

# シールドトンネル掘削後続沈下の3次元有限要素解析

岐阜大学工学部 岡二三生 岐阜大学工学部 ○八嶋 厚  
(財)大阪土質試験所 橋本 正 前田建設(元岐大) 三田崇司

## 1. まえがき

現在、軟弱地盤の掘削においてはシールド工法が広く用いられているが、シールドマシンが軟弱粘土地盤中を通過する際には、切羽接近にともなう周辺地盤のせん断変形、スキンプレートと地盤間のせん断、また裏込め注入時の押上げ等により、地盤中にはせん断変形およびそれともなう過剰間隙水圧が発生する。その後、発生した過剰間隙水圧は消散するが、その消散過程において、圧密にともなう沈下が発生する。これは後続沈下とよばれるものである。

ところで、シールドの都市部の施工においては、以上のように発生した後続沈下が無視できない量と考えられるため、その沈下による重要近接構造物への影響を回避することが必要である。そのためには、『いつまで変形が起こるのか』、『どの程度の大きさで変形するのか』を評価しなければならない。そこで本研究では、過剰間隙水圧が発生し、その後変形をとめないながら消散していく過程を精度よく予測することを目的とし、3次元有限要素解析[1]を実施した。

従来の研究では、過剰間隙水圧の発生から消散に至るまでの解析は、トンネルの横断面方向あるいは軸方向といった具合に2次元的に解析されていた。しかし、実際には横断面方向・軸方向の消散は同時に発生している。つまり、3次元的に解析してはじめて精度のよい予測といえるのである。

確かにこれまでもトンネル掘削にともなう3次元考察は成されてきたが、それは浸透解析、すなわち水の流れのみを考えたものか、あるいは、水の流れを考えない1相系の変形解析であった。そこで本研究では、ある地盤のシールド工事を対象に、3次元変形・浸透連性有限要素解析を実施し、従来のトンネル横断面方向の2次元平面ひずみ解析結果と比較する。そして、2次元平面ひずみ解析のもつ欠点を抽出した上で、2次元解析の位置付けを明確にする。

## 2. 解析手法と解析条件

2次元と3次元の結果を比較検討するために、同様の解析を2次元、3次元双方について同時進行させていく必要がある。そのため、2次元、3次元について、図-1と図-2のような有限要素メッシュを考え、解析を行った。ただし、2次元解析では既にトンネルが存在するものとした。また3次元解析では、トンネル軸方向に対して、0(m)~25(m)までをトンネルのある部分、25(m)~50(m)までをトンネルのない部分と考え、切羽が解析領域のちょうど中央部に位置するようにした。

透水係数は砂層で、 $1.0 \times 10^{-4}$ (m/sec)、粘土層では  $1.0 \times 10^{-6}$ (m/sec)である。この透水係数の値は、大阪市において実際に掘削されたシールドトンネルの挙動解析のために用いられた値で[2]、2次元解析で実測挙動を表現するために、以下の要因を考慮し、実験値よりも大きく評価されている。

- ① 圧密試験結果より求めた透水係数は、実地盤の透水係数よりも小さく評価されているという報告[3]
- ② トンネル横断面方向の平面ひずみを仮定しているため、3次元的な浸透が考慮されていない
- ③ パイプ状に含まれる砂の存在
- ④ 水平に堆積する砂のシームの存在
- ⑤ 裏込め注入圧荷によるシールドトンネル周辺地盤の割裂破壊
- ⑥ 切羽接近にともなう周辺地盤の攪乱およびスキンプレートと地盤の摩擦による地盤のせん断破壊

3-D FE-Analysis of Delayed Ground Deformation During Shield Tunnel Construction :

F.OKA, A.YASHIMA (Gifu University), T.MITA (MAEDA), and T.HASHIMOTO (Osaka Soil Laboratory)

