

多円形シールド覆工構造に用いる特殊セグメントの載荷実験・解析 EXPERIMENT AND ANALYSIS OF THE SPECIFIC SEGMENT WITH MULTI-CIRCULAR FACE SHIELD

福島昭男*・小山幸則**・園田徹士***・左高茂樹****・粥川幸司*****

Akio FUKUSHIMA, Yukinori KOYAMA, Tetsushi SONODA, Shigeki SADAKA and Koji KAYUKAWA

In recent years, the application of multi-circular face shield method to underground stations is studied in case of construction of underground railways. In this paper, the experiment and 3-dimensional FEM analysis were carried out on the specific segment to be applied to multi-circular face shield. As a result, it was clear that this specific segment had enough strength and it was able to apply to this tunnel lining.

Keywords: multi-circular face shield, specific segment, design method, FEM

1. はじめに

地下鉄道建設においては、一般に駅部では開削工法、駅間ではシールド工法が採用されているが、近年、駅部においてもシールド工法が採用され始めている¹⁾。そこで、駅部トンネルの建設に際して従来の円形でない特殊な断面形状を有したシールド工法についての研究が盛んに行われている。

本研究では、既報²⁾において駅部トンネルへの適用を目的とした多円形シールド覆工構造を考案し、本覆工構造に対する設計に際して3次元FEM解析を導入することを検討した。また本覆工構造における箱桁構造についての載荷試験を実施し、本覆工構造が実際に構造物として実用可能かどうかを検討した。今回は、本覆工構造に用いる特殊な形状をしたセグメント(以下中央部セグメントと称す)に関して、本セグメントに作用するトンネル横断方向の荷重の流れ方やその挙動を確認する目的で、実物大の試験体を用いた載荷試験を行った。またこれと同時に、3次元FEM解析により載荷試験のシミュレーションを試みた。さらに、試験では再現できないような実施工において想定される荷重条件に対して3次元FEM解析を行った。

2. 駅部トンネルへの適用を目的とした多円形シールドトンネル覆工構造²⁾

図-1に駅部トンネルへの適用を目的とした多円形シールドトンネル覆工構造を示す。本覆工構造では、トンネル横断面的には2つの円形トンネルを横に接する状態で構築している。これと同時に左右の円形トンネル接合部の上下に図-2に示すような特殊な形状をしたセグメント(以下中央部セグメントと称す)を配置し、このセグメント間に上下方向の荷重を伝達する柱を組み込む構造となっている。なお、本セグメントはスチール構造

* 正会員 東京都地下鉄建設(株)工事部
** 正会員 (財)鉄道総合技術研究所トンネル研究室
*** 正会員 ハザマ土木統括本部技術・設計第1部
**** 正会員 ハザマ東京支店六本木青山出張所
***** 正会員 ハザマ技術研究所技術開発部土木技術開発室

である。

ここで、中央部セグメントは次の4つの重要な機能を担うことになる。

- ①両側部円形トンネル部分からのトンネル周方向の荷重を水平方向でつり合わせる。
- ②中央部セグメント自体に作用する土圧、水圧に抵抗する。
- ③トンネル軸方向の梁を構成する。
- ④上記3点の荷重を柱に伝達する。

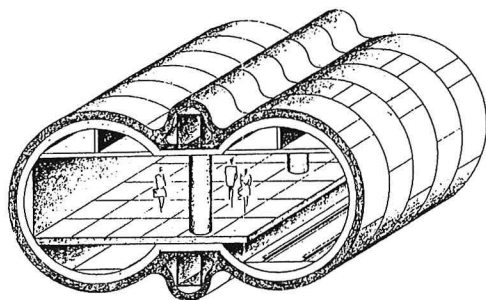


図-1 多円形シールドトンネル覆工構造

3. 中央部セグメント載荷試験および3次元FEM解析

3. 1 中央部セグメント載荷試験

今回は、中央部セグメントの受け持つ重要な機能の内、左右の側部セグメントから中央部セグメントに入る円周方向の力に対して次の2点を確認する。

- ①鉛直方向成分がセグメントの主桁を介して箱桁ウェブに伝達される時の応力状態
- ②水平方向成分が主に箱桁の下側フランジを介してつり合う時の応力状態

載荷試験概要を写真-1に、載荷試験方法を図-3示す。試験体は中央部セグメント1ピースの両側に箱桁部材2ピースを連結したもので、箱桁部および中央部セグメント部を支持して、中央部セグメントの張り出し部からジャッキにて載荷した。載荷

