機種と掘削に伴う沈下挙動について，第16回土質工学研究発表会，pp.1545-1548，第16回土質工学研究発表会，1981年6月。
- 12) 橋本定雄：上下隣接シールドの施工と追跡調査(1)，トンネルと地下，第13巻5号，pp.7-14，1982年5月。
- 13) 峯尾正臣：軟弱地盤における地盤沈下防止の試験工事，トンネルと地下，第14巻4号，pp.31-40，1983年4月。
- 14) 山田孝治，吉田保：裏込め注入工法の地盤沈下低減効果に関する現場調査結果，第29回土質工学シンポジウム，pp.49-52，1984年11月。
- 15) 橋本定雄：軟弱地盤における上下隣接シールド施工の実態と計測結果について，土木学会論文集，第352号，pp.1-22，1984年12月。
- 16) 松崎茂樹：重要構造物の直近をシールドで貫く，トンネルと地下，第16巻6号，pp.45-51，1985年6月。
- 17) 松崎茂樹：大断面泥土圧シールドの施工と計測結果，トンネルと地下，第17巻3号，pp.25-35，1986年3月。
- 18) 吉田保ほか：洪積地盤における泥土圧シールドの施工と計測結果その2，第21回土質工学研究発表会，pp.1723-1724，1986年6月。
- 19) 濱田光久：大断面泥土圧シールドの急曲線施工，トンネルと地下，第18巻2号，pp.17-26，1987年2月。
- 20) 吉田保ほか：洪積地盤における泥土圧シールドによる曲線施工と計測結果，第22回土質工学研究発表会，pp.1645-1646，1987年6月。
- 21) 平出亨，真木逸美：泥土圧シールドで急曲線を掘る，トンネルと地下，第18巻9号，pp.7-15，1987年9月。
- 22) 吉田保ほか：沖積地盤における泥土圧シールドの施工と計測結果，第24回土質工学研究発表会，pp.1723-1724，1989年6月。
- 23) 吉田保：シールド掘進に伴う地盤及び構造物挙動と近接施工に関する研究，学位論文，1994年3月。
- 24) 吉田保：シールドトンネルの新技術(2)，トンネルと地下，第21巻7号，pp.63-69，1990年7月。
- 25) 東京都下水道局：江戸川幹線その3工事裏込め注入材分布調査報告書，1982年7月。
- 26) 土質工学会：地盤改良の調査設計から施工まで，1978年3月。
- 27) 吉田保ほか：沖積地盤におけるシールド掘進に伴う地盤変状とその予測解析について，土木学会論文集，第373号，pp.103-112，1986年9月。

(1994.6.3受付)

## COMPUTATIONAL EXPRESSION FOR THE RATIONAL AMOUNT OF BACKFILL GROUT CONSIDERING THE DISTURBANCE INDUCED BY SHIELD ADVANCING

Tamotsu YOSHIDA, Morito KUSABUKA and Yoshifumi TAKAHASHI

The authors investigated the disturbance and backfilling in the area surrounding a segment through grout holes at 40 sites. The analytical results of the measured data show that the disturbed area consists of a cavity in which the tail void remains, and a collapsed region caused by over excavation and meandering. In addition, a computational expression for rational amount of backfill grouting according to ground type and strength considering the magnitude of the disturbance is proposed.