

シールド掘進に伴う地盤変位解析における 掘削相当外力の評価

Ground deformation analysis to evaluate excavation-induced external force during shield tunneling

小山昭¹・鋤持芳輝²・小野雄一郎³・斉藤正幸³
Akira Oyama, Yoshiki Kenmochi, Yuichiro Ono, Masayuki Saitou

¹正会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 設計技術部設計技術第二課 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)

²正会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 東京支社 計画部技術管理課 (〒105-0011 東京都港区芝公園2-11-1)

³正会員 日本シビックコンサルタント株式会社 構造技術ソリューション部 (〒160-0013 東京都荒川区西日暮里二丁目26-2 日暮里UCビル6F) E-mail:ono@nccnet.co.jp

Shield tunneling causes subsidence or uplift of the surrounding ground. It is therefore important to quantitatively estimate the effects of shield tunneling on nearby existing structures and the ground surface and take remedial measures as necessary. This study reports on an inverse numerical analysis of past shield tunnel projects for which field measurement data are available and evaluates excavation-induced external forces during shield tunneling by looking at the stress release ratio α and the correction factor β used to estimate ground displacement due to shield tunneling through two-dimensional elastic FEM analysis.

Key Words : shield tunnel, ground deformation, stress release ratio, correction factor, numerical analysis

1. はじめに

シールド工事では、シールドの掘進に伴う影響によって、周辺地盤に沈下や隆起が生じる。このため、トンネルに近接する既設構造物や地表面に及ぼす影響を定量的に予測し、必要に応じて適切な対策を講じることが重要である。

本報告は、これまで鉄道・運輸機構（鉄道建設公団）が施工したシールドトンネルのうち、地盤変位に関する現場計測を実施した工事を対象として数値解析による逆解析を実施し、二次元弾性FEMによるシールド掘進に伴う地盤変位の予測に用いられている応力解放率 α および補正係数 β について考察することにより、シールド施工時の掘削相当外力を評価するものである。

2. 地盤変位解析条件の設定

FEM 解析を用いて地盤変位解析を行なうにあたって、様々な解析条件を設定する必要があるが、こ

れらの条件を適切に設定しなければ信頼性の高い解析結果を得ることができない。ここで、H17 年度の報告¹⁾において解析諸定数をそれぞれパラメータとし感度分析を行ない、最適な定数等の設定方法を提案しているため、本報告でもそれに基づいて解析条件の設定を行った。

(1) 解析モデルの設定

H17 年度報告¹⁾に従い、図 2.1 に示す解析モデルを設定した。

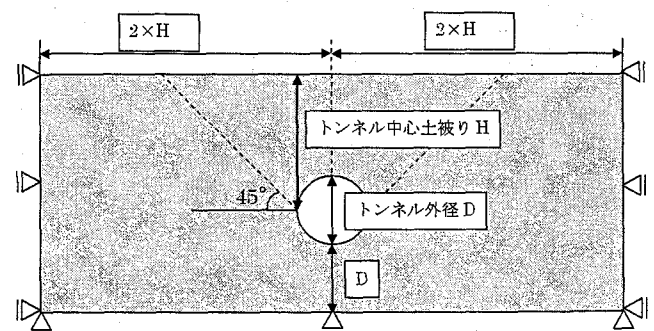


図 2.1 解析モデル

- a) 解析領域：下方領域をトンネル外径 D ，側方領域をトンネル中心土被り H の 2 倍に設定した。
- b) 境界条件：トンネル下部の地盤の緩み，乱れを評価できるように解析領域の側端部および下端部をスライド式に設定した。

(2) 地盤定数

地盤定数は検討断面で土質試験を行なっている土層は試験値を使用し，試験値が無い場合は対象工区の平均値を用いる。試験が行なわれていない土層については設計標準等の値を用いることとする。ただし， N 値 50 以上の土層については換算 N 値を用い，礫層については試験結果にばらつきが大きいので，特異点については評価しない平均値を用いた。

