

シールド掘進に伴う付加土圧発生機構と影響範囲について

MECHANISM AND INFLUENCE OF THE ADDITIONAL EARTH PRESSURE DUE TO SHIELD DRIVING

西村 均¹⁾・中橋貞雄²⁾・伊藤圭一³⁾・黒川信子³⁾・田中 弘³⁾

Hitoshi NISHIMURA, Sadao NAKAHASHI, Keiichi ITOU, Nobuko KUROKAWA and Hiroshi TANAKA

To investigate induced earth pressures and influencing extent on neighboring structures during shield driving, the authors have carried out both large-sized direct shear tests for determining the friction of dense diluvial sands against shield skin plate and centrifuge tests of shield driving at a centrifugal acceleration of 70G using 1/70th scale shield machine model in a diluvial sandy layer. In this paper, at first the authors reviewed the past in-situ measurement results on the additional earth pressure surrounding a shield during shield driving, and compared these test results with in-situ measurement. The authors proposed one model of mechanism of the additional earth pressures during shield driving in dense diluvial sandy layer.

Key Words: shield tunnelling, additional earth pressure, neighboring construction, diluvial sand

1. はじめに

既設構造物が輻輳している都市部でのシールド工事では近接施工対応が大きな関心事の一つになっている。これまでのシールド工法による近接施工の影響検討は、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ものが一般的であった。これは、シールドと既設構造物と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伴う周辺地盤変状による影響が最も支配的となるためである。しかし、最近のシールド工事では、既設構造物との離隔が1D以下(D:シールド外径)という施工も希ではなく、このように離隔が極端に小さな場合には、切羽部での泥水・泥土圧の影響やシールド通過中にシールド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一部の近接施工の現場計測結果より認められている¹⁾。都市部においては、今後とも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施工条件での施工を余儀なくされる場合も多くなるものと考えられる。こうした場合に、過大な防護工で対応すること無く、安全な近接施工を実施するには、シールド掘進に伴う地盤内の付加土圧発生機構について解明し、付加土圧の大きさを事前に評価できる技術資料を準備しておくことが有効である。

著者らは、洪積砂質地盤でのシールド工事において、上述のシールド通過時の付加土圧挙動を体験したことから、特に、密な洪積砂質地盤を対象として、そのダイレイタンシー特性に起因するシールド掘進に伴う付加土圧の発生機構に関する検討をすすめてきた。これまでに、縦 80cm×横 80cm×高さ 50cm の大型一面せん断試験装置を用いて、洪積砂質地盤のせん断特性を再現させた模型地盤とシールドスキンプレート鋼板模型とのせん断実験や、実際の地山

1) 正会員 中部電力(株)電力技術研究所

2) 正会員 日本工営(株)中央研究所 土質研究室

3) 正会員 日本工営(株)地盤構造部

2. 実験検討概要と現場実測データ

図-1 に大型一面せん断試験装置概要を示す。シールドスキンプレート鋼板模型は、SS400 の平板とし、せん断面は圧延されたままの表面状態とした。せん断箱は縦 80cm×横 80cm×高さ 50cm の直方体で、熱田層上部砂質土層より採取した試料を密度管理により 7 層で締め固めて供試体を作製した。洪積砂質土層の原位置でのせん断特性の再現性については、あらかじめ実施した三軸試験結果に基づき D 値 95% 程度の密度でダイレイタンシー挙動およびせん断強度が不攪乱状態とほぼ等しくなることを確認した。表-1 に実験ケースを示す。せん断時の排水条件は地山拘束が大きい場合を想定して圧密定体積(圧密非排水)条件とし、密度および圧密圧力を実験パラメータとした。せん断箱の砂質土内部の各 4 カ所に鉛直方向および水平方向の土中土圧計を設置し、所定の垂直圧力による圧密終了後、せん断速度 5mm/min のひずみ制御で実施したせん断中の土中土圧の変動を計測した²⁾。