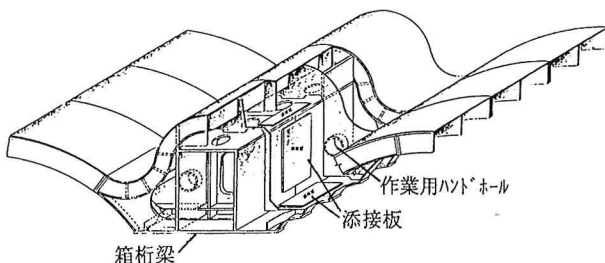


図-2 中央部セグメント詳細図

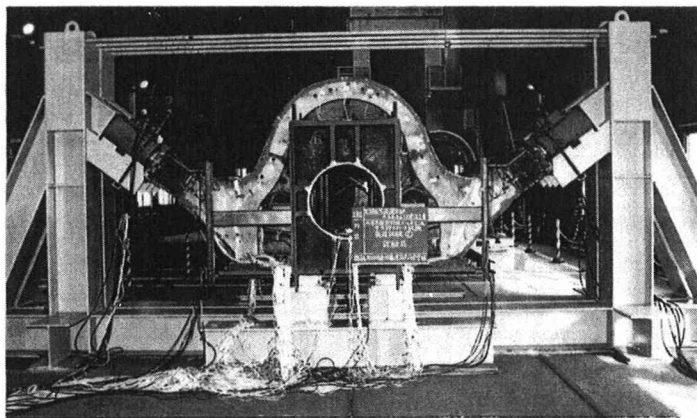


写真-1 中央部セグメント載荷試験状況

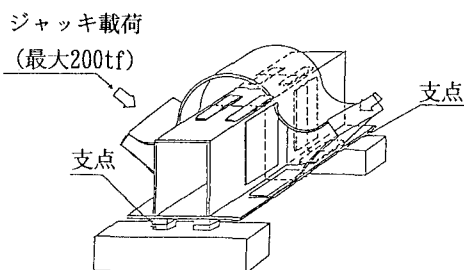
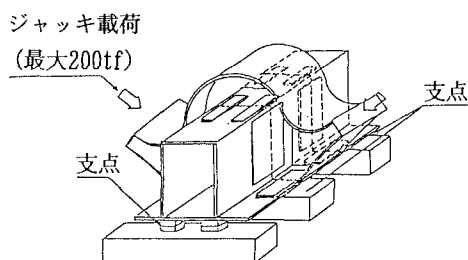
ケースとして次の2種類を行った。本覆工構造では図-1に示したようにトンネル完成後には中柱のあるリングと、中柱がなく中央部セグメントに内蔵された箱桁梁によって支持されたリングが混在することになる。そこで試験における試験体の支持条件として、中央部セグメントの下部に支点を設けた場合と、支点を設けない場合の2ケースについて載荷を行った。荷重はトンネル横断面の2次元解析で得られた結果から、軸力として20tfピッチで最大200tfまでの載荷を行い、その後除荷を行った。

3. 2 載荷試験を模擬した3次元FEM解析

図-4にFEMで用いた解析モデルを示す。要素タイプはシェル要素とした。試験体がセグメント横断方向および箱桁軸方向について対称であることを考慮して、解析では試験体の1/4をモデル化した。試験での中央部セグメントの支持の有無に対しては、支持条件の変更によって対処した。材料定数は、スチール構造であるため弾性係数 $E=2.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.30$ とし、主要部材板厚は図-4に示したものとした。

3. 3 試験および解析結果

試験の結果、セグメントの箱桁を中心とした対称な位置での変位、ひずみ計測値は試験体左右でほぼ同じ値



(a) 中柱で支持されたリングの状態を模擬した試験 (b) 中柱で支持されないリングの状態を模擬した試験

図-3 荷重試験ケース

であったので、試験体の左右の対称性は確保されているものと判断された。また、中央部セグメントの支持条件の相違による変位、ひずみ計測値の差は、あまり認められなかった。そこでここでは、より大きな部材応力を示した中央部セグメントを支持した(中柱で支持されたリングを想定した)場合について考察することとする。試験および解析結果を図-5~8に示す。