(3) 解析方法

地盤変位解析を行なうにあたって，解析方法は一般に以下の 2 つの方法が用いられている。

- A：地中応力に対して応力解放率 α を乗じ，掘削相当外力を算出する。（図 2.2）
- B：地中応力と切羽圧，裏注圧の差分に補正係数 β を乗じ，掘削相当外力を算出する。（図 2.3）

現在，シールド掘進に伴う地盤変位予測を二次元弾性 FEM で行なう場合に設定されている応力解放率 α は 10～20%，また補正係数 β は 0.3～0.4 が一般的に用いられている。近年，掘進管理技術の向上，同時裏込め注入の採用等により地盤変位はかなり低減されてきており，このような実状を踏まえ，応力解放率 α および補正係数 β の検討を行い，予測検討手法の合理化を図る必要がある。そこで，本報告では解析方法 A，B のそれぞれで計測結果とのフィッティングを行ない，係数 α ， β について考察した。また，本報告では圧密沈下等の後続沈下が起こらないことを前提とし，シールドマシンテール通過後の地盤変位量に着目した。

(4) 検討断面

本報告では，施工状況が地盤変位に与える影響を評価するために，シールドトンネルの通過土質およびシールド形式に着目し，対象断面は表 2.1 に示すとおり，泥土圧シールドの洪積地盤 2 断面，沖積地盤 1 断面，泥水式シールドの洪積地盤 2 断面，沖積地盤 3 断面の計 8 断面について逆解析を行なった。

(5) 地中応力，施工時作用応力算定の考え方

地盤変位解析を行なうにあたって，地中応力と切羽圧や裏注圧等の施工時作用応力の設定が必要となる。各作用応力の設定方法を以下より示す。

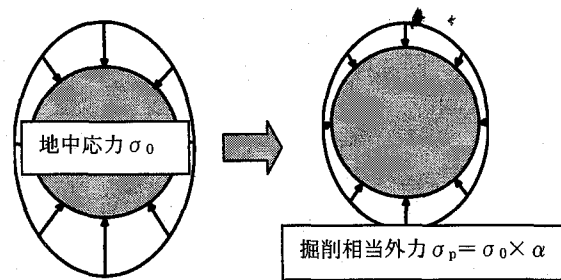


図 2.2 解析方法 A 概要図

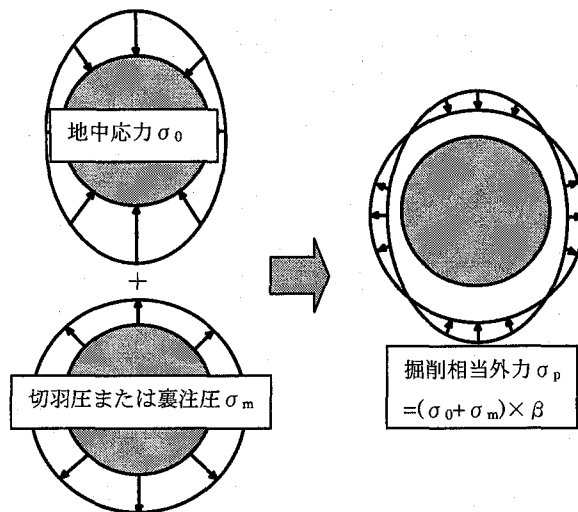


図 2.3 解析方法 B 概要図

表 2.1 検討断面

	通過土質	N 値	マシン外径 (m)	シールド形式
A 工区	洪積砂質土	58	10.00	泥土
B 工区	洪積砂質土	8	7.30	泥土
C 工区	洪積砂礫	82	10.30	泥水
D 工区	洪積砂質土	63	7.25	泥水
E 工区	沖積砂礫	34	7.00	泥土
F 工区	沖積粘性土	5	10.40	泥水
G 工区	沖積粘性土	5	10.20	泥水
H 工区	沖積粘性土	4	10.20	泥水

