

シールド掘進に伴う洪積砂層における付加土圧 発生機構の実験研究

Centrifuge model test on the additional earth pressure due to shield driving in diluvial sandy layer

○ 西村 均¹⁾・中橋貞雄²⁾・黒川信子³⁾・田中 弘⁴⁾

Hitoshi NISHIMURA, Sadao NAKAHASHI, Nobuko KUROKAWA, Hiroshi TANAKA

To investigate influences on neighboring structures during shield driving, centrifuge tests reported here were performed at a centrifugal acceleration of 70G using 1/70th scale shield machine model in diluvial sandy layer. In a series of the tests where shield machine plate friction, overburden pressure and shield thrusting speed were parameters, earth pressure surrounding a shield machine and bending moment of neighboring existing model piles were measured during shield driving. Based on the test results, we evaluated the distribution of the additional earth pressure surrounding a shield machine and relation with the distance from the machine. Behavior of the existing neighboring piles was analytically simulated by using a beam-spring model applied on the additional earth pressure.

Key Words: shield tunnelling, additional earth pressure, neighboring construction, Centrifuge model test

1. 研究目的

最近のシールド工法は、その機械的性能および施工技術の向上によって、周辺への影響を低減することに成功してきた。しかしながら、地下空間利用が進む昨今、特に既設地下構造物が輻輳している都市部においては近接施工の問題がシールド工法の大きな関心事の一つになっている。シールド掘進に伴う近接施工の影響要因を模式すると例えば図-1 のようになる¹⁾。これまでのシールドトンネル近接施工に関する影響検討は、テールボイド部での地山応力解放による周辺地盤変状に着目した数値解析検討が主流であった²⁾。これは、シールドと他構造物の離隔が極端に小さくなければ、テールボイド部の応力解放による影響が、切羽部での泥水・泥土圧の影響やシールド通過時の影響よりも大きくなるためである。しかし、離隔が極端に小さな場合には、切羽部での泥水・泥土圧やシールド通過中にシールド機と周辺地山間の摩擦により生じると考えられる付加土圧の問題も無視できなくなることが近接施工の現場測結果より認められている³⁾。

今後、シールドの近接施工が増えることは確実であり、これまでよりも厳しい近接条件での施工が必要となる可能性も考えると、シールド掘進による地盤内付加土圧の評価方法の確立が重要な課題となる。著者らは、特にシールド機通過時の付加土圧の発生機構に関する実験検討⁴⁾⁵⁾、数値解析検討⁶⁾⁷⁾を実施しており、本報告では遠心載荷実験による実規模

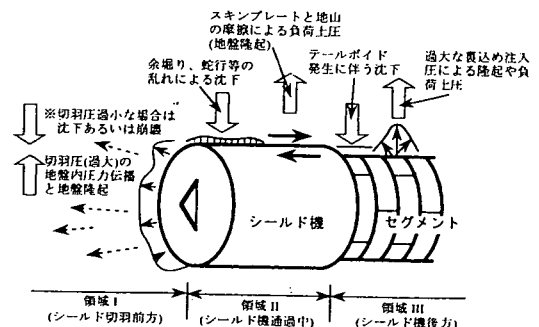


図-1 シールド掘進に伴う近接施工影響要因

¹⁾ 正会員 中部電力(株) 電力技術研究所構築グループ

²⁾ 日本工営(株) 中央研究所試験研究部

^{3) 4)} 正会員 日本工営(株) 地盤構造部

[illegible]

図2 平面図

表-1 実験ケース

Case	地盤条件	上被り厚H (D:管径)	シールド機械 型表面粗度	掘進速度
1	凝間熱田砂砾 密度大 $\rho_d=1.578\text{g/cm}^3$, D値=95%	H=10m (H/D=2)	滑条件	14cm/min
2	凝間熱田砂砾 密度大 $\rho_d=1.578\text{g/cm}^3$, D値=95%	H=20m (H/D=4)	滑条件	14cm/min
3	凝間熱田砂砾 密度小 $\rho_d=1.471\text{g/cm}^3$, D値=89%	H=20m (H/D=4)	溜条件	14cm/min
4	凝間熱田砂砾 密度大 $\rho_d=1.578\text{g/cm}^3$, D値=95%	H=20m (H/D=4)	粗条件 (標準砂貼付)	14cm/min
5	凝間熱田砂砾 密度小 $\rho_d=1.471\text{g/cm}^3$, D値=89%	H=20m (H/D=4)	粗条件 (標準砂貼付)	14cm/min
6	凝間熱田砂砾 密度大 $\rho_d=1.578\text{g/cm}^3$, D値=95%	H=20m (H/D=4)	溜条件	3.5cm/min

