

三次元沈下曲面を用いたシールド掘進に伴う 近接構造物の沈下量予測方法

Method of Calculating Adjacent Structures' Settlement by Shield Tunneling
through Use of Settlement Surface

角田浩¹・森健太郎²・川口博行³・小川卓³・久原高志⁴

Hiroshi Tunoda, Kentaro Mori, Hiroyuki Kawaguchi, Taku Ogawa and Takashi Kuhara

¹正会員 首都高速道路公団 工務部工事指導課 (〒100-8930 東京都千代田区霞が関一丁目4-1(日土地ビル))

E-mail:tsunoda@mex.go.jp

²正会員 首都高速道路公団 東京建設局建設第一部設計第一課 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿六丁目6-2)

E-mail:mori.kentaro@mex.go.jp

³正会員 清水建設株式会社 土木東京支店首都高橋建設所 (〒153-0042 東京都目黒区青葉台四丁目4-5)

E-mail:h.kawaguchi@shimz.co.jp

E-mail:t-ogawa@shimz.co.jp

⁴正会員 清水建設株式会社 土木事業本部技術第四部 (〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目2-3)

E-mail:kuhara@shimz.co.jp

A practicable method of calculating adjacent structures' settlement by shield tunneling is proposed. First of all, the settlement curve of a transverse direction is obtained by two-dimensional FEM analysis, and the settlement curve of longitudinal direction measured by shield tunneling of similar construction is set. Then a settlement surface is calculated from these two settlement curves. Even if the tunnel route is a curve or the interval between the adjacent structures and the tunnel route changes, we can obtain the adjacent structures' settlement by moving the calculated settlement surface along the tunnel route.

Key Words :settlement calculation, adjacent structures, shield tunneling

1. まえがき

シールド掘進に伴う地盤沈下計算には二次元FEM解析が用いられることが多く各種の解析方法が提案されている^{1),2),3),4),5)}。また、局部的あるいは詳細検討には三次元FEM解析^{6),7),8)}が用いられることもあるがモデル化に時間を要するとともに解析費用も多大となる。

一方、二次元FEM解析によって、シールド路線に沿ったシールド掘進に伴う地盤沈下を細かく計算するには、解析断面が多くなり時間と手間を要する。さらにシールド路線と地下鉄などの線状構造物が斜交する場合では、近接構造物の沈下量を二次元FEM解析で正確に評価することは難しい。また、シールドの進行に伴い近接構造物とシールドとの相互の位置関係が変化するシールド掘進過程を考慮した沈

下計算方法は少ない。

ここでは、シールド掘進による先行隆起から後続沈下、最終沈下を考慮して、シールド掘進の影響範囲内にあるシールド路線に沿った近接構造物位置の地盤挙動を求める簡易的な計算方法を提案している。

提案する計算方法では横断方向二次元FEMによる解析結果を用いるが、この解析には現在までに提案されている各種の二次元FEM解析手法による結果を用いることができる。また、シールド路線において近接構造物とシールドとの位置関係が変化しても計算可能であるとともに、最終地盤沈下量のみならず、シールド掘進過程を考慮した近接構造物位置の地盤沈下量が計算可能である。

2. 沈下量計算法の概要

横断方向二次元FEM解析による最終沈下量の計算方法は各種提案されており、また、計算も比較的容易である。一方、シールド掘進過程全体にわたる縦断方向の沈下を計算する方法として三次元解析が提案されているが、簡易な方法は今のところ無い。ここでは、横断方向二次元FEM解析により求められる沈下曲線と、実施工で計測されたシールド掘進による先行隆起、後続沈下を含む縦断方向の沈下曲線をもとに三次元の沈下曲面を設定し、この沈下曲面をシールド路線に沿って移動させることにより、シールド掘進の影響範囲内にある近接構造物位置の地盤挙動を求める簡易的な計算方法を提案している。ただし、厳密な沈下予測方法ではないので厳密な予測が必要な場合は、別途、詳細検討が必要である。その基本的な手順は次のとおりである。

