

シールドトンネルにおけるセグメント継手の3次元FEM解析 3-DIMENSIONAL FEM ANALYSIS OF SEGMENT JOINT IN SHIELD TUNNEL

小山幸則*・岡野法之*・清水 満**
Yukinori KOYAMA, Noriyuki OKANO and Mitsuru SHIMIZU

When it would be used beam-spring frame model for design of shield tunnel, we usually consider rotational coefficient of radial segment joint. To be obtain the rotational coefficient, we performed bending tests of radial segment joint for flat type segment and box segment made of concrete, then simulation analysis based on reinforced concrete theory. However, in the simulation, there were cases not corresponded with the tests.

To solve the problem, we simulated the test by 3-dimensional FEM analysis. The segment and joint steel in flat type were modeled by solid and shell element respectively.

Keywords : shield tunnel, radial segment joint, simulation, 3-dimensional FEM

1. まえがき

シールドトンネルのセグメントの設計においては、セグメントリングを剛性一様と仮定する慣用計算法が現在まで多く用いられてきた。しかし、新形式のセグメントの評価、大断面あるいは特殊断面のセグメント覆工への対応など、実物のセグメント覆工の挙動を比較的正確に表現できる梁・ばねモデルによる構造計算を必要とすることが多くなっている。筆者らは、梁・ばねモデルに入力する継手部の回転ばね定数を求めるために実物大セグメントの継手曲げ試験を行ってきた。この結果を、継手ボルトを引張鉄筋とみなした鉄筋コンクリート理論による解析結果と比較すると、実験条件によっては大きな解離を生じる場合のあることがわかった。

そこで、実験で用いたセグメント（桁高300mmのRC平板形および桁高550mmのRC中子形）を対象に、継手曲げ試験を模擬したモデルを作成し、3次元弾性FEM解析を行い、目開き、中立軸の位置、ボルト軸力など、セグメント継手の回転ばね定数に関する項目について、解析結果と実験結果との比較を行った。ここでは、それらの結果について報告する。

2. 解析方法

2.1 解析対象

解析の対象としたセグメントは、平成3年度に実施した実物大セグメント継手曲げ試験で用いたものうち、2段ボルトの鋼板継手を2つ持つ桁高300mm、幅1,000mm、長さ2,400mmのRC平板形セグメントおよび上段2個、下段3個のボルトをもつ桁高550mm、幅1,000mm、長さ2,400mmのRC中子形セグメントである。