図-5では中央主桁と箱桁下フランジの接合部における鉛直方向変位についての荷重～変位曲線を示す。200tf荷重時で試験値Aで0.38mm、試験値Bで0.39mmとほぼ同じ値となっている。また、解析での変位は0.45mmと若干大きめではあるがほぼ同程度の値となった。図-6では200tf荷重時の中央主桁および箱桁内部にあるダイヤフラムの主応力ベクトルを示している。試験において応力の流れは、ほぼ荷重の方向に沿って箱桁ウェブまたはダイヤフラムの下部に入るものとなっている。また、解析においても同様な傾向となっている。

試験において、中央主桁の切り欠き部近傍で水平方向に最大の応力を発生した。この点の荷重～応力曲線を図-7に示す。200tf荷重時には試験では約2150kgf/cm²の応力を発生したが、解析では約2500kgf/cm²の応力値となり、若干解析値の方が大きいもののほぼ同様な値となった。また試験での除荷においては、荷重時とほぼ同様な応力履歴を示しており、除荷後の残留応力はほぼ0kgf/cm²となった。ところで、解析での発生応力2500kgf/cm²は部材の許容応力度 $\sigma=2400\text{kgf/cm}^2$ を越えているが、これは箱桁下フランジの連結板を控えるための切り欠き近傍であり、局所的に応力が集中したものと考える(実設計では本箇所について切り欠きの変更による改良を検討している)。

図-8には200tf荷重時の中央主桁と箱桁ウェブの接合部近傍の箱桁ウェブ桁高方向の応力分布を示している。ここでは、中央主桁内のセグメント桁高方向の応力は箱桁ウェブに対するせん断応力となるが、これが箱桁ウェブに伝達されればウェブ内では桁高方向の応力となる。図-7で示したように、中央主桁での応力の流れから箱桁ウェブに伝達される荷重は下部の方で大きい分布となっている。また、試験値と解析値はほぼ同様な傾向を示している。

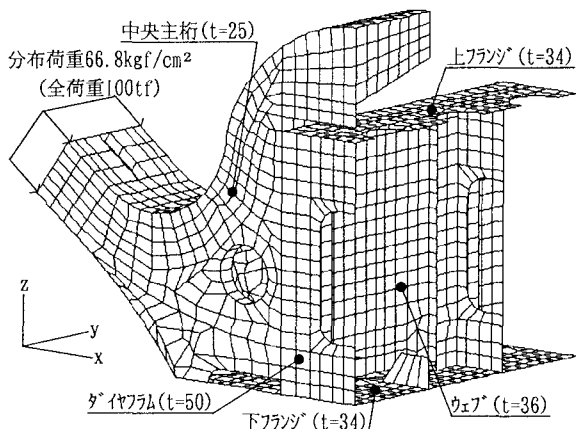


図-4 荷重試験体3次元FEM解析モデル(t:板厚 mm)

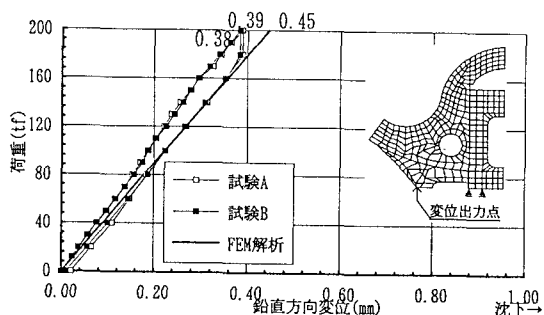


図-5 中央主桁下端における荷重～変位曲線
(試験A、Bは試験体の対称位置にある計測点を示す)