- ①主要近接構造物や路線の代表部分を含むようにシールド路線を幾つかの部分に区分し、区間毎に区間を代表する横断面で横断方向二次元FEM解析を行い、横断方向沈下曲線を求める。
- ②土質条件、土被り、シールド形式、シールド径などが類似しているシールド工事の縦断方向沈下計測データから縦断方向沈下曲線を設定する。
- ③横断面の二次元FEM解析による沈下曲線と類似工事の沈下計測結果から設定した縦断方向沈下曲線をもとに三次元の沈下曲面を決定する。
- ④このようにして求めた三次元の沈下曲面をシールド掘進を模擬してシールド路線に沿って移動させる。移動は、沈下計算の対象となる近接構造物などへの先行隆起の影響が始まることからシールド掘進による沈下が収束するまでである。
- ⑤移動させるたびに影響範囲内にある近接構造物位置の地盤隆起量および沈下量を計算する。

なお、便宜的に横断方向二次元FEM解析と類似工事の縦断方向沈下計測データを用いて三次元の沈下曲面を作成しているが、実施工においては、近接構造物部の掘進に先立つトライアル掘進区間における計測結果に基づき沈下曲面を見直すことが望ましい。

3. 具体的計算手順

地下鉄などの線状構造物の直下を近接してシールドが曲線掘進しながら斜めに交差する場合を例に具体的な計算手順を以下に示す。なお、ここでの曲

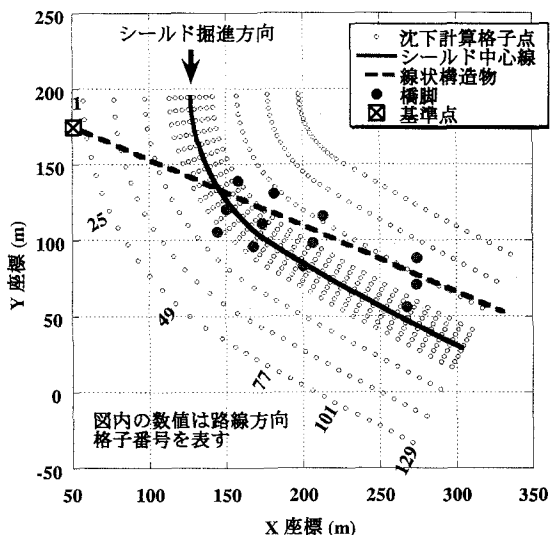


図-1 沈下計算格子点

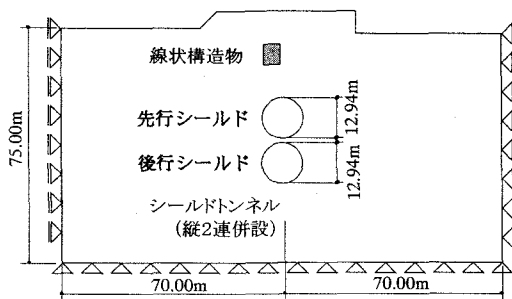


図-2 二次元FEM解析モデルの例

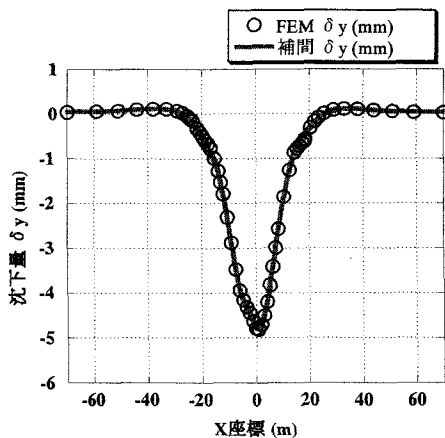


図-3 横断方向沈下曲線の例

線は比較的曲線半径が大きい場合を想定している。急曲線掘進など路線方向に条件が変化する場合では、別途、区間を分けるなどの配慮が必要である。

- ①シールド路線および近接構造物の平面座標計算を行い、相互の位置を確定する。
- ②シールド路線に沿って沈下計算格子点を設ける。
格子点間隔はシールド掘進方向には 1~2 リングピッチ程度とし、シールド路線直角方向は沈下量が大きくなるシールド中心部に近い範囲は 1~2m 程度と細かく、シールド路線から離れて沈下量が小さくなる範囲では 5m ピッチ程度とする。
図-1に沈下計算格子点の例を示す。図-1では説明のために粗いピッチとなっているが、実際の計算ではシールド掘進方向には2mピッチ、シールド路線直角方向はシールド中心から15mまでは1mピッチ、15m以遠では5mピッチとしている。
- ③検討対象となる近接構造物の位置やシールド路線方向の条件変化を考慮して、シールド路線を幾つかの部分に区分し、区間毎に区間を代表する断面で、シールド路線に直交して二次元FEM解析を行う。各区分のFEM解析モデルではシールド路線から解析モデル境界までの水平距離を一致させる。図-2は上下併設シールドトンネルの二次元FEM解析モデルの例であり、トンネルの土被りおよび線状構造物とシールドトンネルとの位置関係はシールド路線に沿って変化する。