a) 地中応力

地中応力は，地中深さによる土圧および水圧を考慮し，土被り高さ，水位，静止土圧係数を用いて掘削断面全周の応力を算出する。

b) 切羽圧

トンネル中心の切羽圧は計測値を用い，泥水および泥土比重から掘削断面全周の応力を算出する。なお，泥水の比重は 12 kN/m^3 ，泥土の比重は 15 kN/m^3 とした。

c) 裏注圧

トンネル中心の裏注圧は計測値を用い，裏込め注入材比重から掘削断面全周の応力を算出する。なお，

裏込め注入材の比重は 12kN/m^3 とし、管内の圧力損失は 23kN/m^3 とした。ただし、一般に裏注圧は切羽圧に比べて若干高い圧力で管理されるため、管内損失を考慮したとき切羽圧より裏注圧が小さくなる施工条件の場合は、この損失を考慮しないものとした。

3. 応力解放率 α および補正係数 β の算定

実測値とのフィッティング解析を行なうにあたって、トンネル直上部の鉛直変位量に着目し、各検討断面における応力解放率 α および補正係数 β の算定を行なった。

(1) 応力解放率 α の算定

地中応力に対して応力解放率 α をパラメータとし、実測値とフィッティングさせることで応力解放率 α の算定を行なった。表 3.1 および図 3.1 に洪積地盤と沖積地盤の解析結果を示す。これを見ると、応力解放率 α は洪積地盤では 10~40% とばらつきが大きい、沖積地盤では E 断面以外で 10~20% と一般的に解析に用いられる値を示している結果となった。

洪積地盤では実測値の変位量が小さく、砂層のような変形係数の大きい地盤では応力解放率 α の感度も鈍いことから、解析結果に計測誤差等の影響が大きく反映され、フィッティングの精度によっても大きく結果が異なってくる。解析結果を見ても、計測誤差 $\pm 1\text{mm}$ に対する応力解放率 α が 10% もあり、このことから洪積地盤では応力解放率 α にばらつきが生じたものと考えられる。

一方、沖積地盤では実測値の変位量が比較的大きく、解析結果に対する応力解放率 α の感度も敏感なことから、応力解放率がある一定の範囲に収束しやすいと考えられる。また、E 断面は沖積地盤に分類されているが、トンネル上部に硬質な礫層が分布しており、トンネルの上半分以上は硬質な地盤であるため洪積地盤と同様に大きな応力解放率を示したも

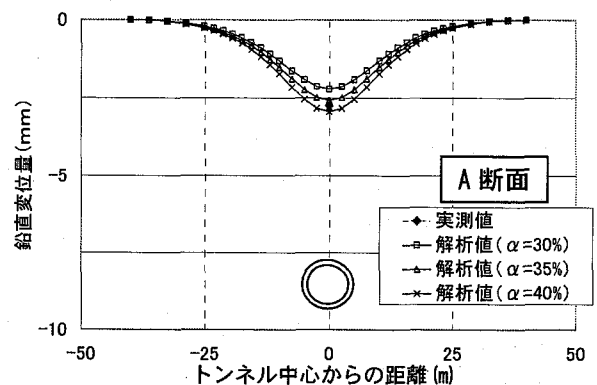
のと考えられる。

また、施工方法による応力解放率 α に着目すると、泥水式シールドでは洪積地盤で 12~40%、沖積地盤で 15~22%、泥土圧シールドでは洪積地盤で 35%、沖積地盤で 60% となった。これによると、施工方法による有意な差が見られないことから、同様に扱ってよいと考えられる。

