

デジタルツインによる土圧シールドの現場計測工法

土圧シールド 主働土圧 現場観測工法

(一財)地域地盤環境研究所 国際 岩崎好規
JIP テクノサイエンス 正 伊藤 肇
(株)地域地盤環境研究所 国際 ○長屋淳一
東北工業大学 国際 今西 肇

1. 序

シールド切羽周辺の地盤特性は、必ずしも十分に事前に把握できない場合が多い。本論では、切羽を用いた土圧載荷試験から、地盤の力学特性を推定し、3次元有限要素法によるシールド掘進シミュレーションと現場観測による実挙動の比較というデジタルツインによる土圧シールド施工を提案するものである。テルツァギー・ペックは、地盤が自然に形成されたものであるからいくら詳細に調査してもその適用性は保証されるものではなく、仮定した特性に基づく挙動と施工時の観測結果とを比較することで施工を進める(Observational Method¹⁾) (現場観測工法) を提案している。本論では特に原位置切羽土圧の減圧試験に基づくデジタルツインによる土圧シールド現場観測工法を提案する。

2. 減圧試験に基づく地盤の力学定数の簡易推定

減圧試験による除荷-変位曲線から、切羽周辺地盤の力学定数を推定しようとすると、唯一解は求めることはできないが、力学定数の存在範囲を限定することで、シミュレーションモデルの構築が可能である。図-1 に示したような N 値=50 の砂質地盤の土圧シールドにおける原位置減圧試験結果が図-2 であったとし、シールド中心レベルにおける土圧-変位曲線の直線部分と図-2 に示した変曲点からの推定法を考察する。

直線部：最初の直線部は弾性域で、変形係数とポアソン比と地盤形状によるが、ここでは、ポアソン比を $\nu=0.3$ とし、変形係数を求める。図-1 に示すモデルを用いて、ヤング率を数種類変化させ減圧による切羽水平変位を図-3 に示し、原位置試験との対応からヤング率の逆数は、 $(1/E)=0.7\times 10^{-6}(\text{m}^2/\text{kN})$ となり、 $E=1.43\times 10^5(\text{kN}/\text{m}^2)$ が求められる。

変曲点：変曲点からは強度特性が得られるが、ここでは、降伏点として土圧はランキン主働土圧であるとして近似値を求める。(1)式をランキン主働係数として、有効鉛直土圧 σ'_v に対する有効水平土圧 σ'_a は(2)式で示されており、これらの式と減圧試験における降伏点 σ_y から、有効鉛直土圧に対する異なった内部摩擦角 ϕ に対する粘着力 c を求めることが出来る。

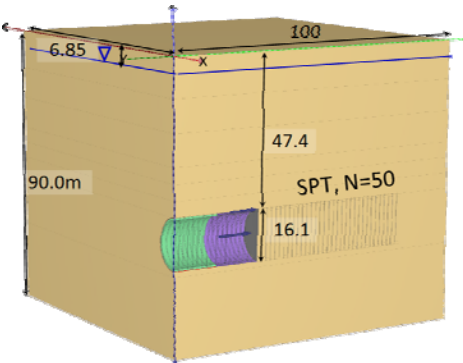


図-1 土圧シールド減圧試験地盤形状モデル

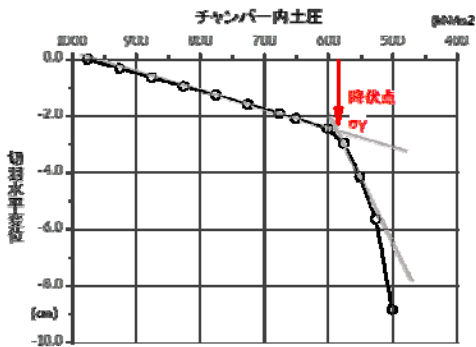


図-2 減圧試験による土圧 - 水平変位曲線

$$K_a = \tan^2(45 - \phi/2)$$
$$\sigma'_a = \sigma'_v \cdot K_a - 2c(K_a)^{0.5}$$
$$\sigma'_{a_test} = \sigma_y - p_w$$
$$c = \{\sigma'_a \cdot K_a - \sigma'_{a_test}\} / (2 \cdot (K_a)^{0.5})$$