- ④シールド掘進による影響を求めたい主要近接構造物の下端深さでの地盤沈下量を二次元FEMの解析結果から抽出し横断方向沈下曲線を求める。この場合、検討範囲のシールド路線全体でFEM解析の水平方向節点の位置を合わせることができればよいが、水平方向節点の位置を合わせることが難しいときには補間ないし回帰により横断方向沈下曲線を求める。図-3の横断方向沈下曲線の例は図-2に示したFEM解析モデルにおいて上側シールドを先行させたときの上側シールド掘進完了時の近接構造物下端での沈下曲線である。
- ⑤横断方向の沈下曲線からシールド路線直角方向の格子点間隔で沈下量を求める。
- ⑥縦断方向の沈下曲線として、土質条件、土被り、シールド形式、シールド径などが類似しているシールド工事の縦断方向の実測沈下データを採用する。縦断方向の沈下曲線は、シールドの掘進過程の地盤変位量、変位形状に大きな影響を与えるので実測沈下データの選定にあたっては、地盤条件、施工条件をよく調査し、最も検討対象現場に近いものを選定する。縦断方向の計測データは、シールド径、土被りなどが沈下計算を行おうとする工事のものと異なるので、シールド径および最終沈下量で無次元化する。また、採用する地中変位は、

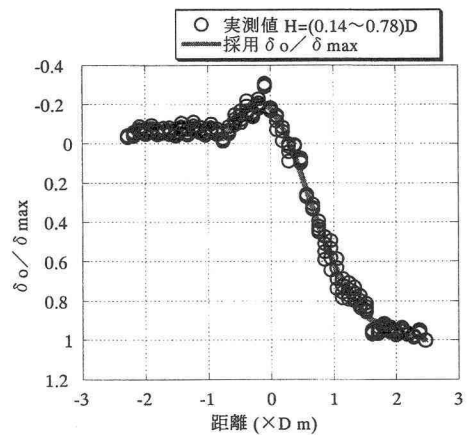


図-4 縦断方向沈下曲線

表-1 縦断方向の沈下量

距離 L (m)	L/D	採用δ _o /δ _{max}
-10	-0.77	-0.025
-8	-0.62	-0.078
-6	-0.46	-0.149
-4	-0.31	-0.201
-2	-0.15	-0.214
0	0.00	-0.183
2	0.15	-0.107
4	0.31	0.003
6	0.46	0.137
8	0.62	0.282
10	0.77	0.425
12	0.93	0.557
14	1.08	0.671
16	1.24	0.763
18	1.39	0.833
20	1.55	0.883
22	1.70	0.916
24	1.85	0.939
26	2.01	0.955
28	2.16	0.968
30	2.32	0.980
32	2.47	1.000

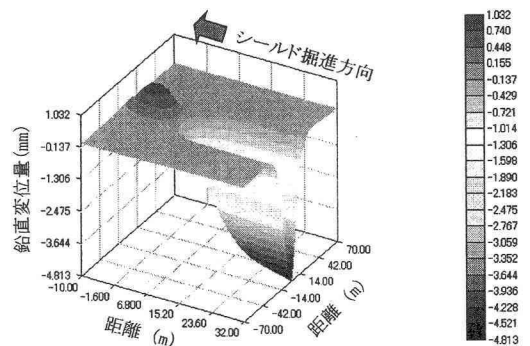


図-5 三次元沈下曲面の例

近接構造物の下端とシールド路線の位置関係を考慮して決定する。なお、実施工におけるトライアル掘進区間の計測データをもとに縦断方向の沈下曲線を見直すことが望ましい。

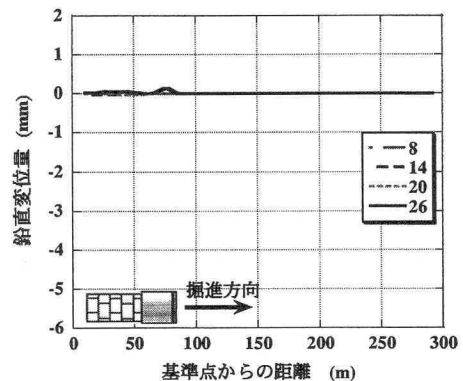
- ⑦無次元化した縦断方向の計測データを補間ないし回帰により縦断方向沈下曲線を求める。
- ⑧沈下計算を行おうとする工事で用いるシールド径をもとに、無次元化した縦断方向の計測データの縦断距離を実距離に換算し、縦断方向の格子点間隔で沈下量を求める。