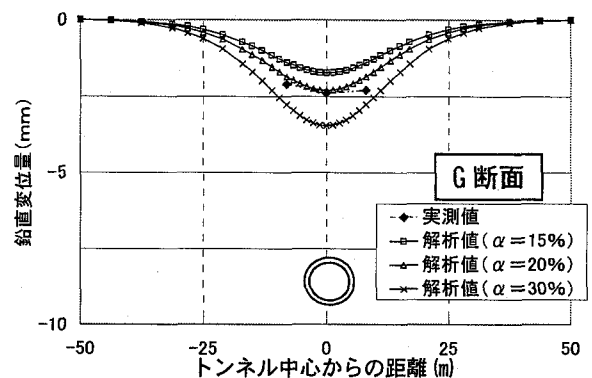
(2) 切羽圧作用時の補正係数 β の算定

地中応力に対して補正係数 β をパラメータとし、実測値とフィッティングさせることで補正係数 β の算定を行なった。

表 3.2 および図 3.2 に洪積地盤と沖積地盤の解析結果を示す。



(1) 洪積地盤 (A 断面) 解析結果



(2) 沖積地盤 (G 断面) 解析結果

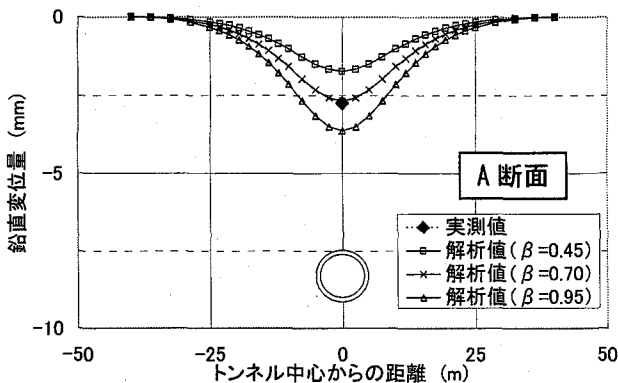
図 3.1 地表面変位分布 (応力解放率 α)

表 3.1 解析結果一覧 (応力解放率 α)

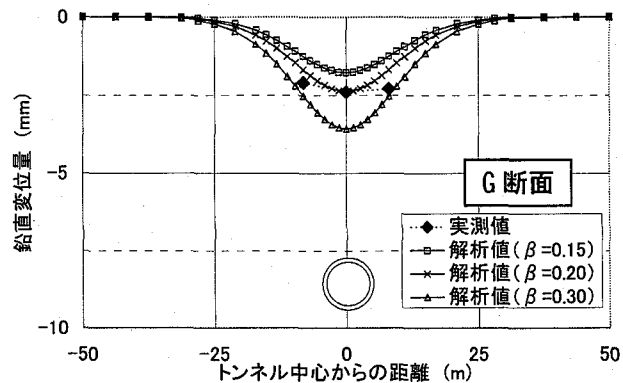
	通過土質	N 値	土被り (m)	シールド形式	応力解放率 α (%)	変位量 (mm)	
						地表面	トンネル直上
A 断面	洪積砂質土	58	14.28	泥土	35	-2.75	-4.00
B 断面	洪積砂質土	8	4.00	泥土	—	1.50	-2.00
C 断面	洪積砂礫	82	21.70	泥水	12	-0.80	-2.40
D 断面	洪積砂質土	63	25.11	泥水	40	-1.10	-3.45
E 断面	沖積砂礫	34	14.44	泥土	60	-2.40	-5.50
F 断面	沖積粘性土	5	24.69	泥水	22	-7.00	-17.00
G 断面	沖積粘性土	5	19.33	泥水	20	-2.40	-6.70
H 断面	沖積粘性土	4	15.90	泥水	15	-3.10	-7.80

表 3.2 解析結果一覧（切羽圧による補正係数 β ）

	通過土質	土被り m	土圧 kN/m ²	水圧 kN/m ²	合計 kN/m ²	シールド 形式	切羽圧 kN/m ²	補正係数 β (切羽圧)	地表面 変位量 (mm)
A 断面	洪積砂質土	14.3	-71.7	-168.2	-239.9	泥土	252	0.70	-2.75
B 断面	洪積砂質土	4.0	-37.6	-54.4	-91.9	泥土	93	—	1.50
C 断面	洪積砂礫	21.7	-76.6	-248.4	-325.0	泥水	290	0.10	-0.80
D 断面	洪積砂質土	25.1	-81.0	-268.4	-349.4	泥水	390	1.00	-1.10
E 断面	沖積砂礫	14.4	-87.9	-143.2	-231.1	泥土	240	1.00	-2.40
F 断面	沖積粘性土	24.7	-298.6	—	-298.6	泥水	310	0.16	-7.00
G 断面	沖積粘性土	19.3	-244.0	—	-244.0	泥水	310	0.20	-2.40
H 断面	沖積粘性土	15.9	-207.4	—	-207.4	泥水	320	0.60	-3.10