* 正会員 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部

**正会員 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部

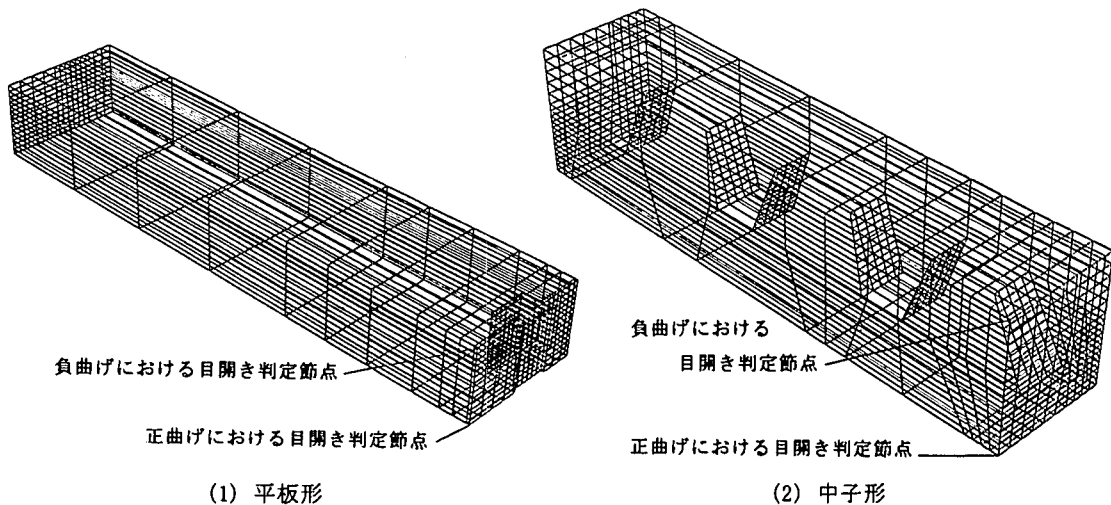


図-1 解析モデルのメッシュ鳥瞰図

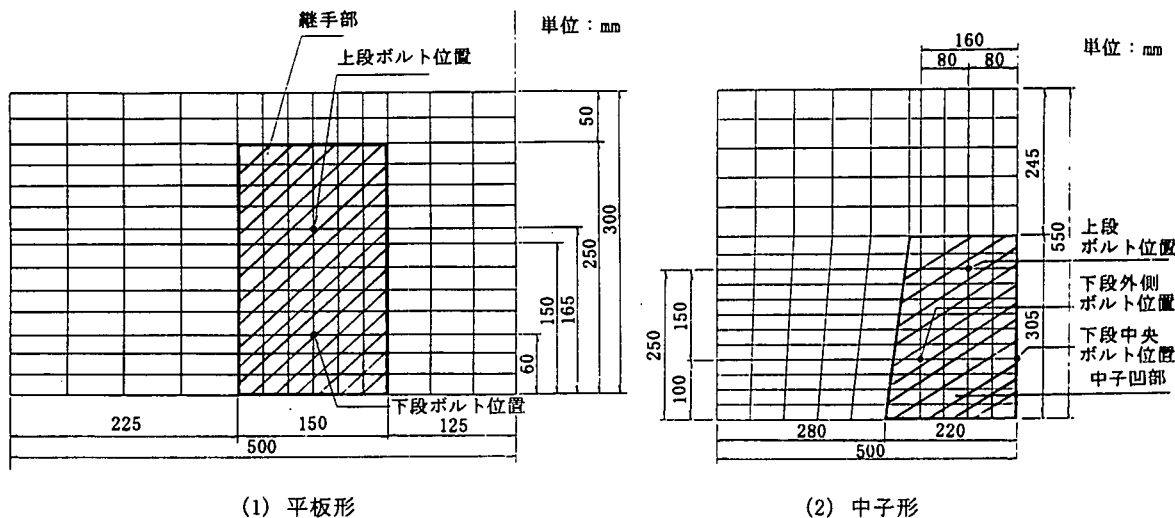


図-2 解析モデルの正面図

2.2 解析モデル

セグメント覆工の挙動を正確に把握するため実験で用いた供試体をできるだけ精密に、対称条件を考慮して4分の1のモデルを作成した。セグメントのコンクリート部分はソリッド要素で、平板形セグメントにおける継手部の鋼板は薄肉シェル要素でモデル化した。鉄筋はコンクリートと区別してモデル化することはせず、材料特性はコンクリートのものを用い、線形弾性とした。そして、継手面には接触要素を用い、その接触および剥離を表現した。解析モデルを図-1に示す。

また、ボルト、ナット、ワッシャーおよびボルト近傍の鋼板（平板形セグメントのみ）を文献²⁾に基づいて、複合ばねとして評価した。

表-1 入力物性値

	弾性係数 E (tf/m ²)	ポアソン比 ν
コンクリート	3.32×10^6	0.17
金物継手	2.10×10^7	0.30

表-2 継手板のばね定数

平板形		中子形	
離間前	離間後	上段ボルト	下段ボルト
5.19×10^6	2.78×10^5	3.46×10^4	4.98×10^4

2.3 入力物性値

解析に用いた物性値を表-1および表-2に示す。
 なお、コンクリートの弾性係数は実験値より求めたものである。

2.4 解析ケース

解析は実験と同様に、載荷方法を正曲げおよび負曲げとし、導入軸力を0、50および150tfとした。解析ケースの一覧を表-3に示す。なお、解析におけるインクリメントは原則として、

平板形では正曲げ、負曲げとも1.5tf・mとし、中子形では正曲げで5.0tf・m、負曲げで2.5tf・mとした。

表-3 解析ケース

セグメントタイプ	ケースNo.	載荷方向	導入軸力	最終曲げモーメント
平 板 形	I-1	正曲げ	0 tf	6.0 tf・m
			50 tf	12.0 tf・m
			150 tf	22.5 tf・m
	I-2	負曲げ	0 tf	6.0 tf・m
			50 tf	12.0 tf・m
			150 tf	21.0 tf・m
中 子 形	II-1	正曲げ	0 tf	25.0 tf・m
			50 tf	35.0 tf・m
			150 tf	50.0 tf・m
	II-2	負曲げ	0 tf	7.5 tf・m
			50 tf	17.5 tf・m
			150 tf	40.0 tf・m