図-4に示す縦断方向沈下曲線は、今回の計算例とシールド径、地盤条件などが類似している工事におけるシールド直上部の土被りが(0.14~0.78)Dでの実測された沈下状況⁹⁾を示したものである。図-4において δ_o は各位置での実測沈下量、 δ_{max} は実測最大沈下量、Hは土被り、Dはシールド外径である、横軸は切羽からの距離を表し、シールド外径を乗ずることにより実距離となる。表-1に今回の計算例に採用した縦断方向の切羽からの距離と沈下量の関係を示す。

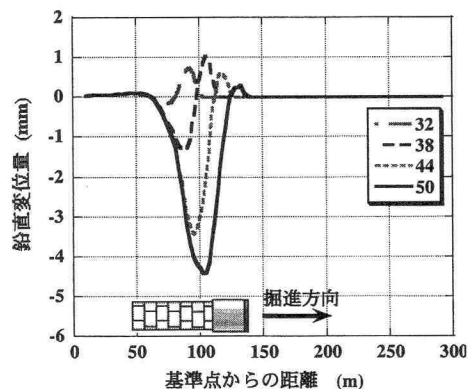
- ⑨二次元FEM解析により得られる全ての検討対象点の鉛直変位は、シールド掘進に伴い⑧で求めた縦断方向沈下曲線に従って変位するものとする、二次元FEM解析により求めた横断方向沈下曲線と、その横断方向沈下曲線を最終沈下量とする縦断方向沈下曲線から三次元の沈下曲面が決定される。図-5に⑤と⑧から得られる三次元沈下曲面の例を示す。この三次元沈下曲面には、シールド掘進による先行隆起の影響が始まるときから、後続沈下が収束するまでの三次元の沈下分布が反映していることとなる。シールド路線を区分し複数の横断面FEM解析を行う場合は三次元沈下曲面は複数となる。
- ⑩このようにして求めた三次元沈下曲面を、シールド掘進を模擬して、縦断方向の格子点ピッチでシールド路線に沿って移動させ、格子点ピッチ毎に、全ての格子点で沈下量を計算する。
- ⑪近接構造物位置の地盤沈下量は近接格子点の沈下量を補間して求める。
- ⑫シールド路線を区分し複数の横断面FEM解析を行う場合は、解析断面毎にシールド路線方向における適用範囲を決定しておき、それぞれの適用範囲では該当する三次元沈下曲面を使用する。
- ⑬シールド掘進による影響を求めたい近接構造物位置の地盤沈下量が最終沈下量になるまで、すなわち、後続沈下が収束するまで、三次元沈下曲面を移動させ近接構造物位置の地盤沈下量を求める。

- ⑭以上により、任意のシールド切羽位置におけるシールド掘進時の近接構造物位置の地盤沈下量を求めることができる。複数の横断面FEMの解析結果がある場合は、それぞれの適用範囲の境界部で沈下量を摺り付けることになる。

図-1に示すシールド路線を4つの区間に分けて三次元沈下曲面を作成し、図-2に示したFEM解析モデルの上側シールドを先行させたときの上側シールド掘進時における図-1に示す線状構造物の縦断方向の地盤沈下量を、以上の手順で計算した結果を図-6に示す。図-6において横軸は図-1に示す基準点からの距離であり、グラフの凡例に示す数値は三次元沈下曲面先端位置の路線方向格子番号(図-1参照)であり、番号は掘進方向に2m毎に増加する。説明の関係上6つ飛びでグラフ化している。シールドの掘進方向は格子番号が増加する方向である。なお、格子

