

リングシールド工法の開発

Development of Ring Shield Tunneling Method

技術本部 大川 賢 紀^{*1} 兵 頭 和 也^{*2}
大 石 善 啓^{*3}
神戸造船所 熊 尾 義 光^{*4}

リングシールド工法は大断面トンネルを対象として、任意断面形状の掘削、工期短縮、掘削産廃土低減等を特徴とする新しいシールドトンネル工法であり、シールド機の事業拡大をねらったものである。本工法は、外殻部のみを先行掘削し、マシン内部に地山を抱えたまま掘削する従来にない新しいトンネル掘削機を用いるため、マシンの装備能力並びにリング掘削時の健全性を事前に検証しておく必要がある。そこで、本研究では、掘削実験、X線可視化実験、旋回性能予測解析により掘削性能、姿勢制御性、切羽安定性を検討し、従来の円形全断面シールドをりょうがする性能を有することを確認した。

Ring shield tunneling is a totally new approach to large-scale and noncircular cross section tunneling featuring faster construction speed and less industrial waste muck. The ring shield machine differs from the circular face shield in that. The tunneling machine excavates the ground in a ring with the soil inside. In a study of this machine's excavation, we conducted a model excavation test, an X ray radiography test to visualize the soil around the cutting face, and an analysis of machine steering moment. We found that ring shield tunneling provided good operating performance, steering control, and cutting face stability.

1. ま え が き

近年、都市の過密化により、鉄道、道路、河川などの大型施設を地下に設置する必要性が増大しており、トンネルの用途によってはその断面が相当大きくなるため、低コストの大断面シールドトンネル工法の開発が望まれている。

リングシールド工法は、任意断面形状の掘削、工期短縮、掘削産廃土低減等を特徴とする新しいシールドトンネル工法として提案され⁽¹⁾、大断面になるほどコストメリットの出る有利な工法である。本工法は、外殻部のみを先行掘削し、機体内部に地山を抱えたまま掘削する従来にない新しいトンネル掘削機を用いるため、その装備能力並びにリング掘削時の健全性を事前に検証しておく必要がある。そこで、本研究では、縮尺比1/10のシールド模型を用いた掘削実験により全断面円形シールドに対する掘削性能、姿勢制御性、切羽安定性を確認した。さらに、切羽の安定性については、X線ラジオグラフィ法にて可視化実験を行った。また、シールド機の旋回性能については、周辺地盤の変形挙動を考慮した新しい評価法により、円形シールドの施工実績データと比較しながら性能予測を行った。

2. 工 法 概 要

リングシールド工法は、図1に示すように、トンネル掘削を行う場合にトンネル外殻部を先行掘削して覆工体を構築した後、内部残土を掘削してトンネルを完成する工法である。したがって、リングシールド工法では、従来の円形全断面シールドとは異なった内外二重のスキンプレートを持つリング状の掘削機を使用する。掘削機は多軸ビットなどの掘削装置部分の後方にジャッキを備え、組立てられた鋼殻セグメントに反力を取り掘進する。リング部は一次覆工が入るだけの空間であり、作業坑においてセグメント組立等の坑内作業、資機材及び土砂の搬出作業を行う。リングシールド工法の用途としては、道路、鉄道トンネル、共同溝などが考えられ、以下の特徴を有する。

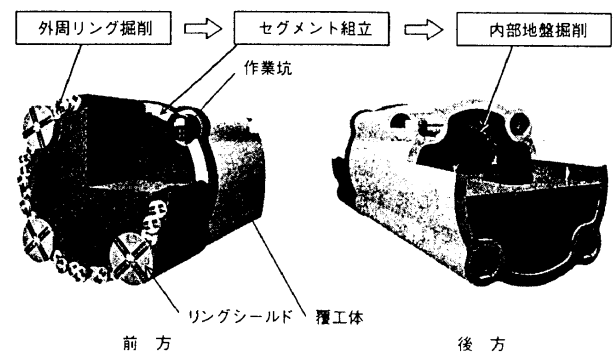


図1 リングシールド工法 リングシールド工法の概要を示す。
Ring shield tunneling method

- (1) 掘削断面積が小さいため、地山の安定が図りやすい。
- (2) 作業坑間を直線や円弧で構成することにより、断面形状を任意に選定できる。
- (3) 覆工部のみシールド掘削するため、産廃土の低減が可能である。
- (4) シールド機の軽量化・地上設備の簡略化が可能である。