3. 解析結果

3.1 RC平板形セグメント

(a) 正曲げ

曲げモーメントと継手部目開き量の関係を図-3に示す。

軸力のある場合の実験結果をみると、載荷と同時に目開きが生じてしまっている。理論的には、継手部目開きはセグメント下縁の応力が0にならなければ生じないので、実験上の誤差が含まれていると考えられる。

実験結果がこのような傾向となった原因として、継手回転角の算出を π ゲージの変化量から行ったため、圧縮ひずみの減少も目開きとして、おおよそ本実験が正・負曲げ試験を何回か実施した後のものであり、そのため、継手部近傍のコンクリートの多少のひび割れや交番載荷による上下端部の塑性変形もしくは凹凸の平滑化が発生し、あたかも凸曲面同士の接合のような挙動を示し、軸力作用下でも僅かな曲げ荷重で目開きが生じた可能性などが考えられる。

しかしながら、解析における目開き発生後（実験では勾配変化点後）の傾きはほぼ等しく、本モデル解析の適用性が確認できた。

次に、曲げモーメントと中立軸位置の関係を

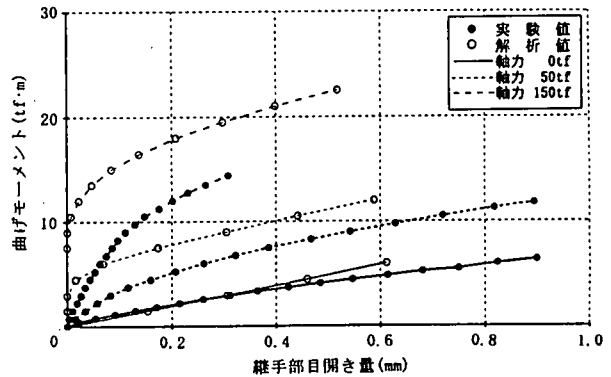


図-3 曲げモーメントと継手部目開き量の関係
 (平板形・正曲げ)

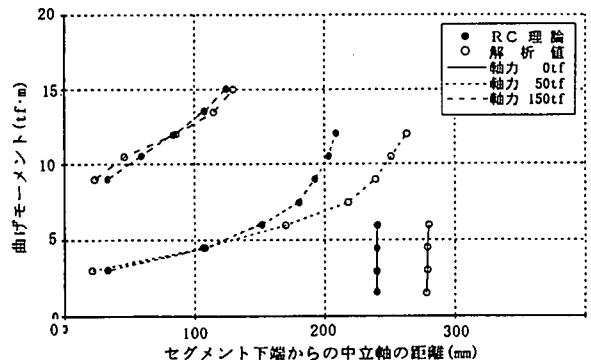


図-4 曲げモーメントと中立軸の関係
 (平板形・正曲げ)

図-4に示す。

実験では中立軸の位置を求めるための十分な計測値が得られなかったため、RC理論により求めた中立軸（下段ボルトのみ考慮、 $n=6.33$ ）を示した。

軸力0の場合、RC理論より求めた中立軸位置はセグメント下端から24.0cmであるのに対し、解析値は約28cmであり約4cm上縁側にある。

軸力50tfおよび150tfでは、モーメントが小さいときはRC理論より下縁側に位置し、ある曲げモーメント（軸力50tfの場合で約4.5tf・m、軸力150tfの場合で約12tf・m）を境にRC理論より上縁側に位置している。このことは、初期の段階ではボルト締め付け力により、継手板とその周辺にある程度のプレストレスが働くためと思われる。

また、特に軸力50tfの場合、曲げモーメントが最終値に近づくに従って、RC理論の中立軸より解析値の方が上縁側になりその差が大きくなるが、これは継手板の変形が大きくなるためと考えられる。

3ケースとも解析で求めた中立軸とRC理論により求めた中立軸とは異なることから、継手板を考慮せず、ボルトを鉄筋と見立てたRC理論により求めた中立軸はセグメント継手の実際の中立軸と異なるものと考えられる。

