

大断面矩形シールドの実用化検討

Utilization examination of a shield driven tunnel of large rectangular shape

中村 浩¹⁾ 中川 嘉博²⁾ 岡本直久³⁾ 溝田正志⁴⁾ 中尾 努⁵⁾

Hiroshi NAKAMURA, Yoshihiro NAKAGAWA, Naohisa OKAMOTO, Syooji MIZITA, Tsutomu NAKAO

Construction has commenced on the world's first shield driven double track subway tunnel of rectangular shape for the Kyoto Municipal Subway. Full-scale loading tests were performed on lining segments to confirm the adequacy of their design. Also, as a method by which a rectangular cross section can be excavated, manufacturing is in progress on a "Wagging Cutter Shield," which is equipped with rotating cutters that perform oscillating movement. This paper presents a report on the overall planning and the tests that were performed in the process of planning.

Key Words: tunnel, rectangular shape segmental lining, high density slurry type shield, segment loading test

1. まえがき

非円形断面のシールドは、トンネルをニーズに合った形状とすることで地下空間を有効に利用でき、掘削土量を少なくできる等のメリットがあるが、円形トンネルに比べて不経済となることがあって、複円形断面を除き余り研究されてこなかった。しかし、建設省総合技術開発プロジェクト・地下空間の利用技術の開発の一環として1988年から始まった官民共同研究「地下空間の建設技術の開発」¹⁾や、東京都と(財)土木研究センター、民間18社が1989年から行った自由断面シールドの共同開発²⁾等がきっかけとなり、扁平なシールドトンネルの研究が進んだ。その後本体や継手を改善(強化)した新しいセグメントの研究が進み、非円形断面を掘削できる技術も複数の方法が実用化された。この結果、断面の多様化と大型の非円形断面への取組みが徐々に進むこととなった。

本研究では、京都市高速鉄道東西線・六地藏北工区^{3)~11)}において行った大断面矩形覆工構造、掘削工法の実用化検討・実験等による検証を通して主に扁平断面シールドの課題と対応方法について述べる。

2. 扁平断面シールドトンネルの実績と課題

矩形の覆工は、手掘りのシールドと組み合わせて短距離、小規模のものが実施されている。一方で、密閉型シールドでの実績は、縦楕円形での実証実験工事²⁾が最初である。密閉型シールドでの施工事例の推移を図-1に示す。

覆工構造に関しては、内部に支柱(中柱)を設けているか否かで分類され、中柱が無い事例では合成構造のセグメントで扁平率(長径/短径)=1.6のものが最大で、鋼製構造も概ね同等の事例がある。一方でRC構造では扁平率=1.27が最大で、扁平な事例や断面の大きな事例が少ない。これは、従来のRCセグメントが本体や継手の剛性(特に負曲げ特性)が低く、合理的な本体設計、継手配置が難しくなるためである。

覆工厚については、長径との比が5~9%の範囲にある。合成・鋼製構造では鋼板厚を変えることで比較的自由的な設計が可能であるためか5%を若干下回る事例もあるが、覆工形状や立地条件の関係で9%の事例もある。RC構造に

1) 正会員 京都市交通局 2) 正会員 京都市交通局建設室 3) 非会員 京都市交通局建設室建設事務所
4)、5) 正会員 鹿島・奥村・大豊・吉村・岡野特定共同企業体(鹿島関西支店)