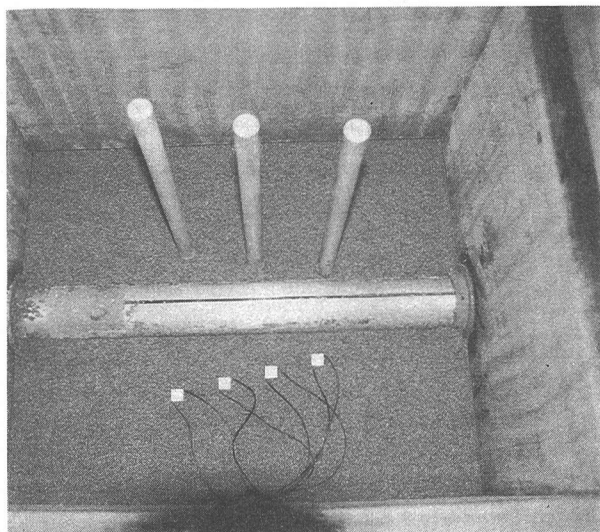


写真1 モデル地盤の作製

2. 実験概要

(1)実験装置：実験に用いた遠心載荷装置は幅 1m×奥行 80cm のプラットフォームを有する回転半径 2.6m、最大遠心加速度 250G、遠心容量 100G・ton の装置である。図-2 にシールド掘進模型装置の全体図を示す。電力洞道用のシールド機として外径 5m、機長 7m の実機を想定し、模型縮尺が 1/70、遠心加速度 70G 場での遠心載荷実験により実規模相当のシールド施工を再現させた。シールド通過中の周辺地盤への付加土圧の発生挙動に着目したため、シールド機外面を模擬した外管(肉厚 $t=1\text{mm}$)を内管に沿って進行させることでシールド掘進をモデル化した。したがって、この実験モデルでは切羽部での掘削過程は再現されていない。外管は内管のスリット部を通して内部の受圧部に連結されており、土槽外部より 90W の AC モーター及びスクリージャッキとロードセルを介して受圧部を押すことにより一定速度で外管を 40cm(実物距離では 28m)進行させた。遠心載荷によるモデル地盤の自重沈下に追従できるよう、シールド機模型はベアリングを介して土槽外面にスライド固定させた。また、シールド設置圧の影響を実物と合わせるために、模型シールド機の重量は実物シールド機の密度に合わせて作製した。