3. 模型掘削実験

3.1 実験装置

実験装置を図2に示す。実験装置は、土被り1D (D:シールド外径)の位置を $D=1.35$ mのシールド模型が油圧ジャッキにより直進する構造となっている。カットは面板式、掘削方式は開放型であり、チャンバ内の排土はスクリーンコンベヤにより行っている。リングシールドは2個1組の計6組のカットを有し、それぞれ組になったカットは独立に駆動できる。

また、油圧ジャッキにて強制的に $\pm 1.5^\circ$ の範囲内で姿勢変化を与えることも可能である。

3.2 実験条件

実験地盤は切羽が崩壊しにくい地盤(硬地盤)としやすい地盤

*1 高砂研究所建機研究推進室

*3 技術管理部研究開発管理課主務 工博

*2 高砂研究所建機研究推進室主管

*4 建設機械部建設機械設計課主務

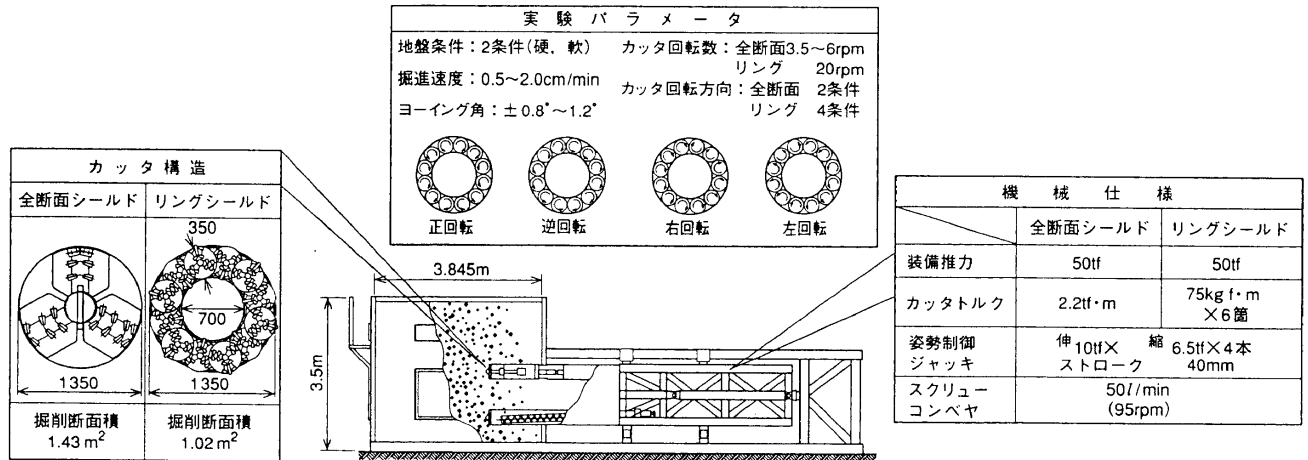


図2 模型掘削実験装置 模型掘削実験装置の仕様を示す。
Model excavation test device

表1 土質定数

Soil parameter of experiment			
		硬地盤	軟地盤
潤湿密度 ρ_t	(g/cm ³)	1.80~1.85	1.60~1.70
乾燥密度 ρ_d	(g/cm ³)	1.58~1.62	1.43~1.47
間げき比 e		0.63~0.67	0.80~0.85
相対密度 D_r	(%)	88~99	39~52
含水比 w	(%)	13.0~14.3	14.0~16.2
飽和度 S_r	(%)	45~65	40~65
コーン指数 q_c	(kg/cm ²)	22~61.8	3.6~16.7

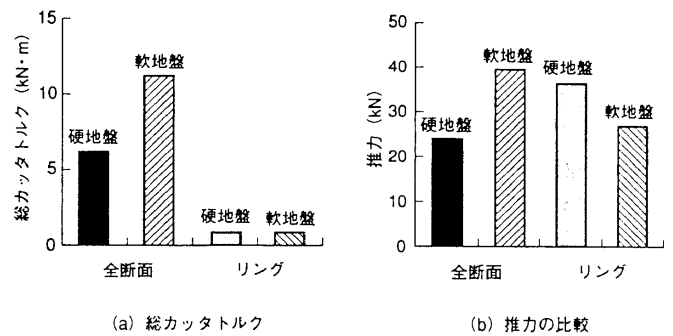


図3 負荷特性の比較 全断面円形シールドに比べ、リングシールドの総カットトルクが低いことが分かる。推力は同程度であり、掘削断面積の減少分が内部土砂の摩擦で相殺される。
Comparison of operating performance