曲げモーメントと継手回転角の関係を図-5に示す。

継手回転角は継手部の目開きが生じなければ0であるが、継手面における圧縮ひずみ減少も目開きとして計算をしているため、実験では軸力ありの場合でも載荷と同時に継手回転角も生じることになっている。

しかし、継手部目開きと同様、解析における目開き発生後（実験では勾配変化点後）の傾きはほぼ等しく、ここでも本モデル解析の適用性が確認できた。

また、最終的な傾き（回転角 0.2×10^{-2} rad付近）は軸力の違いによらず、ほぼ等しいと見なすことができ、軸力に依存しないことがわかる。

曲げモーメントと上段および下段ボルト軸力の増分の関係をそれぞれ図-6および図-7に示す。

上段ボルトの場合、いずれの解析値も実験値と傾向が異なっている。その原因としては、ボルト軸力の増分を剛体側節点の反力により求めていることが考えられる。また、下段ボルトの場合、軸力が大きい場合は

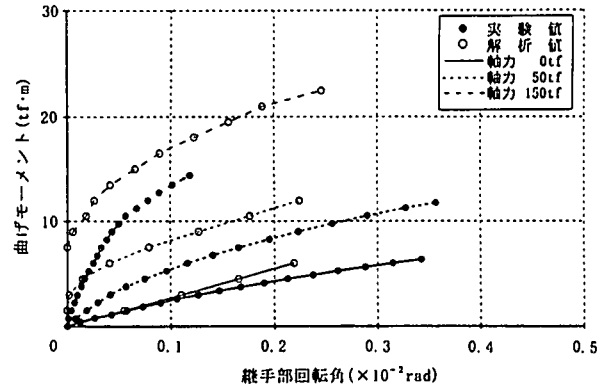


図-5 曲げモーメントと継手部回転角の関係
(平板形・正曲げ)

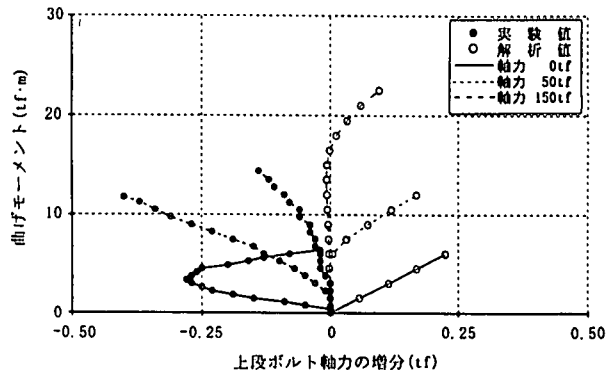


図-6 曲げモーメントと上段ボルト軸力の関係
(平板形・正曲げ)

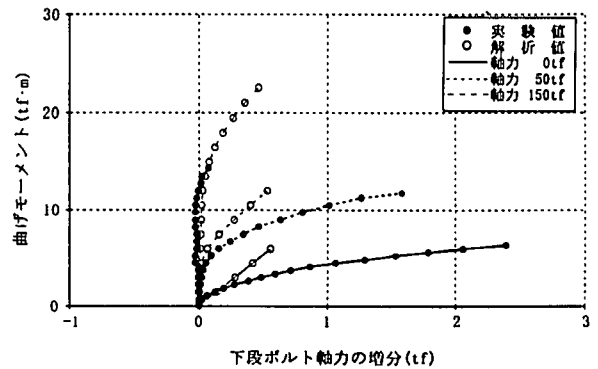


図-7 曲げモーメントと下段ボルト軸力の関係
(平板形・正曲げ)

ほぼ傾向が合うが小さくなると解析値と実験値の間の差が大きくなっていく。

(b) 負曲げ

曲げモーメントと継手部目開き量の関係を図-8に示す。

正曲げの場合と同様、軸力のあるケースにおいて、実験では載荷と同時に目開きが生じてしまっているが、実験値と解析値は比較的良好一致している。

曲げモーメントと中立軸位置の関係を図-9に示す。

軸力0の場合でも中立軸位置が変化しており、軸力50tfの場合は最終の曲げモーメント12tf・mのとき極端に上縁側に変化している。

曲げモーメントと継手回転角の関係を図-10に示す。

いずれの軸力においても曲げモーメントが小さい範囲では実験値の方が傾きが小さいが、曲げモーメントの大きな範囲では、実験値と解析値の傾きは非常によく一致している。また、正曲げの場合と同様、最終的な傾き（回転角 0.3×10^{-2} rad付近）は軸力の大きさによらずほぼ等しい。