図-2 遠心載荷実験のシールド近接施工模型の概要図

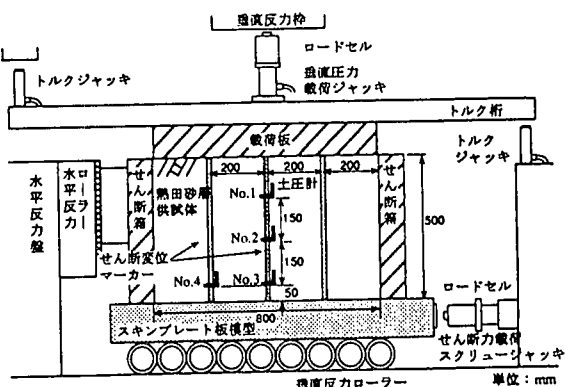
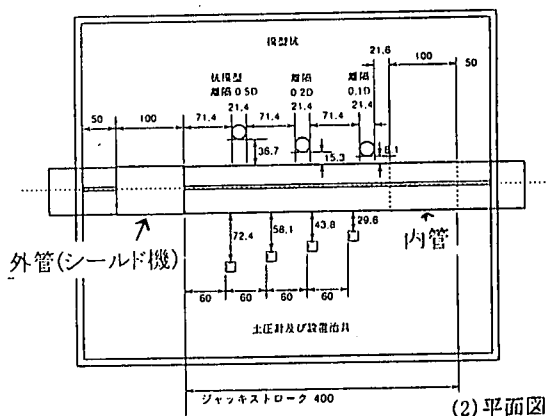


図-1 大型一面せん断実験装置

表-1 実験ケース一覧
(D値は $1 \times E_c$ の締固め試験による)

Case	圧密圧力 σ (kgf/cm ²)	供試体初期状態				
		乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	含水比 Wo(%)	間隙比 e _o	飽和度 S _{ro} (%)	D値 (%)
1	0.5	1.471	18.6	0.802	61.5	88.6
2	1.0	1.471	18.6	0.802	61.5	88.6
3	0.5	1.578	15.8	0.679	61.5	95.0
4	1.0	1.578	15.8	0.679	61.5	95.0
5	2.0	1.578	15.8	0.679	61.5	95.0
6	0.5	1.628	14.6	0.628	61.5	98.0



は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ているため、シールド外殻を模擬した外管(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施工をモデル化した。したがって、このモデルでは切羽部での掘削過程は再現されていない。模型地盤は前述の大型一面せん断実験で用いた試料と同様である。シールド周辺地盤内には土中土圧計と近接構造物としてのアルミ製の模型杭を配置した。土中土圧計の受圧面直径は $\phi 6\text{mm}$ であり、シールド中心深度でシールドからの離隔 $0.4, 0.6, 0.8, 1.0D$ に設置した。また、土

表－2 遠心載荷実験ケース一覧

Case	地盤条件	土被り厚H (1):管径	シールド機模 型表面粗度	掘進速 度
1	尾崎熱田砂層 密度大 $\rho d=1.578\text{g/cm}^3, D$ 値=95%	$H=10\text{m}$ (11): $D=2$	滑条件	14cm/min
2	尾崎熱田砂層 密度大 $\rho d=1.578\text{g/cm}^3, D$ 値=95%	$H=20\text{m}$ (11): $D=4$	滑条件	14cm/min
3	尾崎熱田砂層 密度小 $\rho d=1.471\text{g/cm}^3, D$ 値=89%	$H=20\text{m}$ (11): $D=4$	滑条件	14cm/min
4	尾崎熱田砂層 密度大 $\rho d=1.578\text{g/cm}^3, D$ 値=95%	$H=20\text{m}$ (11): $D=4$	粗条件 (標準砂貼付)	14cm/min
5	尾崎熱田砂層 密度小 $\rho d=1.471\text{g/cm}^3, D$ 値=89%	$H=20\text{m}$ (11): $D=4$	粗条件 (標準砂貼付)	14cm/min
6	尾崎熱田砂層 密度大 $\rho d=1.578\text{g/cm}^3, D$ 値=95%	$H=20\text{m}$ (11): $D=4$	滑条件	3.5cm/min

圧集中を避けるために土圧計周辺には同径程度のダミー部を設けた。模型杭は $\phi 1.5\text{m}$ の場所打ち杭を想定し、相似側により曲げ剛性EIを合わせたアルミ材料で作製し、杭内側にひずみゲージを貼付けて曲げモーメント計測を行った。シールドからの離隔は $0.1, 0.2, 0.5D$ である。表－2に実験ケースを示す。地盤密度、土被りH、模型シールド表面の粗度の違い、および掘進速度を実験パラメータとした。模型シールド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^{3) 4)}。