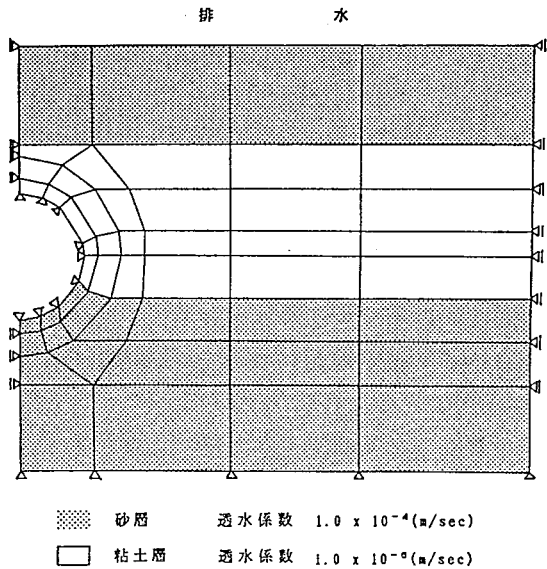


図-1 2次元平面ひずみ有限要素メッシュ

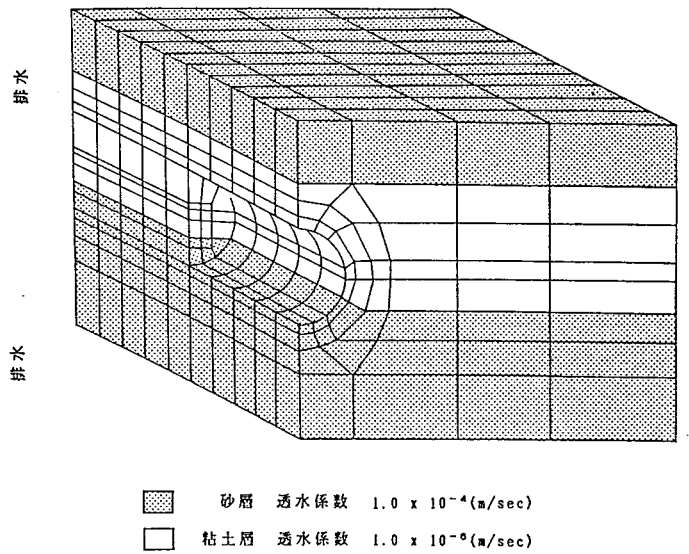


図-2 3次元有限要素メッシュ

解析対象地盤の粘土層は、実際には非常に非線形性の強い性質を持つが、ここでは、2次元平面ひずみ条件と3次元条件による解析結果の差異のみに着目し、使用した土は、弾性と考慮して解析を行った。地盤のヤング率は、 $E=100\text{tf/m}^2$ 、またポアソン比は $\nu=0.3$ である。上述したシールド切羽周辺の乱れにより発生すると考えられる過剰間隙水圧は、切羽近傍のスプリングライン上方のトンネル壁面要素に均一に $10\text{tf/m}^2$ 与えた。

### 3. 解析結果と考察

#### 間隙水圧の消散過程

シールドを掘り進んで行くと、シールド廻りに過剰な間隙水圧が発生する。その後の間隙水圧の消散の仕方は、当然2次元と3次元では違ったものになる。解析対象地盤は、砂層と粘土層の層状地盤であるが、水平方向と鉛直方向の全層の平均的な透水係数は、 $k_H = 6.04 \times 10^{-5}(\text{m/sec})$ 、 $k_V = 2.46 \times 10^{-9}(\text{m/sec})$ となり、水平方向の透水係数の方が20倍以上大きい。特に3次元解析においてはトンネル軸方向の水平方向の流れを考慮できることから、間隙水圧の消散は2次元解析に比べてはやくなることが予想される。

図-3と図-4は、スプリングライン部とクラウン部近傍の要素の間隙水圧の消散過程を時間軸を対数としてプロットしたものである。これらの図より、3次元解析の結果の方が2次元解析の結果よりも間隙水圧が消散するのが速いことがわかる。これは、3次元解析においては、トンネル軸方向の浸透現象を考慮しているためと考えられる。

#### 地表面沈下

切羽直上部の2日経過後の地表面沈下について考察する。

図-5に地表面沈下プロフィールを2次元解析および3次元解析についてプロットしている。両者の大きな差は、2次元解析が既にトンネル軸方向すべての領域においてトンネルが存在しているのに対して、3次元解析では、地盤中に切羽が存在し、解析領域の半分は未掘削地盤となっていることに起因している。