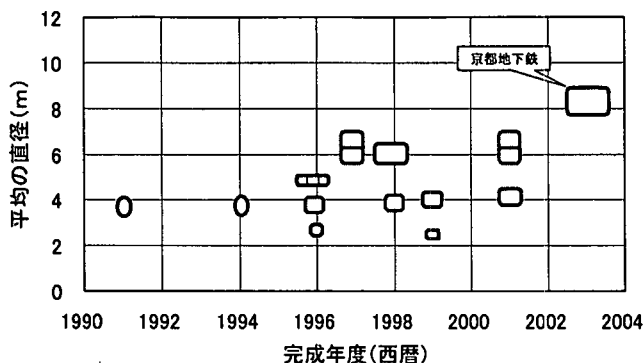


図-1 扁平断面シールド(密閉型)の施工実績

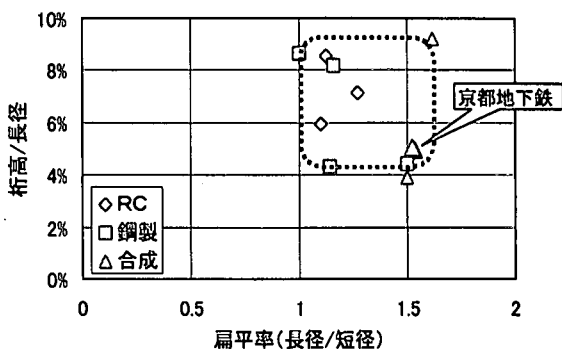


図-2 扁平率と覆工形式・仕様

については、6～7%以上と円形の場合より2割以上の覆工厚としている。

中柱のある場合で柱を本設とした事例は少ない。これは、中柱と覆工との接合部に大きなモーメントが発生し、多円形断面に比較して覆工構造が不経済となる点に課題がある。

シールド工法については、「泥土圧式」の事例が多い。多軸、揺動、オーバカッタ、偏心カッタ、偏心多軸、円筒ドラム等様々な掘削機構が採用されているが、「泥水式」では標準となっている面盤を配置することが難しく、結果スポークタイプのカッタで対応できる泥土圧式が主流となっている。一方で、泥土圧式では円形に比較して複雑となる掘削機構の信頼性やビット・カッタ類の磨耗対策が課題で、特に砂礫地盤での長距離掘進に課題を残す。

3. 六地蔵北工区の工事概要

3.1 全体概要

矩形シールドを採用した六地蔵北工区は、渡り線の一部を含む六地蔵駅～石田駅間のトンネル区間である。ルートは、道路幅員が 15m程度と狭隘で交通が輻湊する京都外環状線下となっている。トンネルは地下水の豊富な砂礫層中に位置し、土被りは 10m～14mである。発進部から 57m間は渡り線部で、中柱の無い一層一径間であり、以降は中柱のある一層二径間(延長 703m)となる。

3.2 覆工構造

セグメントの設計は、継手をばね、セグメント本体を梁とした“はりばねモデル”による計算法を基本とした。

(1) 渡り線部の覆工構造(一層一径間)

渡り線区間は中柱の無い一層一径間構造となる。柱のある一般線路部に接続する関係で覆工厚を極力薄くする必要があり、サンドイッチ型の合成セグメントを採用している。これは外面を鋼殻で覆い、その中にコンクリートを充填した構造である。鋼板にはスタッドを溶植し、鋼殻とコンクリートの一体化を図っている。覆工厚は 500mmで、インパート部を除き二次覆工は行わない。

(2) 一般線路部の覆工構造(一層二径間)

一層二径間部では主に施工性の面からダクタイト(DC)セグメントを採用している。外周部分で、柱が乗る箇所に剛性のあるコルゲート構造、他は4主桁構造としている。覆工厚は

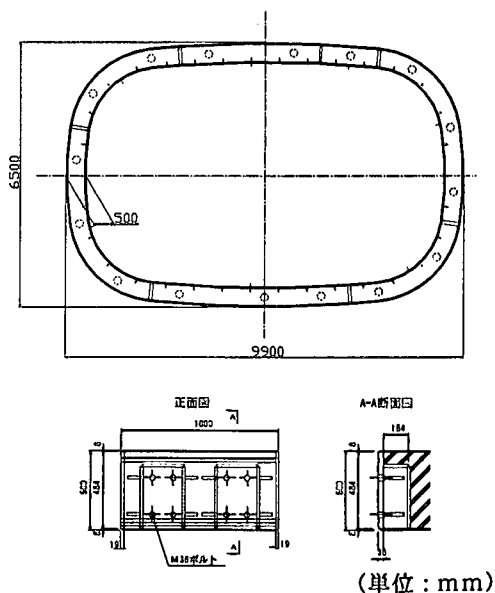


図-3 一層一径間・合成セグメント

350mmで、渡り線部と同様に二次覆工は行わない。なお、柱なし区間から柱あり区間に移行する部分に、渡り線部と同様の構造で中柱(鋼管柱、 $\phi 300\text{mm}$)を設けた接続部セグメント5Ringを介在させる。

3.3 シールド工法

シールド工法は、主に立地条件から泥土圧式とし、掘削機構には揺動カタ方式を採用した。この工法(Wagging Cutter Shield 工法)は、カタヘッドを一定の角度内で揺動運動(=Wagging)させながら掘進するもので、隅角部は伸縮制御機構をもつ余掘り装置(オーバカタ)で切削する。