上述の実験成果の妥当性を検証するために、実際のシールド工事の際に発生した付加土圧の現場計測値との比較検討を行うこととした。付加土圧計測は地盤変状計測と比較してその事例が少ないこと、著者らが着目している比較的密に締まった洪積砂質地盤でのシールド工事であること、電力用洞道規模のシールド工事であること等を考慮すると計測事例数は限られたが表－3に示す4事例を抽出した。なお、公表されている既往資料では不明な地盤物性値については、その他の判明している地盤条件等より判断して一般的な値を設定した。

3. 付加土圧発生機構

(1)シールドと洪積砂質地盤との摩擦係数

著者らが実施した、シールドスキンプレート鋼板と洪積砂層の大型一面せん断実験結果より求められたせん断強度定数は表－4に示すように、Cdで $0.03\sim 0.07\text{kgf/cm}^2$ 、 ϕd で $23.7\sim 29.7$ 度(D 値95%で25.5度)であった。したがって、これから求められるシールドスキンプレート鋼板と洪積砂層地盤との摩擦係数 $\mu (= \tan \phi d)$ は、 $0.44\sim 0.57$ となる。ここで、著者らが実施した大型一面せん断実験でのシールドスキンプレート鋼板が実際のシールド表面をどの程度再現しているか確認するために、シールドの摩擦係数に関する既往研究との比較を行った。

実際のシールド工事の実績データから求めたシールド外殻スキンプレート鋼板と周辺地盤の摩擦係数については吉田らの研究⁵⁾がある。砂質土でのシールド工事の施工実績データから摩擦係数を逆算し、その結果を図－3のよう

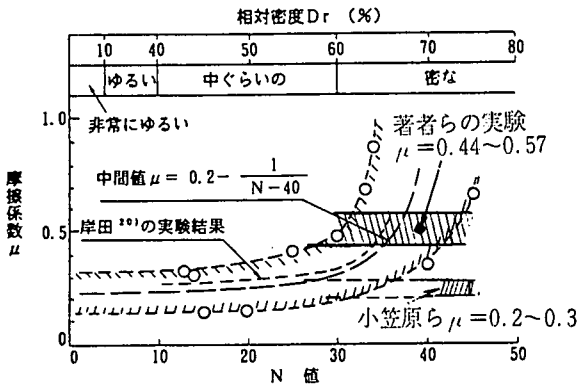
表－3 付加土圧の現場計測値に関するデータ (1kgf/cm2=98.1kN/m2)

付加土圧 計測事例	シールド 外径 [m]	土被り [m]	付加土圧 計測深度 [m]	土圧係数	乾燥密度 [t/m3]	平均主応力 [kgf/cm2]	付加土圧 [kgf/cm2]	正規化 付加土圧	計測点と シールドと の離隔 [m]	備考
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)=[1+2*(4)] *(5)*(3)/3	(7)実測値	(8)=(7)/(6)	(9)	
A	4.95	15.6	20.6	0.50	1.06	1.45	1.00	0.69	0.50	中電資料
B	4.03	12.5	14.5	0.50	0.90	0.87	1.80	2.07	0.56	中電資料
C	8.21	15.0	14.0	0.76	1.00	1.18	1.10	0.94	1.00	下水資料
D	5.84	—	18.5	0.45	1.00	1.17	1.25	1.07	0.73	鉄道資料

に掘進地盤のN値との関係で整理している。同図には著者らの実験結果を併記したが、N値が約30～45程度の密な洪積砂質地盤とシールドとの摩擦係数が再現されている。なお、同図には小笠原らの研究値⁶⁾も併記したが、これで見るとかなり緩い地盤を対象とした場合の摩擦係数となっている。