3.2 RC中子形セグメント

曲げモーメントと中立軸位置の関係を図-11に示す。

正曲げについてみると、軸力0tfの場合は一定の傾向が見られないが、軸力50および150tfの場合は曲げモーメントが大きくなるにしたがって、曲線の傾きも大きくなっていくことがわかる。

負曲げの場合は、正曲げの場合と異なり、いずれの軸力のケースにおいても曲げモーメントと中立軸はほぼ比例関係にあるといえる。これは、中子形の負曲げの場合、圧縮側が断面欠損部となり、曲げモーメント増加に伴う圧縮断面の減少が正曲げに比べ大きいためと考えられる。

また、正曲げ、負曲げによらず、軸力0でも曲げモーメントの増加に伴い上縁の方へ移動するので、RC理論が適用できない。

曲げモーメントと継手部回転角の関係を図-12に示す。

平板形と同様、実験では載荷と同時に目開きが生じるようになっていたため、継手回転角も生じてしまっている。目開きが生じた後の実験値と解析値の傾きは、鋼板継手の場合に比べて差があるが、比較的良好一致している。

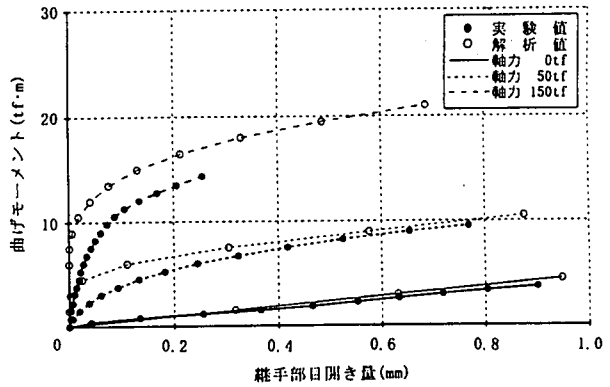


図-8 曲げモーメントと継手部目開き量の関係
(平板形・負曲げ)

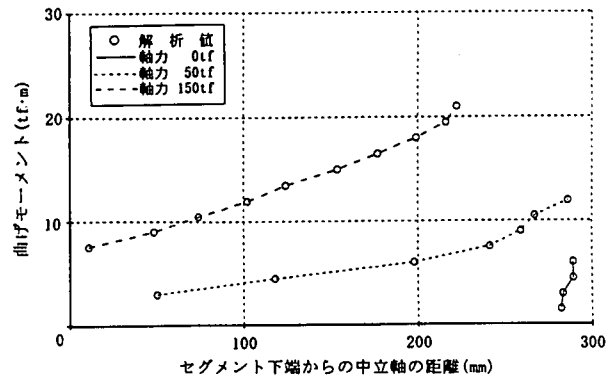


図-9 曲げモーメントと中立軸の関係
(平板形・負曲げ)

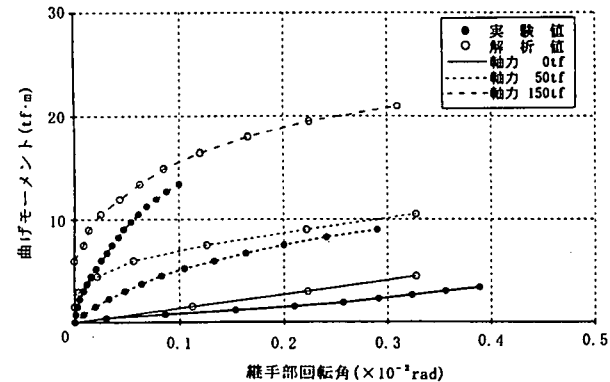
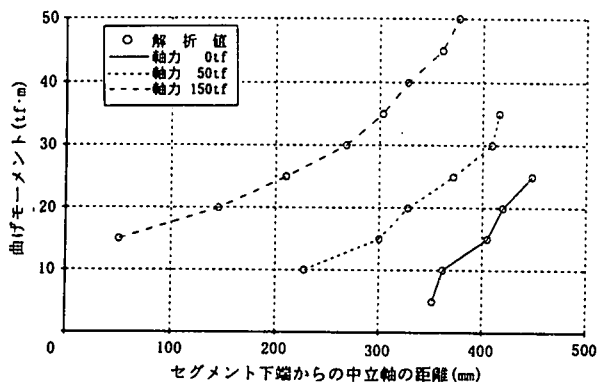
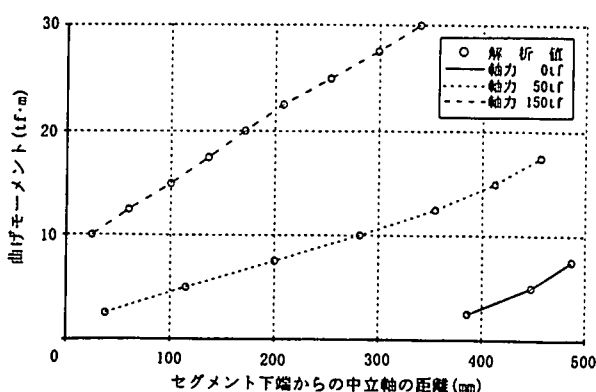