(1) 洪積地盤 (A 断面) 解析結果



(2) 沖積地盤 (G 断面) 解析結果

図 3.2 地表面変位分布（切羽圧での補正係数 β ）

一般に補正係数 β は、硬質地盤で 0.35、軟弱地盤で 0.4 とし地盤変位予測を行なわれている。しかし、本報告での解析では、洪積地盤の 3 断面では 0.1, 0.7, 1.0 とばらつきの大きな値を示す結果となった。この 3 断面では、切羽圧は静止土圧および水圧の和と同程度であり、一般的な実施工として見ることができる。地盤構成は、C 断面では土被りが大きく、硬質な地盤であり実測値の変位量も小さいため、補正係数が 0.1 と小さな値を示す結果となった。D 断面では図 3.3 に示すとおりトンネル上部に評価の難しい礫層が分布しているため、これらが補正係数に影響を与え、1.0 と大きな補正係数となったと考えられる。また、洪積地盤では実測変位量が小さく、計測誤差の影響が占める割合が大きいため、補正係数 β の感度が鈍い洪積地盤ではばらつきが大きくなったと考えられる。

一方、沖積地盤での補正係数 β も 0.16~1.0 と、ばらつきの大きい結果となった。切羽圧は H 断面で静止土圧の 1.5 倍程度と高い圧で管理されているため、0.6 と高い補正係数を示す結果となったが、他の 3 断面では静止土圧および水圧の和と同程度であり、一般的な施工条件と見ることができる。また地盤構成は、F, G, H 断面では軟弱な沖積地盤が分布しているが、E 断面ではトンネル上部に硬質な礫層が分布している。したがって、E 断面は硬質な地

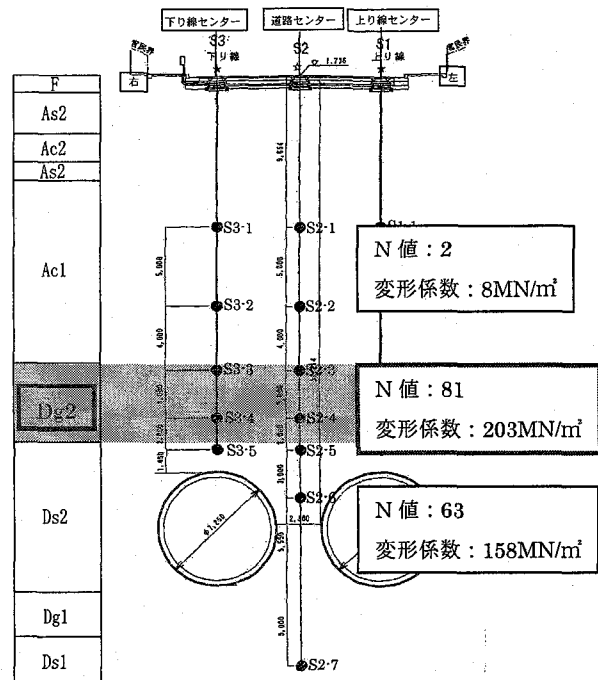


図 3.3 D 断面土質分布

盤であるため、補正係数の傾向が洪積地盤に近い結果となったものと考えられる。F 断面では 0.16, G 断面では 0.2 と、一般の補正係数に比べて小さい値を示しており、解析結果を見ても変位量が大きく、補正係数の感度が敏感であることが分かる。