—436—

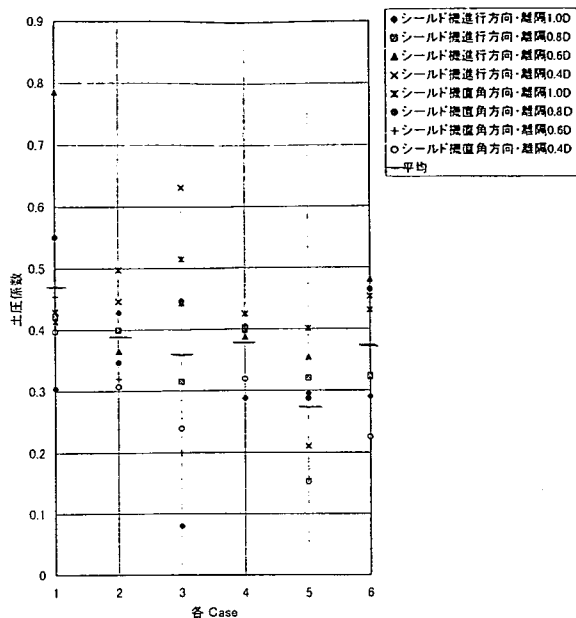


図-3 各Caseでの静止土圧係数 K_0

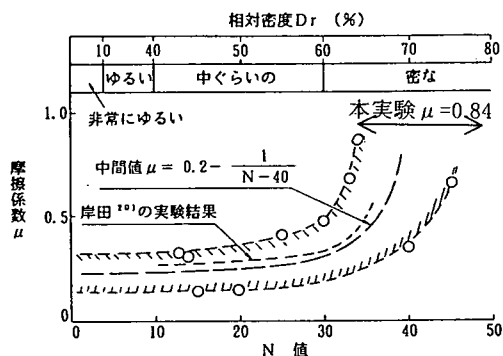
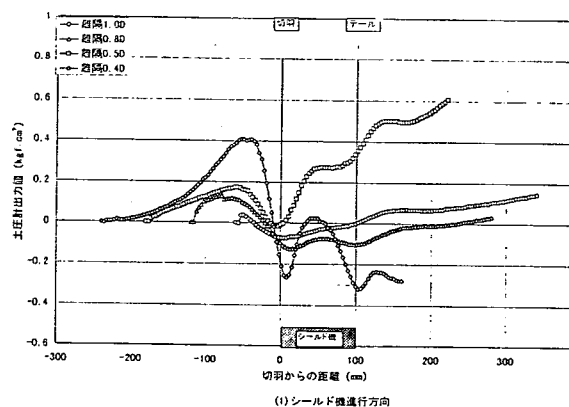
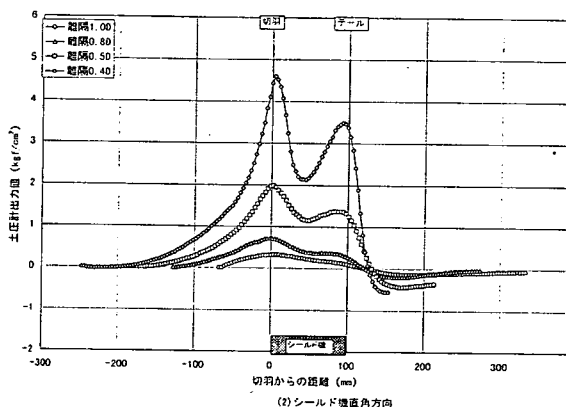


図-4 N値と摩擦係数 μ (砂質土)



(1) シールド機進行方向



(2) シールド機直角方向

図-5 切羽からの距離と土中土圧値(case2)

則により曲げ剛性 EI を合わせたアルミ材料で作製した、模型杭内面にひずみゲージを貼付してシールド進行方向及びその直角方向の曲げモーメントを測定した。シールド機からの離隔は 0.1, 0.2, 0.5D である。

(2) 地盤試料：実験に用いた試料は、洪積地盤である熱田層上部砂質土層より採取した熱田砂であり、平均粒径 $D_{50}=0.30\text{mm}$ 、均等係数 $U_c=88$ のほぼ均一な粒度を示す。この地層は不攪乱状態では固結しており、ダイレイタンスー特性はやや密詰め砂の挙動を示す。遠心実験では模型地盤を締め固めて作製するため、事前の三軸圧縮試験より締め固め D 値 95% 密度においてダイレイタンスー挙動とせん断強度が原位置不攪乱状態とほぼ等しくなることを確認した。

(3) 実験ケース：地盤条件(密度)、土被り厚 H、模型シールド機表面の粗度、掘進速度をパラメータとした表-1 に示すケースを実施した。実地盤相当のダイレイタンスー特性が得られる密詰め地盤(D 値 95%)と緩詰め地盤の 2 種類を想定し、模型シールド機表面粗度はシールド実機に近い滑条件と、その表面に標準砂を接着剤により貼り付けた粗条件を扱った。シールド進行速度は一般的なせん断試験条件を考慮して 2mm/min を標準としたが、実際のシールド掘進速度(0.5mm/min)相当の Case6 により、速度による影響はほぼ無いことを確認している。