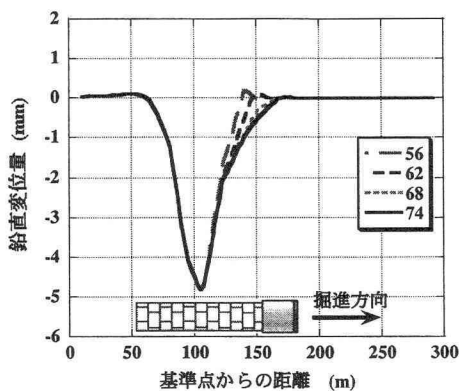


(a) 局所的な先行隆起の始まり

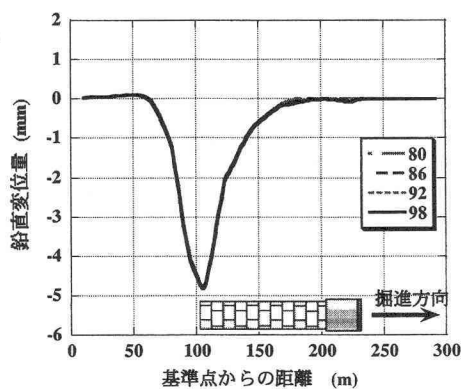


(b) 先行隆起部の前進と後続沈下の発生

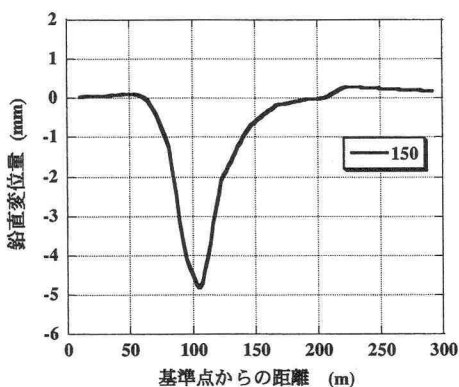
図-6 シールド掘進に伴う線状構造物位置の地盤沈下状況



(c) 後続沈下の進展



(d) 最終沈下への移行



(e) シールド掘進完了後の最終沈下

図-6 シールド掘進に伴う線状構造物位置の地盤沈下状況 (つづき)

番号104～146は省略しており、番号150は上側シールド掘進完了後の沈下量である。図-6をみると、線状構造物は、三次元沈下曲面先端の一部が線状構造

物に達すると局所的な先行隆起が生じ、シールド掘進が進行するとともに先行隆起部が前進し、それに引き続いて後続沈下が生じ、シールドが遠ざかると沈下が安定する状況が把握できる。このようにしてシールド線状構造物の位置関係が変化する条件下でのシールド掘進による線状構造物位置での地盤沈下状況を予測できる。

4. 実施例

(1) 近接構造物の形状と沈下量予測

a) 線状構造物の縦断方向の地盤沈下量計算

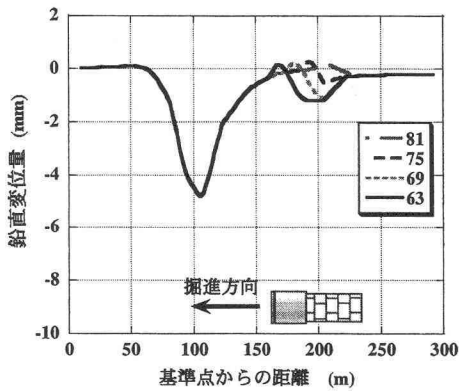
3章で述べたような単一シールドの場合と同様にして併設シールドの場合についても線状構造物の縦断方向の地盤沈下量を計算した。この場合、先行シールドによる沈下量に後続シールドの沈下量を加算することになる。図-2に示すFEM解析モデルおよびに図-1示すシールド路線で、上側シールド掘進後にシールド機をUターンさせ、下側シールドを、上側シールドとは反対方向に掘進する上下併設シールドの場合の計算例の一部を図-7に示す。下側シールドの掘進方向は路線方向格子点番号が減少する方向である。図-7に示すように先行シールドによる沈下量に後続シールドの先行隆起、後続沈下が加わり鉛直変位量が増加していることがわかる。