(軟地盤)の2種類を設定した。地盤材料には珪砂5号を使用し、各実験地盤間の含水比、飽和度等の土中水分に関する土質条件の再現性が保たれるよう水締め管理を行った。平均的な土質定数を表1に示す。掘進条件は、掘進速度、カット回転数、カット回転方向をパラメータとして設定した。なお、リングシールドのカット回転方向は図2のように定義した。計測項目は、シールド機の負荷特性としてカットトルク、機体作用力を、姿勢制御性として機体姿勢、切羽安定性に関しては、地盤の地表面変位、地盤のコーン指数、排土量を計測した。

3.3 実験結果

3.3.1 負荷特性

定常掘進時のカットトルク及び推力を図3に示す。なお、リングシールドの総カットトルクは計12個のカットトルクの総和で示した。リングシールドのカットトルクは全断面シールドの10%以下である。これはリングシールドの掘削断面積が全断面シールドに比べて小さいこと、個々のカットの面積が小さいことによる。また、摩擦抵抗が支配的な回転掘削機の掘削トルクは掘削断面の一次モーメントに比例することが知られている⁽²⁾が、本実験のトルク比は、全断面シールドに対するリングシールドの断面一次モーメント比(=0.21)よりも小さい。これは、後述のとおりリングシールドの切羽安定性が高いため、カットフェイスへの作用土圧が小さいことによるものと考えられる。推力は、掘進条件、地盤条件によって変動はあるが、全断面シールドとリングシールドに大差はない。しかし、本実験に用いたモデルのリングシールドでは未掘削部分が実機械より大きかったことから、スキンプレートと土砂との摩擦係数 μ の値によっては、全断面シールドに比べ小さな推進力で掘進可能となると考えられる。

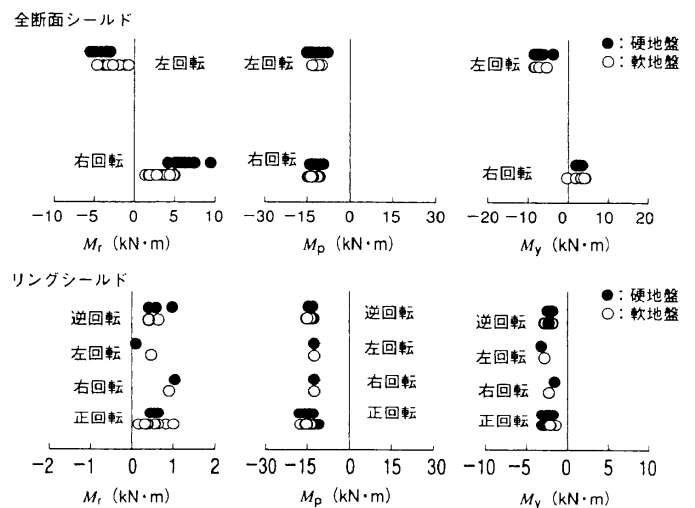


図4 シールド機への作用力の比較 全断面円形シールドに比べ、リングシールドはシールド機への作用モーメントが小さく、直進性に優れる。
Comparison of moment acting on shield machine in excavating

3.3.2 姿勢制御性

全断面シールド及びリングシールドのカット回転方向とローリングモーメント M_r 、ピッチングモーメント M_p 、ヨーイングモーメント M_y との関係を図4に示す。全断面シールドでは、カットの回転方向と逆方向の M_r が作用しているのが認められるのに対し、リングシールドで作用する M_r は全断面シールドの10%程度である。 M_p については、いずれのシールドもカットの回転方向によら

ず、 $-10 \sim -20 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 程度作用しているが、これは模型シールドの上載荷重及びリング内土砂によるものである。また、 M_y については、全断面シールドの場合、カット回転方向に応じた M_y が作用しているが、リングシールドの場合、その絶対量は全断面シールドの $1/3$ 程度であるため、カットの回転方向制御のみによるヨーイング方向の姿勢制御は難しい。しかしながら、模型シールドに強制的にヨーイングを与えた場合の M_y とヨーイング角は比例関係を示し、その比例係数が同程度になることが分かっている⁽³⁾。