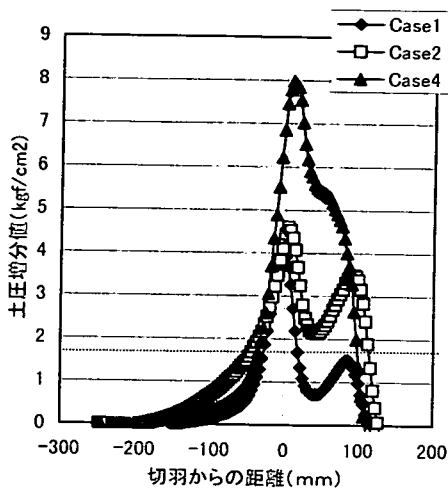


図-6 土圧増分値の比較

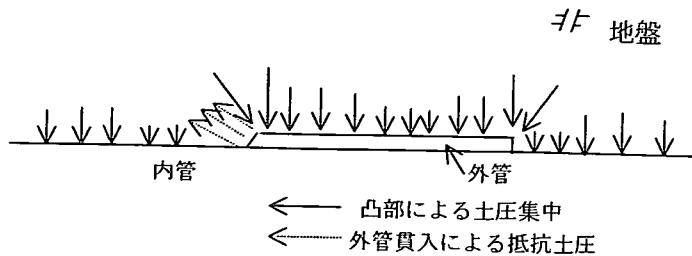


図-7 土圧分布

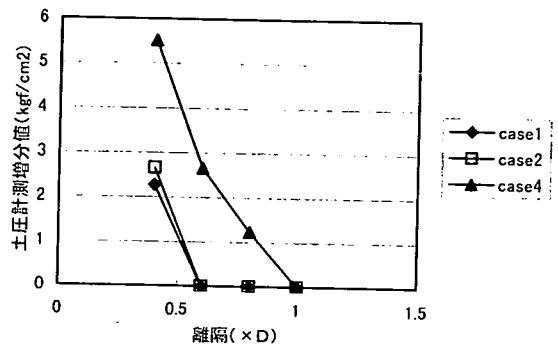


図-8 離隔と土圧分布

3. 実験結果

3.1 遠心実験での実現場の再現性について

(1)地盤条件：模型シールドを進行させる前の、遠心力 70G 場での定常状態における土中土圧計測値より算定した各ケースの静止土圧係数 K_0 を図-3 に示す。緩詰め Case3 等ではばらつきが見られるものの、密詰めケースの平均値は $K_0=0.41$ 、緩詰めケースの平均値は $K_0=0.32$ である。実験対象地盤である熱田砂層の $\phi d=34.6^\circ$ よりヤーキーの式($K_0=1-\sin \phi$)から求められる静止土圧計数は $K_0=0.43$ となるから、密詰めケースでは対象地盤をほぼ再現できていると評価できる。

(2)模型シールド機の周面摩擦力：ロードセルで計測した模型シールド機の推進力 P と、土中土圧計測値に基づいて算定したシールド機外周面に対する垂直拘束圧 σ より、シールド機外周面と周辺地盤間の摩擦係数 μ を逆算すると、例えば Case2 の場合では $\mu=0.84$ が求められる。図-4⁴⁾に当てはめて評価すると、この摩擦係数のオーダーは N 値 40 程度、相対密度 $Dr=70\%$ 程度の比較的密な砂質地盤での周面摩擦力が再現されていることがわかる。

3.2 シールド通過に伴う付加土圧について

(1)遠心実験での付加土圧挙動：土中土圧値の計測例として、土被り厚 $H=20m$ 、模型シールド機表面滑条件で実施した Case2 の計測結果を図-5 に示す。図は各測点で得られた掘進開始時点からの土圧計測値増分値をシールド機部位に応じて示した経距離変化図であり、シールド通過時の付加土圧分布を示すものである。次節で考察するように、本実験ではシールドの切羽部における掘削過程はモデル化されていないため、切羽部より前方での実験結果は必ずしも実挙動を再現したものとは見なせないことに注意する必要があるが、遠心実験での付加土圧挙動では次の特徴が認められる。当然のことながらシールド機との離隔が小さいほど付加土圧は大きい。シールド機に向けたシールド進行直角方向の付加土圧挙動(同図(2))について言うと、切羽到達時点でピークを示し、その後一旦減少するが再度増加してテール通過直前に向けて 2 つ目の極大値を示す。離隔が大きくなるとこうした 2 山ピークの特徴が薄れてくる。一方、シールド進行方向の付加土圧成分は直角方向と比べてかなり小さく、切羽到達前にピーク値を示して到達時には極小値を示す。その後の通過時には

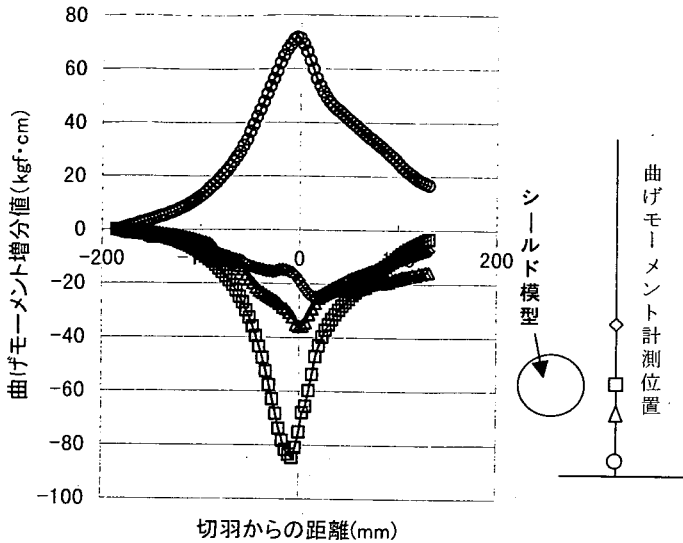


図-9 杭の曲げモーメント挙動例 (Case2)