b) 線状構造物の横断方向の不同地盤沈下量計算

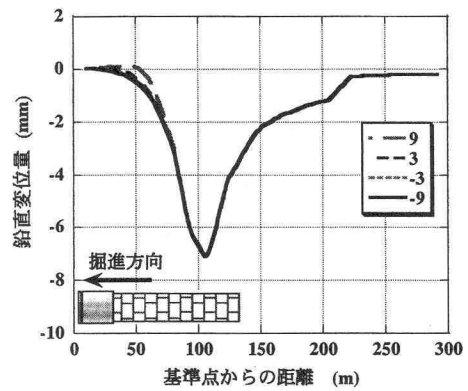
線状構造物に斜交してシールド掘進を行った場合の最終地盤沈下状況の計算例として、図-1において線状構造物の幅を考慮し、左右の側壁位置での地盤沈下量を計算することにより線状構造物の横断方向の最終不同地盤沈下量を求めた結果を図-8に示す。線状構造物の躯体に幅があるためシールド路線との交点が左右の側壁で異なり、最大沈下量の発生位置にずれが生じていること、線状構造物とシールド路線との交点の前後では、鉛直変位の差の正負が逆転し、線状構造物に捻れが生じていることがわかる。

(2) 情報化施工への利用

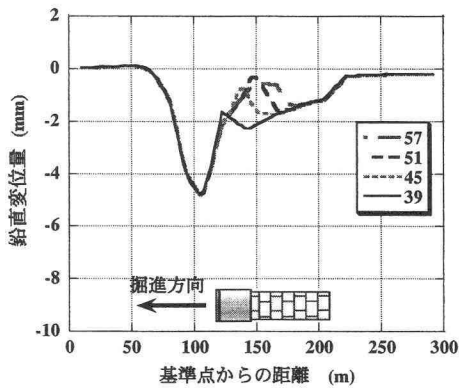
重要な近接構造物部の掘進に先立ちトライアル掘進区間を設け、掘進管理方法のチェックおよび沈下予測の精度の向上を図ることが行われているが、今回提案する計算法にトライアル掘進区間の計測データを用いることにより、シールド掘進による先行隆起の影響が始まるときから後続沈下が収束するまでの近接構造物の挙動の予測精度を上げることができる。また、シールド路線と近接構造物の位置の変化



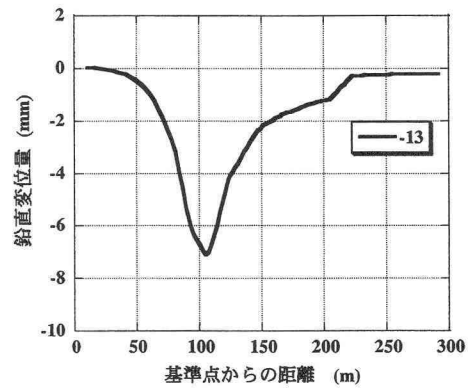
(a) 先行隆起部の前進と後続沈下の発生



(d) 最終沈下への移行

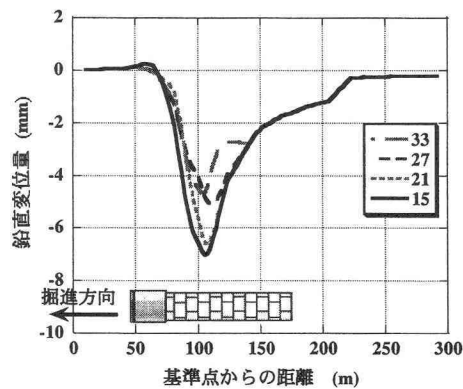


(b) 先行隆起部の前進と後続沈下の進展



(e) シールド掘進完了後の最終沈下

図-7 下側シールド掘進時の線状構造物位置の地盤沈下状況



(c) 後続沈下の進展

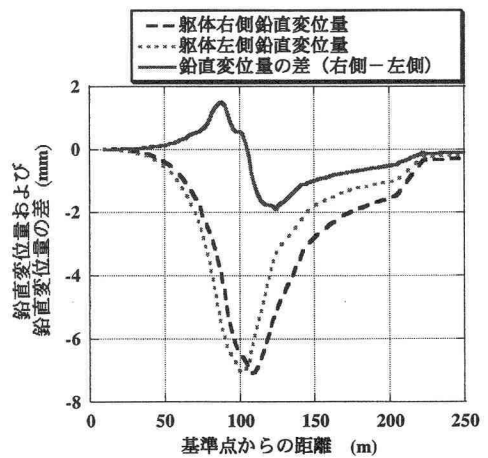


図-8 線状構造物の不同地盤沈下状況

を考慮した計算ができるので、計測データとの対比も行いやすいといえる。このように情報化施工においても有効に利用できる。

5. まとめ

シールドトンネルの横断方向二次元FEM解析に

より求められる沈下曲線と、実施工で計測された縦断方向の沈下曲線をもとに算定した三次元の沈下曲面をシールド路線に沿って移動させることにより、シールド掘進の影響範囲内にある近接構造物位置の地盤沈下量を求める簡易的な計算方法を提案した。この計算方法には次のような特徴がある。