表－4 大型一面せん断試験による摩擦係数

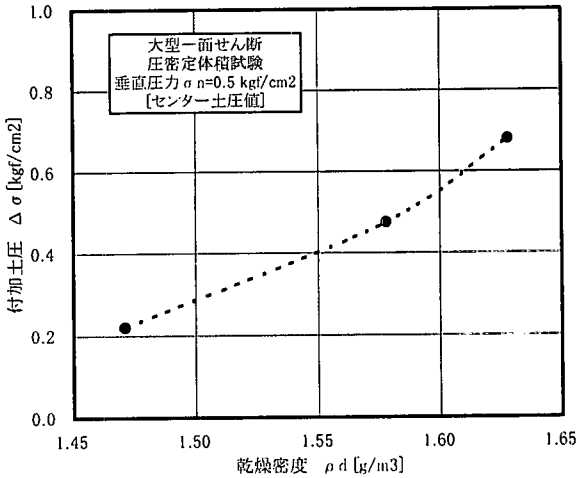
体積制御	乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	含水比 W (%)	摩擦係数	
圧密定圧	1.471 (ϕ 値88.6%)	18.6	$C_d=0.07 \text{ kgf}/\text{cm}^2$	$\phi_d=23.7^\circ$ ($\tan \phi=0.438$)
圧密定体積	1.471 (ϕ 値88.6%)	18.6	$C'=0.04 \text{ kgf}/\text{cm}^2$	$\phi'=25.2^\circ$ ($\tan \phi=0.471$)
圧密定体積	1.578 (ϕ 値95.0%)	15.8	$C'=0.07 \text{ kgf}/\text{cm}^2$	$\phi'=25.5^\circ$ ($\tan \phi=0.477$)
圧密定体積	1.628 (ϕ 値98.0%)	14.6	$C'=0.03 \text{ kgf}/\text{cm}^2$	$\phi'=29.7^\circ$ ($\tan \phi=0.571$)



図－3 N値と摩擦係数 μ (吉田⁵⁾に加筆)

(2)地盤密度の影響

図－4は、大型一面せん断試験結果の範囲で、乾燥密度 ρ_d とせん断面に垂直な方向(シールド外殻と垂直方向)の付加土圧 $\Delta\sigma$ (せん断中の最大値)の関係を示す。ここでの付加土圧は、せん断箱中央部のせん断面から5.0cmにセットした土中土圧計のせん断開始時点からの増分値であるので、シールド推進中の動摩擦状態が形成された時点の付加土圧である。これより、密度が増加するとせん断面に垂直な方向の付加土圧も増加することが明瞭である。よく締まった密な砂質土の場合ほど、シールド外殻と周面地盤間のせん断に伴って正のダイレイタンスー特性に起因する付加土圧が発生し易いことがわかる。



図－4 密度と負荷土圧の関係

(3)拘束圧の影響

よく締まった砂質土でのせん断時のダイレイタンスー特性により生じる付加土圧と、せん断面の拘束圧との関係を把握するために、付加土圧 $\Delta\sigma$ をせん断面の拘束圧力 σ_n で除して正規化した値($\Delta\sigma/\sigma_n$)と拘束圧力 σ_n との関係を図－5に示す。ここでの付加土圧 $\Delta\sigma$ は前述(2)と同様の計測値である。拘束圧力(せん断実験での圧密圧力) σ_n が増加すると付加土圧は減少する傾向を示しており、この傾向はよく締まった密な砂質地盤のせん断に伴う正のダイレイタンスー挙動は拘束圧が小さいほどその膨張傾向が大きくなるという地盤工学での一般的な知見と整合する。一方、近接施工の検討時には、発生する付加土圧の絶対値の方が重要であるから、付加土圧の値とせん断面の拘束圧力 σ_n の関係として図－5を書き改めると図－6のようになる。せん断面上の拘束圧力 σ_n の増加とともに付加土圧 $\Delta\sigma$ も増加するが、その増加傾向は対数関数的であり、拘束圧力 σ_n が大きいほど付加土圧 $\Delta\sigma$ の増加傾向が減少してくる点がダイレイタンスーに起因する付加土圧の特徴である。グラフのパラメータとして大型一面せん断実験の地盤密度 ρ_d の違いも示してあるが、(2)節で述べたように、地盤密度 ρ_d に対する付加土圧 $\Delta\sigma$ の変化の方が大きい。