(1)
(2)
(3)
(4)

σ'_{a_test} : 減圧試験による有効主働土圧
 σ_y : 減圧試験における降伏点,
 p_w : シールド中心深度における水圧

表-1 に図-1 の地盤条件下における減圧試験で $620\text{kN}/\text{m}^2$ の降伏点 σ_y が得られた場合の c , ϕ の簡易推定結果を示す。

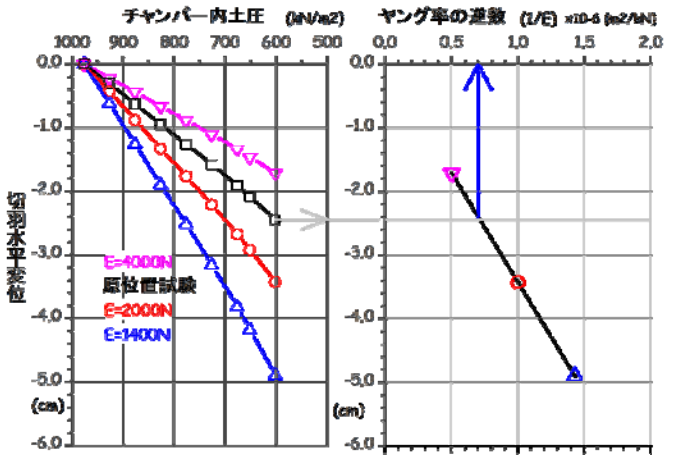


図-3 減圧試験結果からヤング率の推定

表-1 減圧試験結果による内部摩擦角 ϕ と粘着力 c の簡易推定

減圧試験条件および結果			減圧試験結果から推定されるc、φの関係						
減圧試験における シールド中心深度 の応力条件	①鉛直全土圧 σ _v	1109 kN/m ²	⑥内部摩擦角	(度)	0	10	20	30	40
	②水圧 p _w	486 kN/m ²	⑦主働土圧係数		1.000	0.704	0.490	0.333	0.217
	③鉛直有効土圧 σ' _v	623 kN/m ²	⑧有効主働土圧 (=σ' _v ・K _a)	kN/m ²	623.0	438.6	305.5	207.7	135.5
減圧試験結果	④減圧試験における降伏点 σ _y	620 kN/m ²	⑨=⑧-⑤	kN/m ²	489.0	304.6	171.5	73.7	1.5
	⑤有効主働土圧 (=σ _y -p _w)	134 kN/m ²	⑩粘着力 (=⑨/(2・K _a ^{0.5}))	kN/m ²	244.5	181.5	122.4	63.8	1.6

3DFEM シミュレーションによる切羽周辺の応力状態は、円形切羽とシールドの相互作用により、ランキン土圧が仮定する単純な 2 次元の単純な状態とはやや異なっており、減圧試験の FEM による逆解析からより妥当な解が得られよう。

3. 予備解析

前節で求められる地盤の力学定数は、変形性と降伏点から得られる強度定数で、複数の組み合わせで検討することが可能である。土圧シールドの通常の掘進におけるチャンパー内土圧は主働土圧以上に保持されているので、弾性挙動となり、ヤング率、ポアソン比の組み合わせとなる。ポアソン比を仮定できれば、シミュレーション解析が可能となる。図-4 に 1 例として大深度のモデルを示した。地盤物性は、ヤング率、ポアソン比を $E=1.43 \times 10^5(\text{kN/m}^2)$, $\nu=0.3$ を用い、掘削ステップは 1.6m、図-5 に切羽位置が 100m に到達したときの地表面沈下分布(上図)、掘削による切羽進行によるシールド直上中心軸に沿った沈下曲線(下図)を示した。このような検討によって、影響する範囲の合理的推定が可能となる。