そこで、両解析の絶対的な比較を行うために、地表面沈下について総沈下体積量を考える。つまり、3次元解析における切羽を解析断面手前より徐々に移動させ、最終的にトンネルが解析背面に到達するまでに生じる地表面沈下量と2次元解析における地表面沈下量を比較する。3次元解析では、今回得られた各

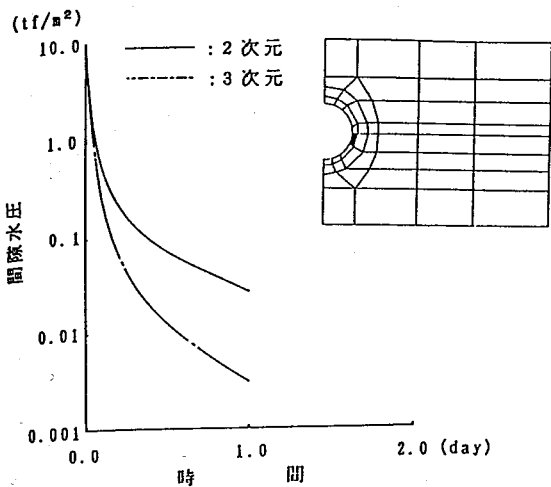


図-3 スプリングライン近傍要素の間隙水圧経時変化

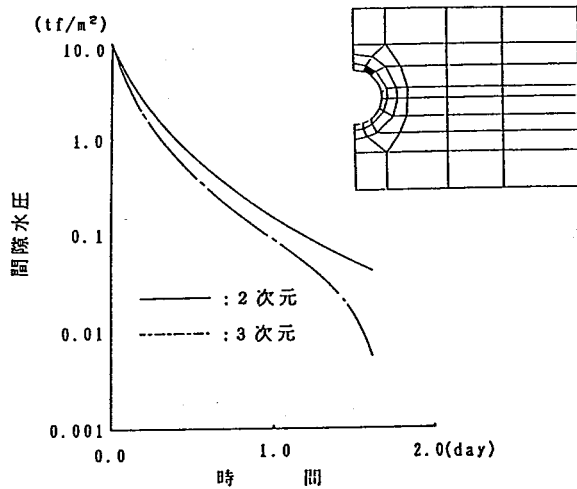


図-4 クラウン近傍要素の間隙水圧経時変化

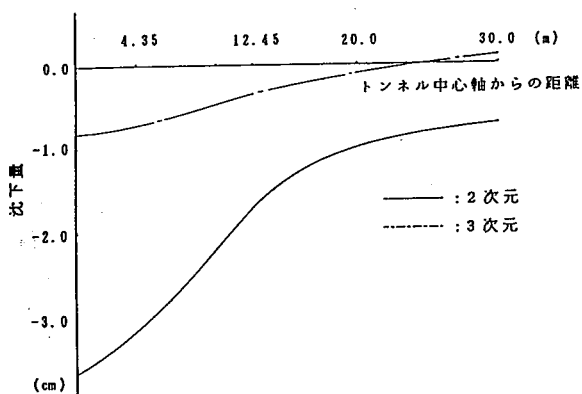


図-5 切羽直上部の地表面沈下形状

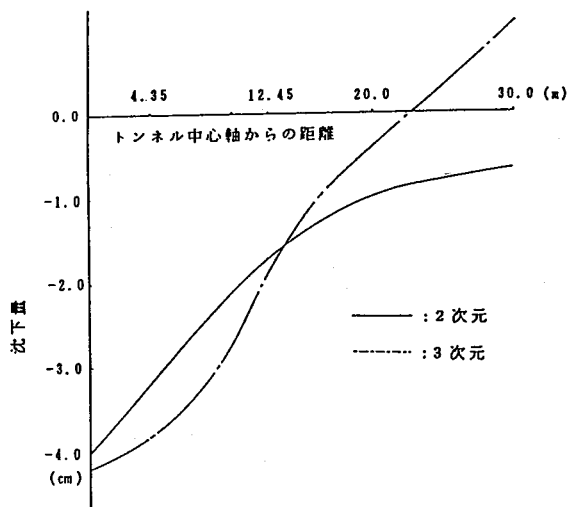


図-6 切羽の進行を考慮して求めた地表面沈下形状

節点の地表面沈下の値を切羽直上部の節点で加算することにより、2次元解析と同等の沈下量が得られるとして算定した。また、2次元解析においては、解析奥行き方向の厚さが1mであるので、3次元解析における奥行き方向の1パネル当りの長さ5mを考慮して、得られた沈下体積を5倍した。その結果、2次元解析では総沈下体積が $2.671\text{m}^3$ 、3次元解析では $2.408\text{m}^3$ という結果を得た。以上の結果より、境界条件の違いはあるものの同等の値が得られたといえる。

以上のようにして求めた切羽直上部の地表面沈下プロフィールを図-6に示す。この図より、2次元解析と3次元解析で得られた地表面沈下形状にはかなりの差異が認められる。つまり、3次元解析における沈下形状はかなり局所的となっており、沈下の影響が遠方にはおよばない。しかし、トンネル軸近傍における変形勾配が急であるので、地表面部の傾斜が急となり、トンネル軸近傍の地表面構造物に対してはかえって危険性が大きくなるといえる。