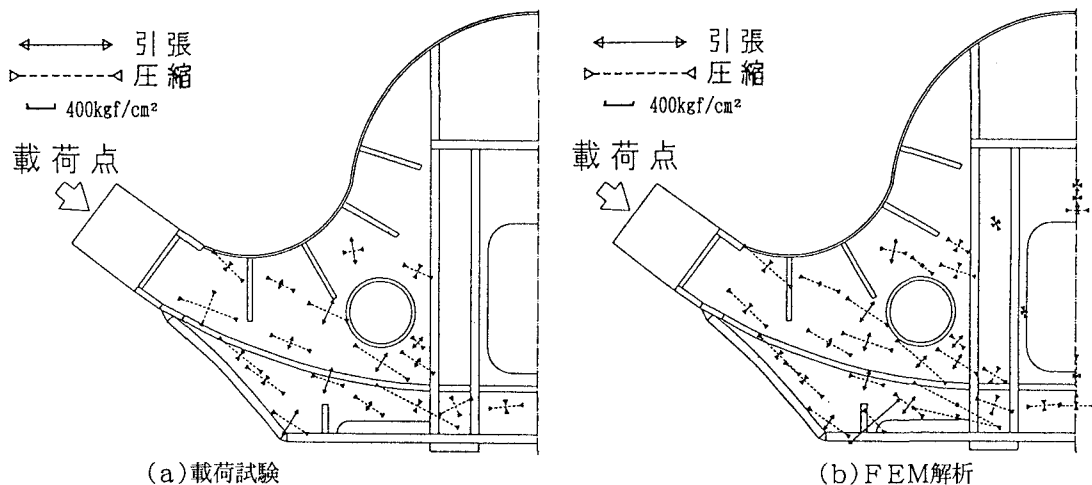


図-6 中央主桁主応力ベクトル図

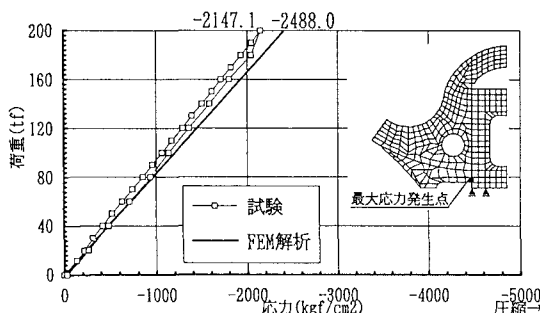


図-7 最大応力発生点荷重～応力曲線

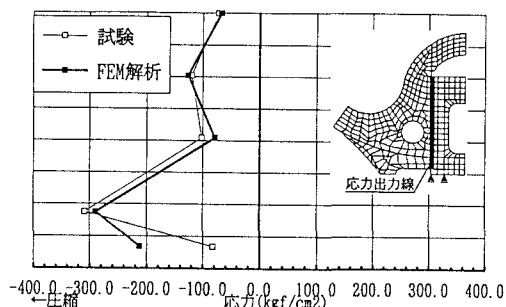


図-8 箱桁ウェブ桁高方向応力分布(200tf載荷時)

以上のことから、本中央部セグメントは側部セグメントからの伝達荷重に対して十分なつり合わせ機能を有しており、また箱桁への伝達も十分であることが確認された。さらに、FEM解析値は試験値に対して約15%程度大きな値となっているものの試験結果の傾向をよく表現しており、試験で再現できない様々な荷重条件に対しては、FEM解析を用いて検討することが有効であるものと判断された。

4. 実荷重を想定した中央部セグメントの3次元FEM解析

4. 1 解析条件

载荷試験では、本覆工構造における側部セグメントからの入力荷重(軸力)に対して、中央部セグメントの挙動を検討した。そこで次に、実際に作用すると想定される実荷重に対しての中央部セグメントの挙動を3次元FEM解析によって検討することとした。

解析モデルを図-9に示す。完成時の本覆工構造では、中柱スパン4mにて中央部セグメントがトンネル軸方向に連結された構造となっている。そこで解析モデルにおいてはその対称性を考慮して、トンネル軸方向長さ2mを有する1/4モデルとした。

セグメント間の連結は以下のように取り扱う。本覆工構造では、トンネル軸方向には中央部セグメント内の箱桁の連結によって梁構造を構築している。そこで箱桁については、セグメント間で完全に連結しているものとした²⁾。次に、地山側となる外周部においては、構造的には図-10(a)に示すような特殊なH形状部材を配置し、そのフランジ部を相ジャクリ形状にした嵌合方式としている³⁾。しかし、これについては設計上の強度は期

待せず、止水性の確保を目的としているため、解析では同図(b)に示すように部材のみをモデル化し、応力の伝達などは考慮しないものとした。

解析に用いた荷重条件を図-11に示す。荷重値は、別途行った2次元フレーム解析より算出した。側部セグメントからの伝達荷重(軸力、曲げモーメント、せん断力)をセグメント張り出し部に、セグメント本体に作用する鉛直土水圧をセグメント外周部に作用させた。なお、水平土水圧については、本箇所がくびれ部となり荷重値が非常に小さくなることから、今回の解析では考慮しないものとした。解析に用いた材料定数は弾性係数 $E=2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.30$ とした。また、主要部材板厚は図-9に示すものとした。