以上の結果より、リングシールドは従来のシールド機より直進性を確保しやすいことが分かった。また、ヨーイング方向の姿勢制御が必要な場合には、従来と同様のジャッキ操作で行えるものと考えられる。

4. X線可視化実験

4.1 実験装置

X線透過条件による制約から実験土槽幅を 30 cm とし、土槽中央に縮尺比 $1/100$ のシールド模型（直径 10 cm ）を設置した。地盤は珪砂5号を相対密度 50% 程度で層厚 2 cm ごとにまき出し、各層表面上に標点となる鉛玉を配置して、土被りがシールド径の2倍になるまで繰返し作成した。本実験では、切羽安定性について、円形全断面シールドと、断面形状の異なるリングシールドの相違点を把握することを主眼においた。施工条件は、掘削・取込み機構を持たないリソッドな円筒体を地盤中で後退させることにより、実際に起り得る危険な状態である切羽面を緩ませ気味に施工する状態、すなわち、土圧、泥水圧が静止安定状態を下回った状態を想定した。

4.2 実験方法

土槽中に設置したシールド模型を後退させたときの切羽への影響をX線ラジオグラフィ⁽⁴⁾⁽⁵⁾によって可視化した。本手法によれば、土中に埋設した鉛標点の一連のX線写真における鉛標点の座標変化から土中の三次元的な変位やひずみ分布を求めるとともに、地盤中に生じるせん断破壊線や間げき比の変化を直接目視することが可能である。実験では、 5 mm/min でシールド模型を後退させ、変位量 $0, 1, 3, 5, 10 \text{ mm}$ の位置で各々X線撮影を行った後、各写真上の鉛標点の座標をディジタイザにて読取り、パソコンでデータ処理を行った。

4.3 実験結果

土中の一鉛直断面を平面ひずみ場として、連続した2枚のX線写真から地盤のひずみ増分を算出し、最大せん断ひずみ分布を得る。この最大せん断ひずみ分布より、掘削に伴う地盤中の影響領域（緩み領域）の形状や広がりやを推定することが可能である。模型変位量が 5 mm のときの結果を図5に示す。全断面に対し、リング形状では、緩み高さが $1/2$ 以下に、切羽前方の影響領域の広がりが $1/5$ 以下に低減し、地盤の緩み領域を大幅に低減できることを確認した。

5. 旋回性能評価

5.1 解析内容

実際の施工現場を想定して、リングシールド機の旋回性能予測解析を行い、その結果を全断面シールドの実績と対比させながら評価した。解析対象の地盤条件、施工条件及びシールド機仕様を表2に示す。

5.2 モデリング

図6に示すように、シールドジャッキでシールド機に旋回モー

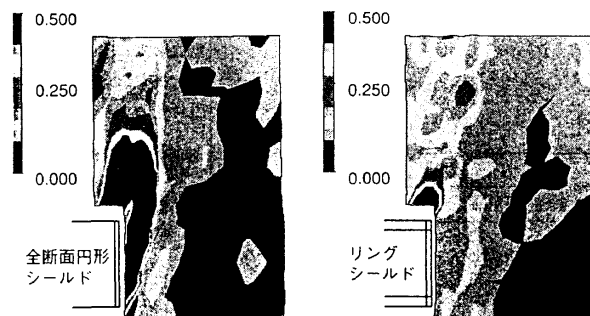


図5 最大せん断ひずみコンタ図 断面形状によって、シールド機周辺の地盤の緩み領域の広がりには差があることが分かる。
Contour of maximum shear strain around cutting face

表2 リングシールド機及び対象地盤の主要諸元
Specifications of ring shield machine and ground condition

項目	諸 値
(1) 地盤条件	
土の単位体積重量	2.0 g/cm^3
地盤反力係数	$3.0 \sim 5.0 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$
土圧係数	0.4
機体と地盤間摩擦係数	0.3
(2) 施工条件	
土被り	11 m
旋回半径	$300 \sim 600 \text{ m}$
(3) シールド機仕様	
断面寸法	$15.040 \times 18.115 \text{ m}$
機 長	10.55 m
総重量	3000 t