参考のために、3次元解析における2日経過後の解析領域全体の地表面沈下形状を図-7に示した。図からもわかるように、沈下は切羽直上部近傍のかなり限られた領域で発生しており、先の考察を裏付けるものである。

切羽 → 3次元

#### 4. 結論

2次元平面ひずみ解析と3次元解析を実施することによって、以下のような知見が得られた。

- ① 過剰間隙水圧の消散速度は2次元解析にくらべ3次元解析の方が速くなっている。これは、3次元解析においてはトンネル軸方向の浸透を考慮しているためと考えられる。
- ② 計算によって得られた切羽直上部の地表面沈下形状は、2次元解析と3次元解析でかなりの差異が見られた。3次元解析における沈下の形状はかなり局所的で、沈下の影響は遠方にはおよばない。しかし、変形勾配がトンネル軸近傍で急なため、トンネル軸近傍の地表面構造物に対しては危険性が大きくなるといえる。

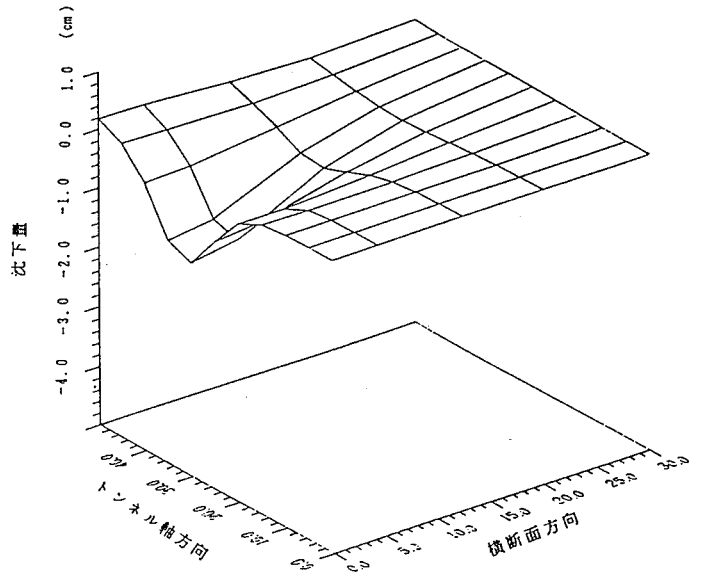


図-7 解析領域全体の地表面沈下形状

#### 参考文献

- [1] 飯塚 敦・八嶋 厚：3次元弾粘塑性連成有限要素プログラムの開発、土木学会第44回年次学術講演会、Ⅲ-448、1989、pp.970-971.
- [2] 平田武弘：密閉式シールド掘削に伴う軟弱粘土地盤の挙動と施工技術に関する研究、京都大学工学部博士論文、1989.
- [3] Leroueil, S. : Recent developments in consolidation of natural clays, Canadian Geotech. Journal, 25, 1987, pp.85-107.