ここで、図－5、6には表－3に示した現場実測値と遠心载荷実験結果(計測された付加土圧の最大値)を併記した。

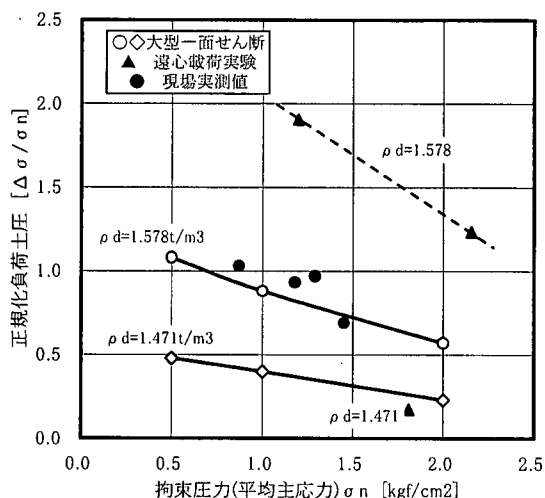


図-5 拘束圧と正規化した付加土圧の関係

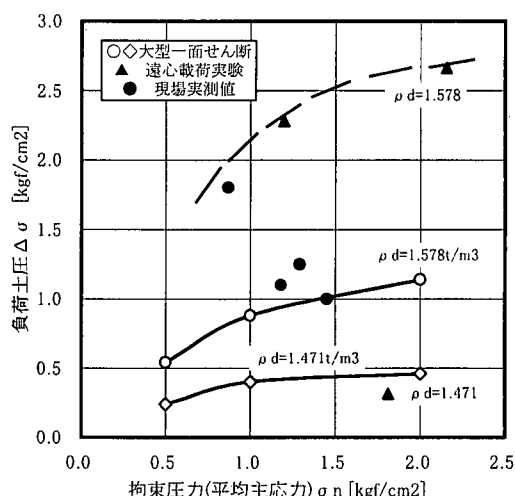


図-6 拘束圧と付加土圧の関係

なお、現場および遠心載荷実験での付加土圧計測位置のせん断面の拘束圧力は平均主応力により評価した。

まず、2種類の実験結果の関係について言うと、もともと、大型一面せん断実験での付加土圧の測定値はせん断面(シールドスキンプレート鋼板)から5.0cm 離隔した鉛直方向土圧であり、一方、遠心載荷実験での計測値はシールドからの離隔が約3.0cm(実換算離隔約2m)の水平方向土圧であるから、どちらもせん断面に垂直な方向ではあるが、両者の計測値の関係を正確に位置付けるのは難しい。そこで、拘束圧力との関係で両計測値を比べてみると、地盤密度 $\rho d=1.471\text{t/m}^3$ の場合は、両者の付加土圧の発生傾向が類似しているのに対し、 $\rho d=1.578\text{t/m}^3$ のケースの場合には、遠心載荷実験結果は一面せん断実験値よりかなり大きな値が得られている。したがって、それぞれの実験から得られている付加土圧は2種類の実験内容の違いによる特徴を含んだ計測値であると考えるのが妥当である。

ただし、拘束圧力との関係から見た、大型一面せん断実験および遠心載荷実験により計測された付加土圧の発生挙動は両者とも類似した傾向を示す。図-5からは、拘束圧力が 4.0kgf/cm^2 (392kN/m^2 、例えば有効質量を $\rho'=0.9\text{t/m}^3$ 、土圧係数を $K=0.5$ とした場合に土被りとして約67m)付近まで増加すると、拘束圧によって正のダイレイタンス挙動が抑制され、正規化した付加土圧($\Delta\sigma/\sigma_n$)は極めて微小な値となることが両方の実験結果より示されている。

次に、実測値の範囲と実験結果とを比較すると、今回選定した付加土圧の実測値は、地盤密度 $\rho d=1.578\text{t/m}^3$ の場合の大型一面せん断実験と、それより大きめの値となっている遠心載荷実験結果との範囲内にばらついている。これより、著者らが実施した2種類の実験結果は、実際のシールド工事での付加土圧の発生現象の範囲を概ね押さえられていることがわかる。

4. 付加土圧の影響範囲

図-7に、遠心載荷実験結果より求めた付加土圧発生の影響範囲を示す。この図は、遠心載荷実験での計測項目である土中土圧(シールドからの離隔0.4, 0.6, 0.8, 1.0D)と、模型杭(シールドからの離隔0.1, 0.2, 0.5D)の曲げモーメント挙動に基づいてその時に作用した付加土圧を逆算¹⁾評価した値とを用いて作成したものである。用いた実験ケースは、模型シールドの表面状態をシールド実機の表面状態に近い滑条件の場合とした土被り $H=20\text{m}$ のケースであり、地盤密度は $\rho d=1.578\text{t/m}^3$ と 1.471t/m^3 で検討した。また、同図には現場実測値も併記した。

前節3(3)で述べたように、地盤密度 $\rho d=1.578\text{t/m}^3$ のケースの場合、遠心載荷実験結果から得られた付加土圧は大型一面せん断実験結果のものと比較してかなり大きい。この傾向は、シールドからの離隔に応じた計測結果にも表れていることが図より読み取れ、 $\rho d=1.578\text{t/m}^3$ の付加土圧の絶対値は実状よりかなり大きいものと考えられる。一方、 $\rho d=1.471\text{t/m}^3$ の場合のシールドからの離隔に応じた付加土圧の絶対値は現場実測値のオーダーと整合してお