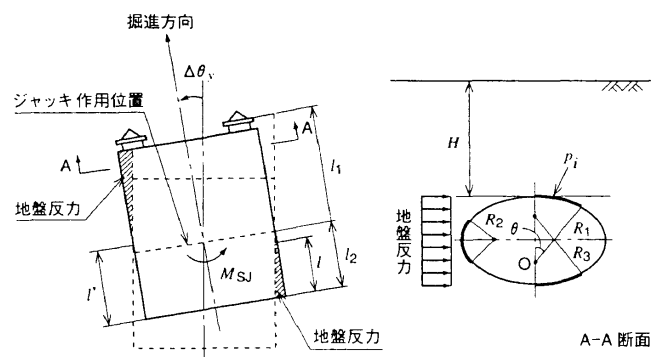


図6 地盤反力分布 旋回時にシールド機に作用する抵抗モーメントは、機体の変位量と地盤反力係数の積で表される地盤反力が支配的である。

Earth pressure acting on shield machine in steering

メント M_{sj} を与えたとき、ジャッキ作用点の中心が Δx 移動し、方位角が $\Delta \theta_y$ 変化したとする。このとき、旋回モーメント M_{sj} は、コピーカットで余掘ることによるアンバランスモーメント M_a と、シールド機が移動したときに地盤に抵抗するモーメント M_b との和に釣合うと考えられる。アンバランスモーメント M_a は、水平方向の土圧によるモーメント M_{as} とこの土圧を抗力とするシールド機周囲の摩擦力に抵抗するモーメント M_{at} の和で与えられ、また、地盤に抵抗するモーメント M_b は、地盤反力によるモーメント M_{bs} と地盤反力の増加に伴う摩擦力による抵抗モーメント M_{bt} の和で与えられる⁽⁶⁾。

以上を数式で表すと、次の式(1)～(5)となる。

$$M_{sj} = M_a + M_b \quad (1)$$

$$M_{as} = K \gamma_s D_1 (H + D_1/2) (l_1^2 - l_2^2)/2 \quad (2)$$

表3 全断面円形シールドとリングシールドの α 値の比較
Comparison of α value between circular face shield and ring shield

	型式	地山	直径(m)	機長(m)	N 値	土被り(m)	旋回半径(m)	地盤反力係数(kN/m ³)	α (deg·m ² /kN)
全断面円形実績	土圧式	粘性土	2.89	4.5	5~10	2.8~6.3	—	10 800	0.030
	土圧式	砂れき質砂	5.54	6.19	14~62	17.5~19.8	—	38 200	0.010
	土圧式	シルト	3.68	5.18	6	13	—	7 600	0.102
	土圧式	シルト	3.08	4.99	2	9.3	—	2 700	0.065
	土圧式	砂れき	2.28	4.31	30	3	—	48 200	0.010
	土圧式	泥岩	2.13	4.05	50 以上	15	—	84 300	0.006
	土圧式	砂	2.13	4	30~50	10.4	—	67 800	0.008
	泥水式	砂, 泥岩	2.13	4.08	50 以上	17	—	84 100	0.009
リング解析	泥水加圧式	砂れき	2.13	4.5	31~40	8	200	—	0.002
	泥水式	砂質土	15.04×18.115	10.55	30~50	11	400	30 000	0.0070~0.0180
	泥水式	砂質土	15.04×18.115	10.55	30~50	11	400	50 000	0.0042~0.0133
	泥水式	砂質土	15.04×18.115	10.55	30~50	11	500	30 000	0.0070~0.0161
	泥水式	砂質土	15.04×18.115	10.55	30~50	11	500	50 000	0.0042~0.0122

$$M_{af} = \sum_{i=1}^3 \int \mu p_i R_i \sin \theta dA \quad (3)$$

$$M_{bs} = \{ kl^2(l_2 - l/3)/2 + k(L - l')^2[l_1 - (L - l')/3]/2 \} D_1 \Delta \theta_y \quad (4)$$

$$M_{bf} = \mu [kl^2 + k(L - l')^2] \left(\sum_{i=1}^3 R_i \int \sin^2 \theta dS_i \right) / 2 \quad (5)$$