- ①シールド路線が直線、曲線にかかわらずシールド掘進に伴う近接構造物位置の地盤沈下量を算出することができる。ただし、シールド路線の中に急曲線など特殊部がある場合には区間を分割する必要がある。
 - ②シールド路線に沿って、近接構造物とシールド路線の位置関係が変化しても近接構造物位置の地盤沈下量を計算できる。
 - ③横断方向二次元FEM解析には現在までに提案されている各種の二次元FEM解析手法を用いることができる。
 - ④縦断方向の沈下曲線は検討対象地盤、シールド径などの施工条件に類似した計測データを採用する必要がある。
 - ⑤線状構造物の縦断方向の地盤沈下量を予測することができるとともに、線状構造物の横断方向の不同地盤沈下量を予測することができる。
 - ⑥線状構造物などでは縦断方向に沿って地盤沈下量を計算することができるので、躯体の補強が必要な場合、補強範囲の検討が可能である。
 - ⑦沈下計算の着目点を地表面として沈下曲線を設定することにより地表面沈下量を予測することもできる。
 - ⑧近接構造物位置の最終地盤沈下量のみならず、任意のシールド位置における沈下量が計算可能であり、シールド通過時の近接構造物への影響度を把握することができる。すなわち、近接構造物の挙動を予測することができるので、情報化施工への利用、計測データとの対比も行いやすい。
 - ⑨厳密な沈下量予測方法ではないので、厳密な予測が必要な場合には、別途、詳細な検討が必要である。
- 今回提案している近接構造物の沈下量予測法は、

これから行う近接構造物群下のシールド掘進に備えて考案したもので、現在、シールド掘進の準備中である。近接構造物群の手前に設けたトライアル掘進区間における地盤変位の計測結果に基づき沈下曲面を見直して、シールド掘進過程の近接構造物の変位を再予測し、実測データとの対比を行う予定である。

謝辞：本計算例で用いた縦断方向の沈下計測結果は、国土交通省近畿地方整備局琵琶湖河川事務所の御厚意により提供していただいたものであり、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山田孝治, 吉田保, 間片博之, 橋本定雄: 沖積地盤におけるシールド掘進に伴う地盤変状とその予測解析について, 土木学会論文集 No.373/VI-5, pp.103-112, 1986.
- 2) 中山隆, 中村信義, 中島信: 泥水式シールド掘進に伴う硬質地盤の変形解析について, 土木学会論文集 No.397/VI-9, pp.133-140, 1988.
- 3) 谷渕決二, 三島和男, 村上恵一, 橋本正: 近接施工と地盤変状, トンネルと地下, 第25巻1号, pp.55-68, 1994.
- 4) 猪熊明, 角湯克典: トンネル掘削時地盤変状の予測・対策マニュアル(案)について, 土木技術資料, 37-1, pp.34-39, 1995.
- 5) 石村, 藤井, 真下: シールド掘削における地盤変状予測, 土木技術資料, 43-3, pp.54-59, 2001.
- 6) 亀村勝美, 桑田尚史: 泥土圧シールド掘削時の地盤挙動とその3次元数値解析, 土質工学会, 土留めとシールド工事における土圧・水圧と地盤の挙動に関するシンポジウム, pp.281-284, 1992.
- 7) 赤木寛一, 小宮一仁: 有限要素法によるシールド工事の掘進過程を考慮した地盤挙動解析, 土木学会論文集 No.481/III-25, pp.59-68, 1993.
- 8) 吉田 保, 田中 弘, 草深 守人, 武田 洋: 接触問題として扱ったシールド掘進時の地盤変状解析, トンネル工学研究発表会論文・報告集 Vol.4, pp.71-78, 1994.
- 9) 菅野由人, 川端知憲, 浜口幸一, 小西真治: 新幹線直下を大断面シールドで貫く 大津放水路トンネル, トンネルと地下, 第32巻4号, pp.39-48, 2001.