表-2 入力定数

杭のE	$2.7 \times 10^5 (\text{kgf/cm}^2)$
杭のI	$2.49 \times 10^7 (\text{cm}^4)$
付加土圧P	土中土圧計測値より決定
地盤の E_0	$4.0 \times 10^2 (\text{kgf/cm}^2)$

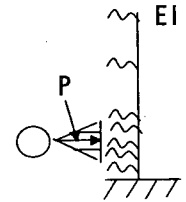


図-10 弾性ばね支承の梁モデル

若干の増加が見られる。

図-6 にシールドに最も近い離隔 0.4D のシールド進行直角方向の付加土圧について Case1,2 及び4を比較して示す土被り H が 10m (Case1) と 20m (Case2) の違いによる付加土圧ピーク値の差異は比較的小さい。付加土圧の発生をシールド機と周辺地盤間の摩擦に起因するものと考え、Case1,2 では摩擦係数 μ は同じであるから、摩擦による付加土圧値ピーク値の差が小さいということは両ケースでシールド機の周面拘束圧 σ がそれほど違ってないことを示す。これは、本実験では比較的密な砂質地盤としていることからゆるみ土圧が形成されているものものと考えられる。一方、模型シールド表面が滑 (Case2) と粗 (Case4) の場合には、明らかに後者の方が付加土圧の値が大きい。

(2) 実現場での付加土圧挙動：今回の実験では切羽部での掘削過程はモデル化されてなく、肉厚 1mm の外管が内管と周辺地盤との間に貫入する掘進方式を採用しているため、前述(1)の付加土圧挙動にはこの実験手法に起因する挙動が含まれていることになる。肉厚 1mm が突出している遠心実験のシールド機モデルの場合、図-7 に模式するような両端部での土圧集中が生じていることが推察される (例えば、土圧計計測で経験する場合と同様の考えによる)。このうちテール部側端部は実際とも近い状態と考えられるが、切羽側端部での土圧集中は明らかに今回の実験モデルに起因した付加土圧成分が含まれている。また、模型シールドの進行は外管の貫入によるものであるから、外管の切羽部にテーパを設けているものの貫入抵抗土圧成分も含まれていると考えられる。その結果、遠心実験のシールド進行直角方向の付加土圧挙動は、切羽部とテール部の 2 箇所のピークをもち、その間が減少したモードが特徴となって現れている。シールドとの離隔が大きくなるとこのモードの特徴が薄れてくるのは、土圧集中や貫入抵抗土圧の影響が小さくなるためである。

本実験モデルに起因する付加土圧成分の内、周辺地盤方向に肉厚 1mm の外管が押し出される際の土圧の大きさは、別に実施した大型圧密載荷実験結果より 1.8 kgf/cm^2 程度 (地盤密度で異なる) であることを確認している。図-6 にこの値を点線で併記しているが、遠心実験結果の付加土圧値からこれを除いた値が、実現場条件下でのシールド機周面と周辺地盤の摩擦に起因する付加土圧の近似値と評価できる。図-8 にこのように評価した付加土圧 (直角方向成分) とシールドとの離隔の関係を示す。滑の場合で 0.6D ～ 粗の場合で 0.7D 程度を境にしてシールド機通過中の付加土圧が発生する。

3.3 近接杭の挙動とシミュレーション

図-9 に近接杭の曲げモーメント挙動例として Case2 の測定結果を示す。前出の図-5 と同様に掘進開始時点からの曲げモーメント増分値をシールド機部位に応じて示した経距離変化図である。シールド通過中にシールド外側方向に向かって生じる付加土圧のために近接杭がシールド反対方向に曲げられる挙動が再現されている。

近接施工問題では既設構造物への影響を事前に評価できることが重要である。ここでは、近接杭の挙動解析モデルとして図-10に示すような弾性ばね支承の梁モデルを考え、土中土圧計測値より杭設置位置での付加土圧外力強さを求め、実験結果からは決定できない荷重分布を仮定して近接杭挙動のシミュレーションを実施した。