4. 2 解析結果

図-12に解析全体の変形結果を示す。図では変形モードを確認するために、実際の変位の100倍の変形図を示している。解析の結果、中柱上のセグメントにおいてはセグメント本体のつぶれ量は 0.94mm と小さく、張り出し部で 1.39mm の沈下となっている。これに対して中柱スパン中央のセグメントは、セグメント本体の変形量は小さいものの、全体の沈下量は約 2mm 弱となっている。これはトンネル軸方向の箱桁梁のたわみ量に相当するものである。

図-13では、解析モデルで最大の応力を示した中柱上セグメントの中央主桁と箱桁ウェブ、ダイヤフラムとの接続部の応力分布を示している。(a)に示す水平方向の応力分布では、ダイヤフラム上端から下端に向かって引張→圧縮→引張→圧縮となっている。これは、中央主桁に作業用ハンドホールがあるためであると考えられる。(b)に示す桁高方向応力では、支点近傍に約 2400kgf/cm^2 前後の応力が発生しているが、これは中央主桁の切り欠き、および中柱支持点の近傍であるため、解析上応力が集中したものであると考える。

以上のことから、本中央部セグメントは想定される実荷重下においても、構造的に十分な剛性と強度を有しているものと思われる。

5. あとがき

今回は、本覆工構造で用いる中央部セグメントに対して、期待される諸機能の確認のために載荷試験および

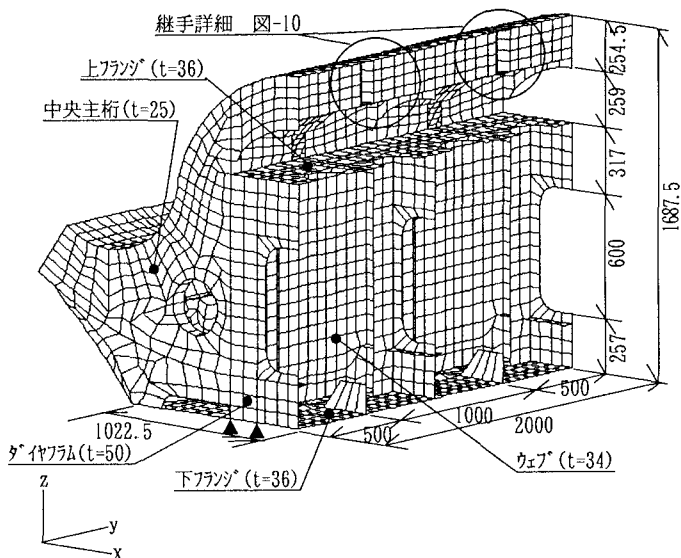


図-9 実荷重を想定した3次元FEM解析モデル
(▲:中柱を想定した支持点 単位:mm)