表 3.3 解析結果一覧（裏注圧による補正係数 β ）

	通過土質	土被り	土圧	水圧	合計	シールド 形式	裏注圧	補正係数 β (裏注圧)	地表面 変位量 (mm)
		m	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²		kN/m ²		
A 断面	洪積砂質土	14.3	-71.7	-168.2	-239.9	泥土	338	—	-2.75
B 断面	洪積砂質土	4.0	-37.6	-54.4	-91.9	泥土	83	—	1.50
C 断面	洪積砂礫	21.7	-76.6	-248.4	-325.0	泥水	627	—	-0.80
D 断面	洪積砂質土	25.1	-81.0	-268.4	-349.4	泥水	370	0.80	-1.10
E 断面	沖積砂礫	14.4	-87.9	-143.2	-231.1	泥土	347	—	-2.40
F 断面	沖積粘性土	24.7	-298.6	—	-298.6	泥水	327	0.20	-7.00
G 断面	沖積粘性土	19.3	-244.0	—	-244.0	泥水	337	0.30	-2.40
H 断面	沖積粘性土	15.9	-207.4	—	-207.4	泥水	347	—	-3.10

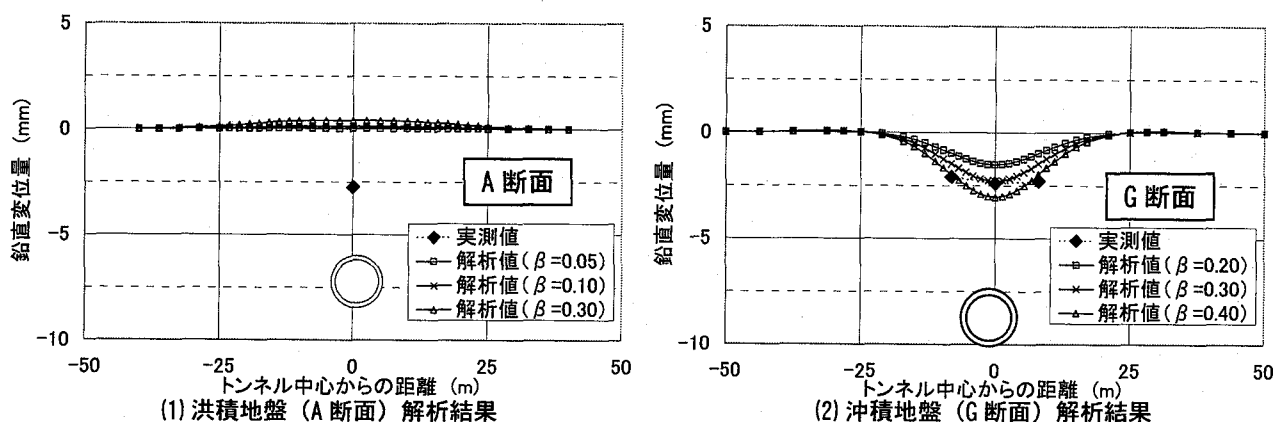


図 3.4 地表面変位分布（裏注圧での補正係数 β ）

また、施工方法による補正係数 β に着目すると、泥土圧シールドでは洪積地盤で 0.7、沖積地盤で 1.0、泥水式シールドでは洪積地盤で 0.1~1.0、沖積地盤で 0.16~0.6 となった。これによると、施工方法による有意義な差が見られないことから、同様に扱ってよいと考えられる。

(3) 裏注圧作用時の補正係数 β の算定

地中応力に対して補正係数 β をパラメータとし、実測値とフィッティングさせることで補正係数 β の算定を行なった。表 3.3 および図 3.4 に洪積地盤と沖積地盤の解析結果を示す。

解析の結果、洪積地盤の 3 断面で実測値と解析値との変位形状が合わず、フィッティングさせることが出来なかった。実施工では切羽圧より裏注圧を若干高く設定するのが一般的であるが、A 断面では切羽圧に比べて裏注圧が 1.4 倍、C 断面では 2.2 倍程度大きく、地盤が隆起する形状を示す結果となった。一方、D 断面では切羽圧より裏注圧の方が小さく、フィッティングさせることはできるものの、トンネル上部に硬い礫層が分布していることもあり、補正係数は 0.8 と大きな値を示す結果となった。