遠心実験条件に基づいて設定した解析定数は表-2に示すようである。また、地盤反力係数は道路橋示方書・同解説下部構造編に準じて設定した。

シミュレーション結果としてシールドに最も近接している(離隔0.1D)場合の曲げモーメント分布図を図-11に示す。

これより、付加土圧強度をシールド中心での荷重強度に当てはめ、シールド径の範囲に分布させた三角形分布荷重モデルが実験結果を最もよく表せている。

4. あとがき

シールド機外面と周辺地盤とのせん断に伴うシールド機通過中の付加土圧挙動に関する遠心載荷実験より、付加土圧挙動の特徴、ならびにシールド離隔との発生量の関係の概要が把握された。また、シールド掘進時の付加土圧による近接する杭の影響を事前に解析する場合は、弾性ばね支承の梁モデルと、付加土圧強度をシールド中心に与えてシールド径の範囲に三角形分布させた荷重モデルにより検討できることを検証した。今後、本報告でも考察を加えている実験モデルに起因する付加土圧成分を明確に分離して、シールド通過中の付加土圧発生機構についてとりまとめる計画である。

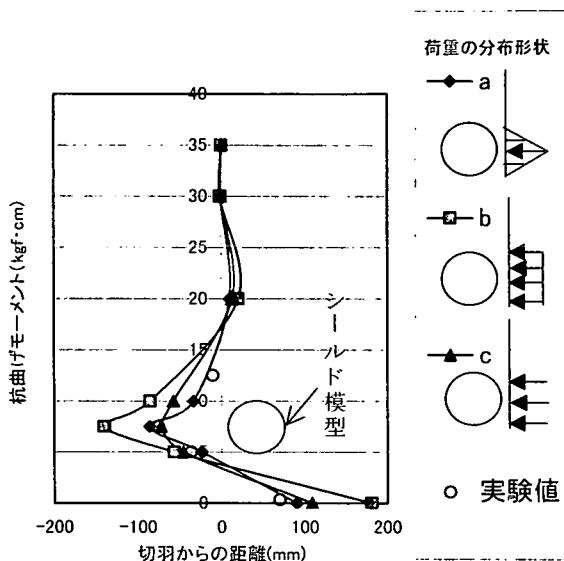


図-11 杭の曲げモーメント解析結果

参考文献

- 1) 伊東三夫、會田好雄：シールド工事に伴う近接施工について、下水道協会誌、Vol.33、No.402、pp.84-85、1996.8
- 2) 例えば、間片博之、神戸義雄、高橋良文、山田孝治、杉山仁實、田中弘：有限要素法によるシールド掘削に伴う地盤沈下解析(その2)、第15回土質工学研究発表会、pp.1553-1556、1980.6
例えば、小貫克彦、岡田仁、岡留孝一：シールド掘進時の地盤変状解析に用いる応力解放率についての一考察、土木学会第50回年次学術講演概要集、III-B661、pp.1322-1323、1995.9
- 3) 例えば、岸尾俊茂、葛野恒夫、高崎肇、山脇正啓：地下駅直下1mのシールド掘進、トンネルと地下、第26巻11号、pp.7-17、1995.11
例えば、山崎糸治、福島健一、小林隆、片岡進：世界初の超近接4線移行シールドの施工、トンネルと地下、第27巻2号、pp.7-16、1996.2
- 4) 西村均、奥田康三、中橋貞雄、阪本隆広、田中弘：シールド掘進に伴う負荷土圧発生機構の基礎研究(洪積砂層を対象とした大型一面せん断要素実験)、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集、III-B154、pp.308-309、1996.9
- 5) 西村均、三浦雅彦、中橋貞雄、田中弘：シールド掘進に伴う負荷土圧発生機構の基礎研究(洪積砂層を対象とした遠心載荷模型実験)、土木学会第52回年次学術講演会講演概要集、III-B100、pp.200-201、1997.9
- 6) 黒川信子、草深守人、田中弘、吉田保：シールド機と地盤の接触摩擦を考慮したシールド掘削解析、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集、III-B172、pp.344-345、1996.9
- 7) 黒川信子、草深守人、田中弘、吉田保：シールド掘進中の負荷土圧に伴う近接構造物への影響検討解析手法、トンネル工学研究論文・報告書、第6巻、pp.321-326、1996.11
- 8) 吉田保、山田孝治：泥土圧シールド掘進時の切羽土圧と周面摩擦力について、土木学会論文集、No.445/III-18、pp.75-82、1992.3