図-10 曲げモーメントと継手部回転角の関係
(平板形・負曲げ)

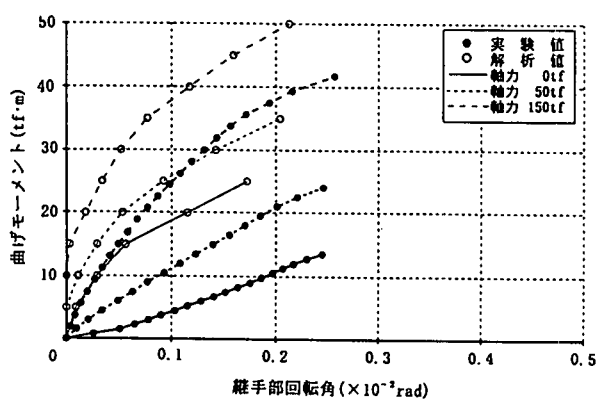


(a) 正曲げ

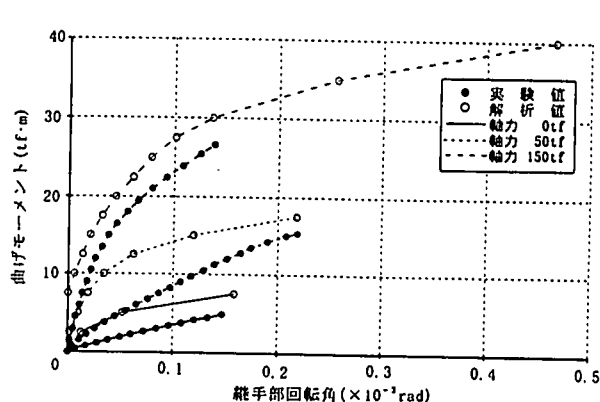


(b) 負曲げ

図-11 曲げモーメントと中立軸の関係 (中子形)



(a) 正曲げ



(b) 負曲げ

図-12 曲げモーメントと継手部回転角の関係 (中子形)

致している。

特に、曲げモーメントの小さい範囲で実験値と解析値に差があるが、ボルト等とコンクリート面のなじみ等の継手部の特性により、実験誤差が大きく生じてしまったためであることも考えられる。

4. 結論

実験値の評価方法などに問題があるものの、セグメントの継手曲げ試験をモデル化した3次元弾性FEM解析を行って得られる回転ばね定数は、概ね実験値に近い値を与えるといえ、本解析モデルを用いれば、実験を行わなくてもセグメント継手の設計用の回転ばね定数が求められると考えられる。ただし、目開き発生前については、実験値の評価、モデル化できていない継手面表面近傍の形状および材料特性等について検討を深度化する必要があることがわかった。

今後は、得られた結果から3次元FEM解析によらず、簡易なモデルにより精度よく、セグメント継手の回転ばね定数の推定を行える方法についても検討を進めていくこととしたい。

[参考文献]

- 1) 小山幸則・松本吉雄・稲垣利治：シールドセグメント継手試験と継手ばね定数の検討，トンネル工学研究発表会論文・報告集第4巻，pp. 187～192，1994. 11.
- 2) 村上博智・小泉 淳：シールド工用セグメントのセグメント継手の挙動について，土木学会論文報告集，pp. 73～86，1980. 4.