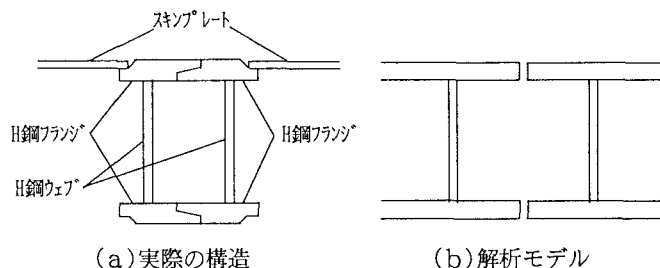


図-10 中央部セグメント外周部リング間継手構造

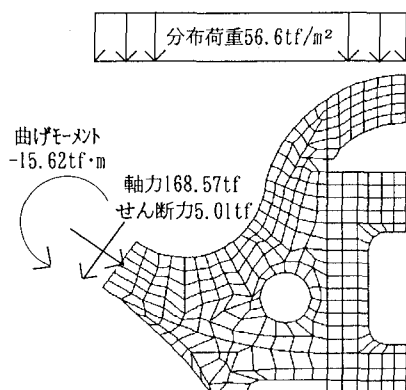


図-11 解析で用いた荷重条件

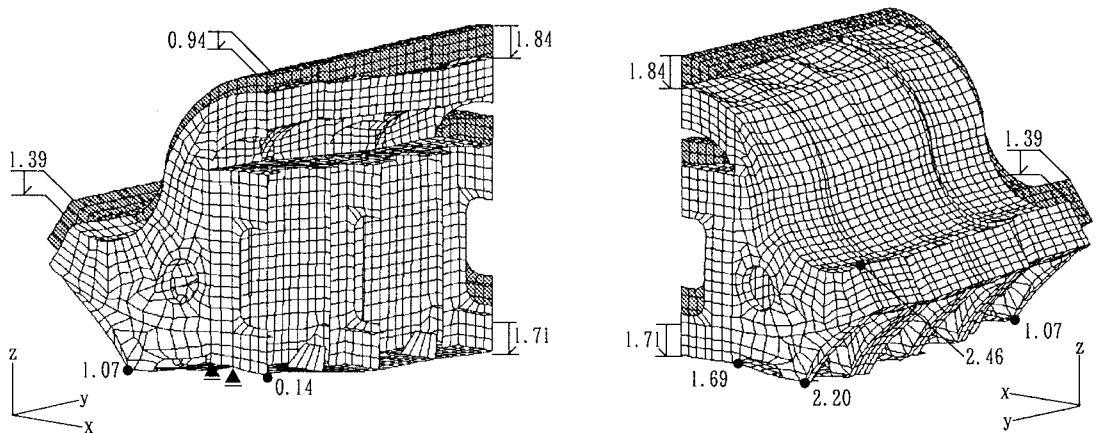


図-12 変形モードおよび鉛直方向変位量
(▲:中柱を想定した支持点 変形倍率100 正:沈下 単位:mm)

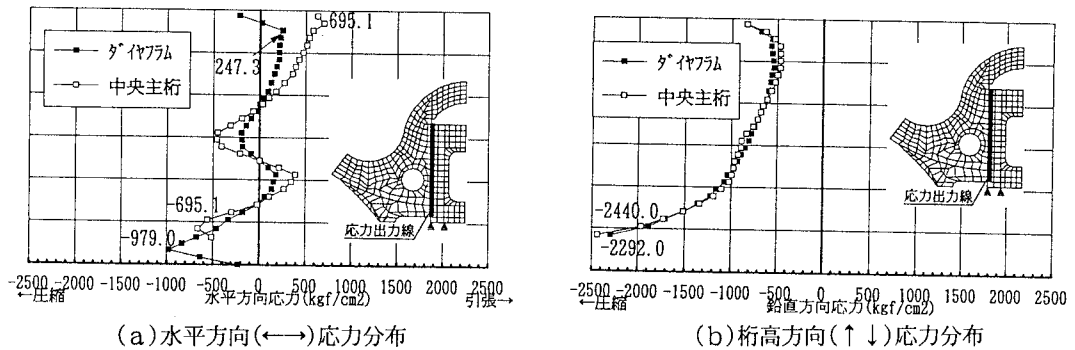


図-13 ダイアフラム、中央主桁接合部応力分布

3次元FEM解析を行った。その結果、本セグメントは構造的に十分な剛性と強度を有していることが確認された。また、実荷重を想定した3次元FEM解析の結果、本中央部セグメントおよび箱桁梁においては構造的に特に大きな問題はないものと推定された。今後は、さらに本覆工構造全体に関する検討を行う予定である。

本研究に関しては、これまでに東京理科大学松本嘉司教授をはじめ多くの有識者の方々にご指導を頂きました。また、載荷試験をはじめ本セグメントの検討に際して新日本製鐵(株)の御協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

6. 参考文献

- 1) 福島昭男:21世紀の交通ネットワーク拡大を目指す新技術(2)、都営地下鉄12号線環状部、トンネルと地下、pp.41~54、1994.1.
- 2) 堤多喜男、松本吉雄、小浦場博、粥川幸司:多円形シールド工法を活用した駅部トンネルの覆工構造解析、トンネル工学研究発表会論文・報告集第3巻、pp.103~110、1993.11.
- 3) 小山幸則、園田徹士、中村稔:自動化・省力化に適したセグメントの開発、トンネルと地下、vol125、no.3、pp.23~32、1994.3.