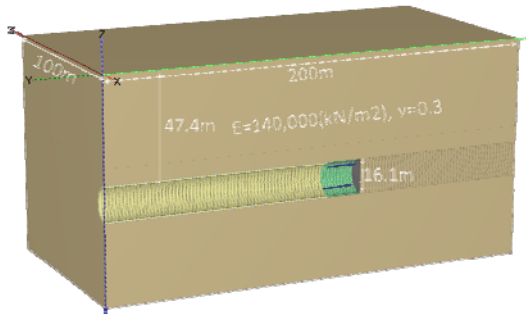


図-4 予備解析用モデル

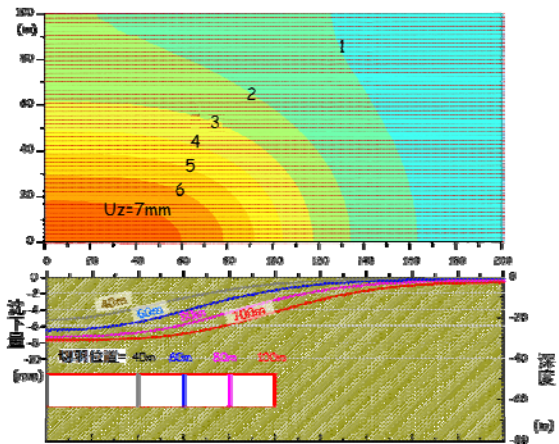


図-5 地表面沈下分布および切羽進行に伴う直上部沈下

4. 土圧シールドにおける現場観測工法

土圧シールドにおける現場観測工法は、切羽の安定の保持とともに、地表面沈下や隣接構造物などの挙動管理を目的とする。図-2 に示したように、切羽減圧試験に基づき、簡易手法あるいは FEM による逆解析により、変形係数や強度定数を求めることができる。降伏点より主働土圧が得られ、求められた地盤の力学定数から FEM シミュレーションモデルを得ることができる。フローチャートを図-6 に示したが、大深度の際の計測手法などの課題が残されている。

基本として弾塑性モデルを適用し、通常掘削では弾性解析、チャンパー内圧力が主働土圧以下では、弾塑性解析となる。

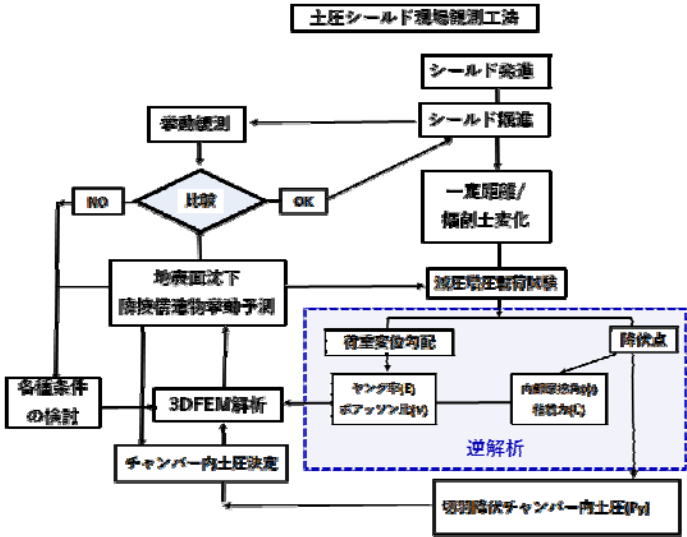


図-6 デジタルツインによる土圧シールド観測工法フローチャート

5. 結論

3 次元 FEM の適用により事前予測シミュレーションと現場観測による挙動値の比較に基づく現場観測工法を示した。切羽安定および地盤挙動に大きな影響を与える切羽周辺の地盤特性を切羽面における除荷試験によって地盤特性を把握することができれば、切羽の安定性保持、事前 FEM シミュレーションのための重要な一歩となる。デジタルツインによる土圧シールド施工により、切羽の安全性の確保、近接構造物への影響の評価がより容易になると推定される。

参考文献

Terzaghi and Peck(1967) “Performance Observation”, Soil Mechanics in Engineering Practice, Wiley International Ed., p627-681