4. 課題と対応

4.1 一層一径間・合成セグメント

合成セグメントについては、分割や継手構造等について検討を行い、継手構造についてセグメント間のボルト配置を変えることで負曲げ特性の向上を図った。合成セグメントの全体図と継手詳細を図-3に示す。

覆工全体としての耐荷性能と設計法との整合性を確認するためには事前にセグメントを試作し、単体曲げ、継手曲げ、リング間せん断、リング載荷の各試験を実施した。セグメントの組立に関しては実機を使つての組立試験を実施し、不具合の改善や操作性の確認を行っている。

4.2 一層二径間・ダクトイル(DC)セグメント

DCセグメントについては、柱周りの構造について検討を行っている。これは、製作性と組立の面から見直したものである。検討の結果、柱部分を柱脚部(Eセグメント)と柱本体部分(Fセグメント)に分割することとした。分割することで組立時の干渉を防ぎ、製作面でも効果が期待された。ちなみにこの構造を複円形(鉄道断面)DCセグメントとコスト比較すると型枠の種類は増えるものの、1,000リング程度ではほぼ同等となる試算結果を得ている。

4.3 シールド

(1) 掘削機構

この工法(Wagging Cutter Shield 工法)はカタを一定区間で揺動させるため、主カッタスポーク長を最適の長さにすることが可能で、主カタでカバーできる範囲が広がる。これはオーバカタの負担軽減になる。主カタの摩耗対策としては、ビットの大型化、段差ビット等実績のある方法を採用することとした。

(2) セグメントエレクタ

セグメント組立のため、門型旋回式のセグメントエレク

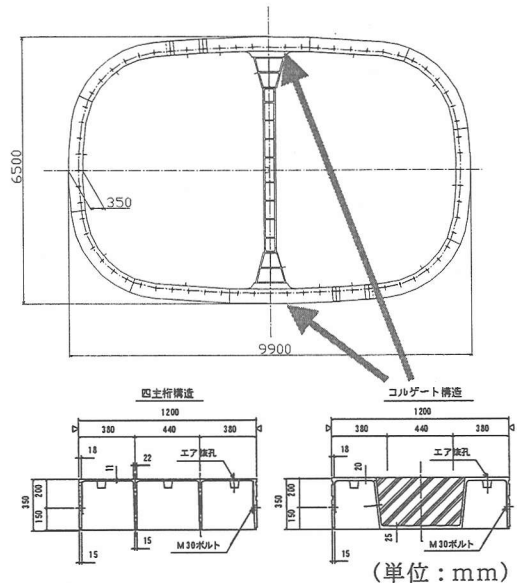


図-4 一層二径間・ダクトイルセグメント

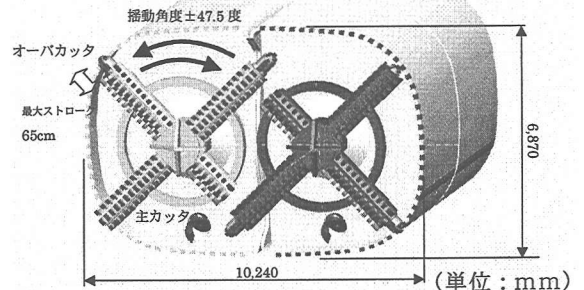


図-5 矩形(Wagging Cutter Shield)マシン

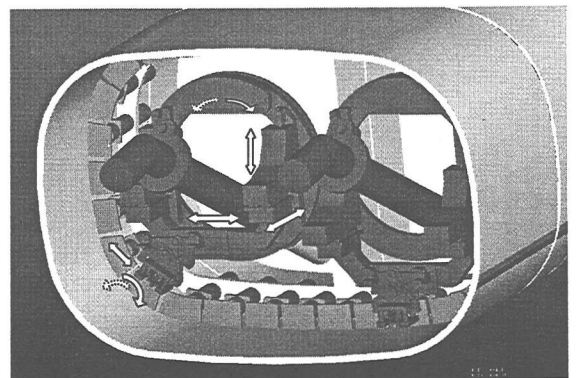


図-6 セグメントエレクタの動き

タを左右に1基ずつ装備する。
形や重量の異なる合成、DC 双方のセグメントに対処するため、
①旋回、②昇降、③前後摺動、
④左右摺動、⑤ローリング屈曲、
⑥左右微摺動、の6軸を制御できるエレクトアを新たに開発した。