ここに,

γ_s : 土の単位体積重量 H : 土被り
 k : 地盤反力係数 K : 土圧係数
 D_1 : リングシールドの短径 μ : 摩擦係数
 i : 図6の積分領域 L : 機長
 dA : シールド機周面の微小面積 P_i : 作用土力
 dS_i : シールド機周面の微小長さ

5.3 解析結果

旋回半径 300~600 m の範囲で 1 リング掘進するのに要する旋回モーメントを解析し、装備モーメントと比較した結果を図7に示す。地盤反力係数が $3 \sim 5 \times 10^4 \text{ kN/m}^3$ の地盤では、旋回半径 400 m で旋回するには余掘が必要であり、旋回モーメントは機体装備モーメントの約 50~70 % になると予想される。さらに、旋回モーメントは地盤の変形に伴い発生するモーメント M_b が支配的であり、このモーメント M_b はシールド機の外径 D と機長 L の 3 乗の積に比例する。単位掘進距離当りの方位角変化率と、旋回モーメントを DL^3 で除した値との比を α とし、リングシールドと実機の全断面円形シールドを比較して表3にまとめたところ、両者共同程度の α を有していることが分かった。この α はシールド機の寸法効果も考慮した旋回運動の容易さを表す指標であり、リングシールド機が従来の全断面円形シールドと同程度の旋回性能を有することを示す。

6. む す び

新しい発想のリングシールド工法に関し、模型掘削実験、X 線可視化実験並びに旋回性能予測解析を実施し、以下のことを把握した。

- (1) 模型掘削実験では、リングシールドの推力は全断面シールドと同程度であるが、総カットトルクが小さくなること、カット回転時のシールド機への作用力は全断面シールドより小さく、機体の直進性が優れていることが分かった。
- (2) X 線可視化実験では、シールド機周辺地盤の緩み領域を可視化し、リングシールドの切羽安定性が高いことを明らかにした。
- (3) リングシールド機の旋回性能について予測解析を行い、従来

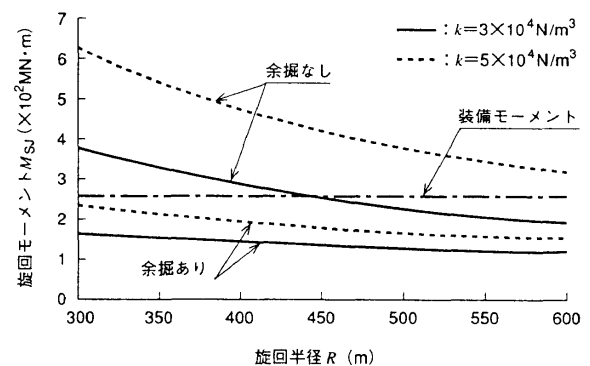


図7 旋回モーメント解析結果 余掘をすることにより、従来のジャッキ操作でリングシールドが可能であることを示す。
Analysis results of steering moment by shield jacks

機と同様のジャッキ操作で旋回できることを確認した。

以上により、リングシールドは、負荷特性、姿勢制御性、切羽安定性において、従来の全断面シールドをりようがする性能を有することを確認した。今後、実機設計を行い、受注活動を積極的に進める予定である。

最後に、本研究は五洋建設(株)、住友建設(株)、(株)銭高組、東急建設(株)、日本国土開発(株)、不動建設(株)の6社と当社の共同研究として実施したものである。また、本研究を進めるに当たり、ご指導、ご尽力賜った早稲田大学小泉教授に深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) 毎田ほか、リングシールド工法の開発 (その1, 2), 第48回土木学会年次講演会 (1993-9)
- (2) トンネル標準示方書 (シールド編)・同解説 (1986)
- (3) 井田ほか、外殻先行シールド工法に関するシールド機の切羽安定性と負荷特性・姿勢制御性に関する模型掘削実験, 第5回トンネル工学研究発表会 (1995-11)
- (4) 浦上統一ほか、X 線ラジオグラフィ法を用いた土の移動現象の可視化, 三菱重工技報, Vol.21 No.4 (1984) p.31
- (5) 大石善啓ほか、斜坑シールド工法の施工性に関する研究, 三菱重工技報, Vol.29 No.6 (1992-11)
- (6) 大川賢紀ほか、リングシールド工法の開発 (その16), 第51回土木学会年次講演会 (1996-9)