り、実際の近接工事で生じる付加土圧の発生傾向をかなり模擬できているものと判断される。また、シールド離隔に応じた付加土圧の減衰傾向に着目すると、付加土圧の絶対値が異なる両ケースともその影響が無くなる範囲は一致した傾向を示しており、これより、付加土圧による影響範囲はシールド外殻から約 2.5m(0.5D 程度)が一つの目安になると考えられる。

既往のシールド指針類においては、近接施工問題の内、併設トンネルの影響に関して、その留意せねばならないトンネル離隔として 1.0D⁸⁾～0.5D⁹⁾ が提唱されている。著者らの検討は、密な洪積砂質地盤のせん断に伴う正のダイレイタンシー挙動に起因する付加土圧に対してのみ実施したものであるが、既往指針類の既述内容と整合した結果が得られた。

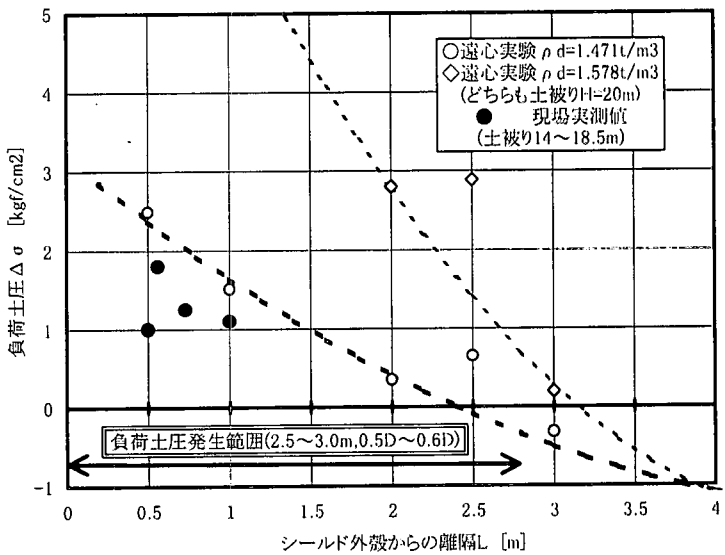


図-7 付加土圧の影響範囲

5. おわりに

軟弱な沖積地盤の場合とは異なり洪積砂質地盤のシールド工事であったことから、シールド掘進に伴う地盤変状に関しては事前に何ら心配は無かったが、極めて近接した既設構造物がシールド通過時点での付加土圧の影響と思われる挙動を呈したことから、洪積砂質地盤を対象とした、シールド通過に伴う周面地盤のせん断時のダイレイタンシー挙動を要因とする付加土圧の発生機構について検討を加えてきた。それぞれ着眼点を絞って大型一面せん断実験や遠心载荷実験による検討を加えたが、現象をモデル化して扱っているこれらの実験成果と実際の挙動との整合性についての評価がこれまでの報告ではなされていなかったため、本報文では、著者らが着目した施工条件と類似する現場実測値を収集し、実験成果と比較検討を行うことで、これまでの実験成果の意味を総合的にまとめてみた。影響範囲が 0.5D という結論は目新しいものではないが、シールド掘進に伴う付加土圧の発生機構の検討に基づいて誘導された影響範囲の値として、密な洪積砂質地盤における近接施工に関する事前検討の際の参考になれば幸いである。

参考文献

1) 例えば、杉戸 孝、山本敏勝：都心部のシールド工事に伴う近接構造物の挙動、中部電力(株)社内資料 2) 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 回年次学術講演会後援概要集, III-B154, pp. 308-309, 1996 3) 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载荷模型実験)、土木学会第 52 回年次学術講演会後援概要集, III-B100, pp. 200-201, 1997 4) 西村 均、中橋貞雄、黒川信子、田中 弘：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、トンネル工学研究論文・報告集, 第 7 巻, pp. 435-440, 1997 5) 吉田 保、山田孝治：土圧式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, 第 445 号/III-18, pp. 75-82, 1992 6) 小笠原政文、松下雅行、大泉英俊、白井孝典：シールドマシンと地山の摩擦に関する研究、構造工学論文集, Vol. 43A, pp. 1439-1448, 1997 7) 土木学会：トンネル標準示方書[シールド工法編]・同解説, p. 54, 1996 8) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説シールドトンネル, pp. 64-65, 1997