(3) 形状保持装置

中柱の無い合成セグメントに対して裏込めなどの施工時荷重による変形を抑えるため、形状保持装置を6基(左側3基、右側3基)装備する。拡張ジャッキ長さが掘進中に変化しないようにするメカニカルロック機構と形状保持位置を計測するストローク検出用センサ、保持力計測が可能なロードセルを装備している。

形状保持装置の必要基数、管理値などを決定するため、はりバネ解析・シェルバネ解析を実施し、各リング(保持装置)ごとにストローク管理と荷重管理を行うこととしている。

5. 実用化のための諸実験

5.1 合成セグメント・リング

載荷試験

試験は、主に覆工全体としての耐荷性能と設計法との整合性を確認するために実施した。

試験に先立ち、継手曲げ、リング間せん断試験結果で得られた諸数値と試験での載荷条件を用いて予測解析を実施し、載荷荷重を決定した。また、計測値との対比を行った。結果を図-7に、結論を以下に示す。

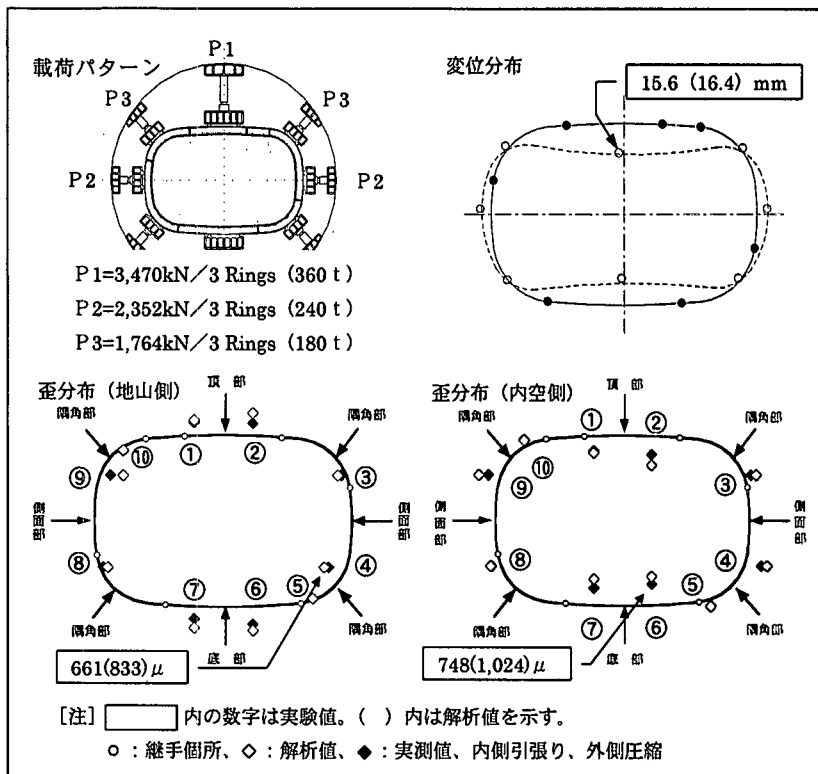


図-7 合成セグメント・リング載荷試験結果

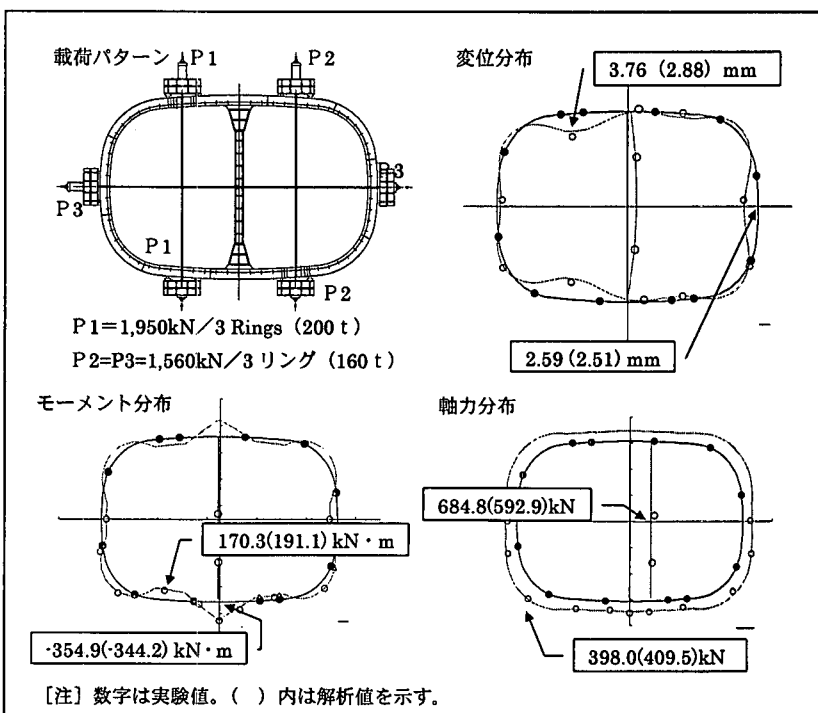


図-8 ダクタイルセグメント・リング載荷試験結果

① 覆工の変位

設計荷重に近い力が作用した時の覆工最大変位はトンネル頂部で15.6mm、底部で14.5mmとなった。これは側部・隅角部なども含め解析値とほぼ一致している。除荷後は原点に戻っており、弾性的な挙動を示す。

② スキンプレートの歪

同上の荷重条件下で、最大断面力位置におけるスキンプレート実測歪みは、解析値の約70%程度となった。何れも弾性的な挙動を示す。解析値と実測値との差については主にモデル化の段階でリング間の継手板を評価しないなど単純化したことによる影響と判断している。

5.2 ダクティル(DC)セグメント・リング載荷試験

試験は、耐荷性能と設計法との整合性を確認するために実施したものであるが、断面性能が異なる柱脚部近傍での応力分布にも着目した。試験結果を図-8に、結論を以下に示す。