沖積地盤では、E 断面、H 断面で実測値と解析値

との変位形状が合わず、フィッティングさせることが出来なかったが、F 断面では 0.20、G 断面では 0.3 と切羽圧での検討同様に一般の補正係数に比べて小さな値となった。

ここで、E 断面での裏注圧は、A 断面と同様に切羽圧の 1.5 倍程度大きい、H 断面では、切羽圧と同等の裏注圧で管理されている。しかし、切羽圧が静止土圧の 1.5 倍と大きな圧力で管理されているため、E、H 断面の 2 断面では地盤が隆起する解析結果となった。一方、F、G 断面での裏注圧は切羽圧より若干高く、一般の実施工として適切な圧力で管理されており、フィッティング解析の結果、補正係数 β は従来の値より小さな値となった。これは、従来と比べ施工精度の向上や施工管理等の進歩によって、変位量が小さくなる傾向にあると考えられる。したがって、補正係数 β も一般の 0.4 より小さい結果となったものと考えられる。

4. まとめ

(1) 応力解放率 α と補正係数 β の使い分け

応力解放率 α を用いる解析手法では、地中応力に一律で α を乗じ掘削相当外力を算出するため容易に解析することが可能であるが、掘削相当外力がトン

ネル全周で内向きに作用するため、図 4.2(1)に示すとおり、ほとんどの解析ケースでトンネル側方部の変位はトンネル内向きに発生し、実施工での変位形状と一致しない場合がある。一方、補正係数 β を用いる解析手法ではトンネル全周の各々の位置で地中応力と施工時作用応力（切羽圧、裏注圧）を算出するため、図 4.2(2)のようにトンネル側方部の外向きの変位を再現することが出来る。したがって、併設施工時等でトンネル側方変位量を評価したい場合は補正係数 β による解析手法を用いることが望ましいと考えられる。

(2) 補正係数 β での切羽圧と裏注圧の使い分け

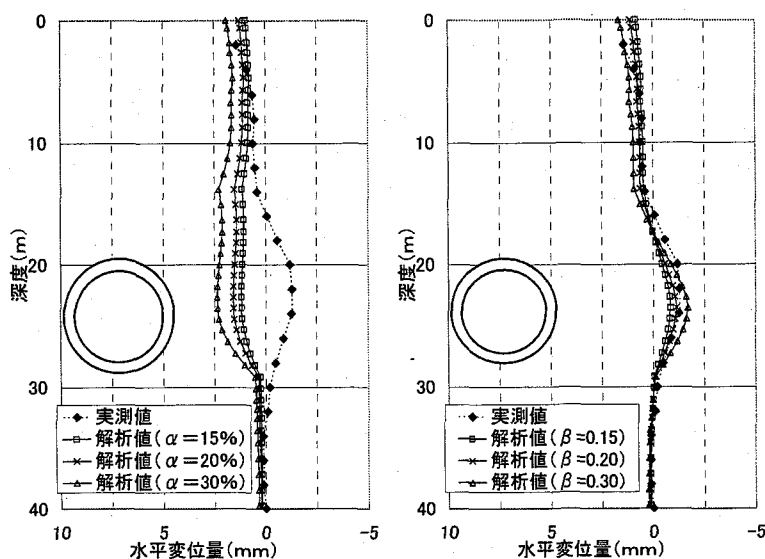
本検討断面の工区では裏注圧を高めに管理して後続沈下を抑えるよう施工されているため、裏注圧を用いて解析を行なうと地盤が隆起し、実地盤の挙動に則さない結果となった。また、図 4.2 に示すような計測データを見ると、シールドマシン通過後の変位量は比較的小さく、切羽到達時からテール通過時の間で全変位量の大部分が発生している。したがって、地盤変位解析を行なうにあたっては、補正係数 β を用いる解析手法では切羽圧を用いて補正係数 β を設定することが望ましいと考えられる。