① 発生曲げモーメント、軸力、変位分布

発生曲げモーメント、軸力、及び変位の分布状況を”はりばねモデル”による解析結果と比較すると、計測値と解析値はほぼ近似した結果となり、”はりばねモデル”は矩形シールドの覆工挙動を充分シミュレートできていると考えられる。

② 柱脚部(コルゲート構造)及び円周部(4主桁構造)の挙動

コルゲート部と4主桁部とを歪レベルで比較した場合、コルゲート部では4主桁部の60%以内に収まっており、分布もかなりフラットな形状となっている。コルゲート-4主桁間の継手部での目開きも円周部分と大差なく、柱の影響は概ねコルゲート部内で収まっていると判断される。本構造形式は極めて合理的であることが載荷試験からも確認することができた。

5.3 シールドのオーバカッタ耐久性試験

矩形断面で長距離掘進する場合はオーバカッタの耐久性が問題となる。事前にオーバカッタの摺動部とジャッキのシール等の耐久性を実施工レベルで確認し、必要があれば改善を行うこととした。

試験では、現地土砂(砂礫)と水を封入した密閉容器内で、実機と同一仕様のオーバカッタ(ジャッキ)に所定の負荷(横荷重)をかけながら摺動させた。試験装置を図-9、試験条件表-1に、結論を以下に示す。

① オーバカッタを伸縮させるロッド、ロッドを受けブッシュともに摩耗の著しい進行は見られなかった。

② ロッド先端部は土砂槽内貫入のため微小傷が進行しているが、摺動部でのかじり(引っ掻き傷)等破損の起因となるような致命的な傷はなかった。

③ シールは破損、摩耗ともに問題なかった。

④ 実機掘削回数240回(=掘削時間60分×4往復/分)でのブッシュ及び循環オイルの温度上昇は僅かであった。

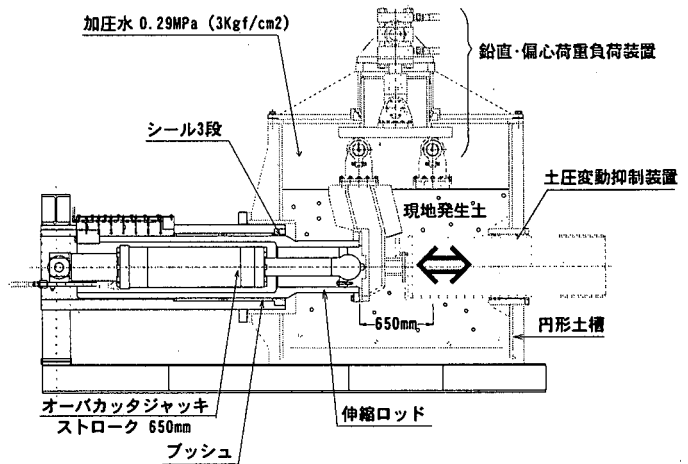


図-9 オーバカッタ耐久性試験装置

表-1 オーバカッタ試験条件

項 目	試験条件
試験環境	0.29MPa 加圧泥土
横荷重	196 kN/本
摺動ストローク	0~650mm
摺動速度	180mm/s (最大)
作動回数	10万回

6. まとめ

今回の検討及び試験等で得られた結果を以下に示す。

① 扁平率(長径/短径)=1.5、長径 9.9mの合成、DC2種類のセグメントを試作し载荷試験を実施したが、“はりばねモデル”による解析理論が適用可能なこと、両者とも所期の耐荷性能を有していることを確認した。

② 中柱を持つ矩形ダクトイルセグメントで、柱と柱脚部、外周部を分割し、柱が乗る部分と他の部分の構造を変えることで合理的な構造を実現できた。ちなみに複円形と比較すると型枠の種類は増えるが、1,000リング程度では製造コストがほぼ同等となる試算結果を得ている。

③ 矩形断面の泥土圧式シールドでは掘削機構の信頼性が課題である。揺動カッタ方式(Wagging Cutter Shield 工法)でオーバカッタについての耐久性を実機レベルで実験的に検証し、当該工事について十分な性能を有していることを確認した。

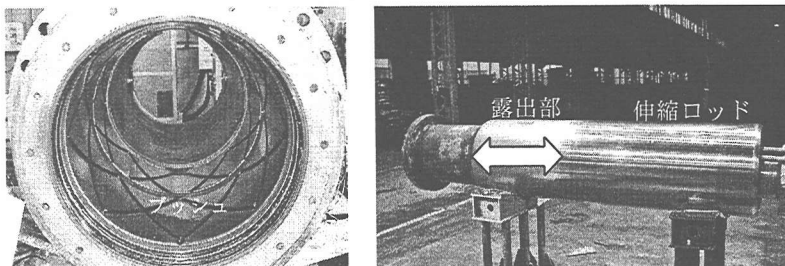


図-10 10万回作動後のブッシュ及び伸縮ロッドの状況

7. おわりに

今回の矩形断面の計画検討を通して、覆工やシールドに関する知見を得た。今後は、実施工を通してより合理的な扁平断面シールド工法の確立に努力していきたい。なお、今回の検討を進めるにあたっては、「京都市高速鉄道東西線六地蔵～醍醐間建設技術委員会」や「矩形シールド検討ワーキング」において、ご指導をいただきながら検討を進めてきた。委員並びに関係者各位に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 地下空間の利用技術の開発報告書(第1～4分冊)、建設省、1992年8月
- 2) 石川 旭, 秋山敦郎, 田代 昇, 中尾 努: 自由断面シールド工法の現場実証試験、トンネルと地下、No22、Vol.11、1991.11
- 3) 山崎糸治: 大断面矩形シールド工法の概要について(京都市高速鉄道東西線六地蔵北工区)、SUBWAY、2001年1月
- 4) 中村 浩、古川 衛、山口直紀、溝田正志、Planning for shield driven double track subway tunnel of box shape、IS-Kyoto、2001/11/1(予定)
- 5) 中川嘉博、溝田正志、菅 一也、北嶋武彦: 複線断面扁平シールドの課題と対応、土木学会・平成13年度全国大会、2001年10月(予定)
- 6) 中村 浩、中川嘉博、古川 衛、北嶋武彦、小嶋 勉: 大断面矩形シールドの設計について、第11回トンネル工学研究発表会、2001.11.29(予定)
- 7) 塚下 安彦他: 矩形シールドにおける構造変化点の検討(その1)、土木学会・平成13年度全国大会(予定)
- 8) 井上 豊司他: 矩形シールドにおける構造変化点の検討(その2)、同上
- 9) 小畑 博他: 大型矩形シールド用サンドイッチ型合成セグメントの構造試験(その1)、同上
- 10) 岡本直久他: 大型矩形シールド用サンドイッチ型合成セグメントの構造試験(その2)、同上
- 11) 岡崎 弘他: 矩形ダクトイルセグメントの構造試験、土木学会・平成13年度全国大会