しかし、実施工では軟弱な沖積地盤では圧密沈下等により後続沈下が発生している事例もあり、一概に最終沈下量の大部分がシールド通過時までには発生しているわけではない。したがって、本検討結果は後続沈下が発生しないことが条件であったが、実施工においては裏注圧を適切な時期、充填率により管理することが必要である。

(3) 掘進管理の留意点

現状のシールドトンネル施工は、施工管理の向上により従来に比べて地盤変位量を抑制することが可能である。実施工においては、地中応力と切羽圧のバランスを取り、地盤変位を可能な限り抑制するよう施工管理を行なっている。

洪積地盤での施工においては、地盤が硬質であるため掘削時に地山が自立し、切羽圧が与える地盤変位量への影響は小さい。解析結果を見ても、切羽圧の設定によって生じる沈下量の絶対値に有意の差が



(1) 応力解放率 α での解析結果

(2) 補正係数 β での解析結果

図 4.2 水平変位分布 (G 断面)

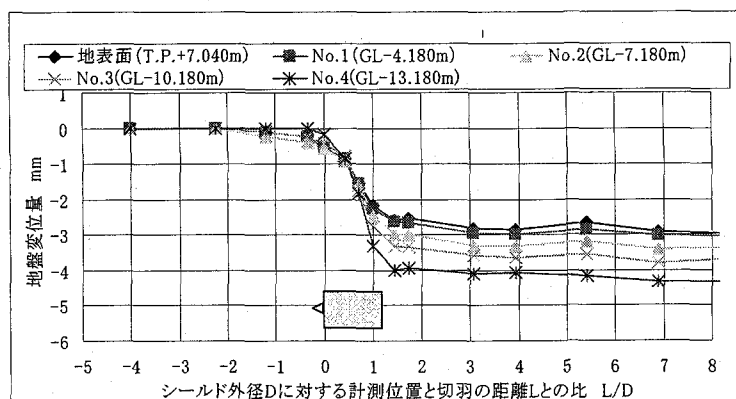


図 4.2 変位計測データ (A 断面)

見られないことから、主働土圧～静止土圧の範囲内で予備圧を考慮する程度で問題は少ないと考えられる。

一方、沖積地盤のような軟弱地盤では、地中応力と切羽圧の関係が地盤変位量に大きく影響するため、切羽圧は静止土圧に比べて大きく設定する場合がある。解析結果によると、静止土圧＋予備圧（70～120kN/m²）で切羽圧を設定している G, H 断面の沈下量は比較的小さく、予備圧を小さくしている F 断面では沈下量が大きくなっている。このことから、地盤沈下に対する切羽圧の管理は、沖積粘性土地盤では特に重要であることがわかる。このとき、本検討のような地盤条件下では、予備圧の設定は 100 kN/m² 程度が目安になると考えられる。

ただし、土被りが浅い場合は近接構造物への影響が多くなることがあるため、現場の全体状況を確認し、管理値の設定を行なわなければならない。

(4) 今後の課題

本報告では、現在一般に用いられている応力解放率 α および補正係数 β について考察を行ったが、係数のばらつきが大きい結果となった。したがって、より計測および解析の精度を高めるために以下の項目が課題となる。

- a) 沖積地盤については検討断面を増やし、データの蓄積を行なうことで応力解放率および補正係数を検討する必要がある。
- b) コピーカッターや蛇行量等の施工計測項目や計測頻度を増やし、より正確な施工状況を把握する必要がある。
- c) 精度の高い解析を行なうため、横断方向の計測範囲拡大と精度の高い計測方法、システムの開発を行い、生の計測データを収集する必要がある。
- d) 軟弱地盤では長期的な変位計測とともに、シールドトンネル掘進に伴う圧密沈下のメカニズムを解明し、逆解析に反映させる必要がある。

参考文献

- 1) 小山昭，鋤持芳輝，他：シールド掘進に伴う地盤変位解析，トンネル工学研究報告，報告集第15巻 報告(40)，pp.273～279，2005.12