

国際線エプロンにおける京急シールドへの影響対策工の設計

国際線エプロン JV 天野 喜勝

キーワード：京浜急行シールドトンネル、軽量盛土、影響検討、圧密沈下

1. まえがき

国際線エプロン事業により造成するエプロン舗装の天端（計画地盤高）は、路体・路床、舗装によって、現地盤高より2m程度地盤を嵩上げすることとなる。しかしながら、また、事業用地内の地下には、京浜急行シールドトンネルや三愛石油シールドトンネルが、事業用地境界付近の環状8号線に沿っては、東京モノレールの橋脚等の重要施設が設けられており、盛土による地盤沈下等の影響を受けることとなる。そこで、本事業では、構造安定性及び施設運用に影響を与えない様、重要施設近傍については軽量土による置換え及び盛土を行い、施設の安全性を確保する。

本報文では、上記のうち、京浜急行シールドトンネルに対する影響対策工の考え方について報告する。

2. 京浜急行シールドトンネル概要

京浜急行電鉄空港線トンネルは、ボックスカルバートンネル区間とシールドトンネル区間により構成される。このうち、本事業範囲（エプロン部）はシールドトンネル区間に位置する。

京浜急行シールドトンネルは、外径7.0mのRCセグメント及び二次覆工からなる。シールドトンネルの深度は、エプロン端部に位置する第4換気塔部（図-1“A部”）で土被り約8mであり、現空港側に向かうにつれて深くなり、国直轄工事との事業境界部（図-1“B部”）では約12.5mの土被りとなる。

エプロン部の土層構成は、上から約10mの沖積砂質土層（Bs、As1）、約20mの沖積粘性土層（Ac2上、Ac2下、Asc）そしてその下に洪積粘性土層（Dc1）が10m～30mの厚さで堆積している。シールドトンネルは、ほぼ沖積粘性土層上部を通過しており、本事業による地盤の嵩上げにより前記の粘性土層が圧密沈下を起こし、シールドトンネルに不同沈下等の影響を与えることが心配される。

最も盛土高が大きい箇所では約3.3m、最も小さい箇所では約1.8mであり、トンネル縦断方向に沿った盛土による増加荷重に開きがあるため、シールドトンネルへの影響を検討する上ではトンネル縦断方向の圧密沈下量分布を適切に評価する必要がある。

今回の防護工仕様の設定において最も注意すべき事項は、立坑（第4換気塔）は洪積層まで到達している鋼管矢板に囲まれておりほとんど沈下が発生しないため、立坑近傍では増加荷重をほぼ0とし、圧密沈下を抑え、段差を生じさせない必要があることである。

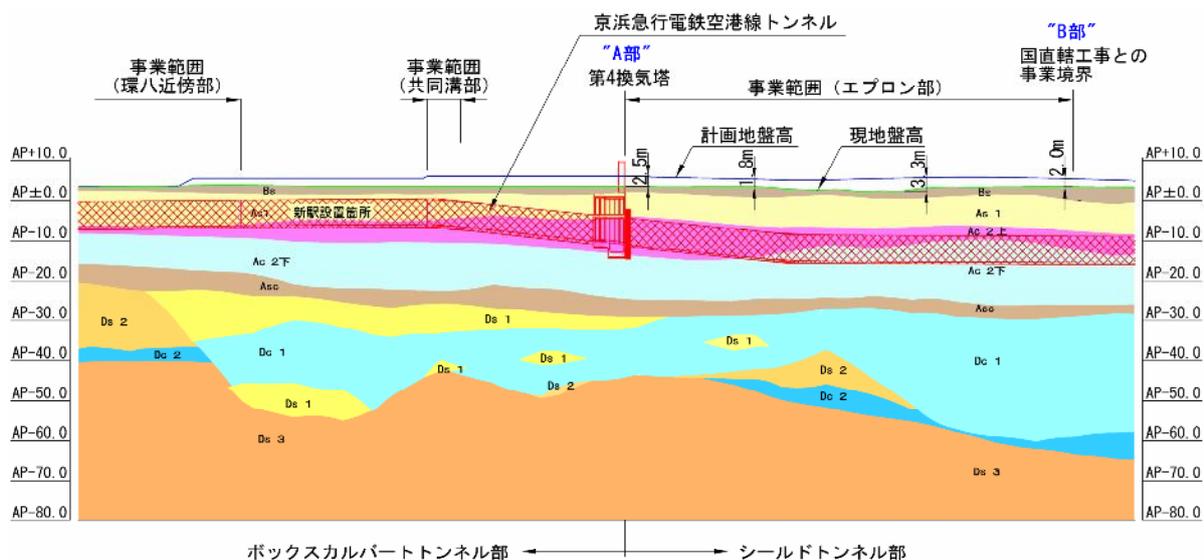


図-1 京浜急行トンネル縦断図

3. 影響検討の検討方針

3-1 要求水準と留意事項

既設構造物への影響検討に対する要求水準を表-1に示す。

表-1 既設構造物への影響検討に対する要求水準¹⁾

項目	要求内容	基準類
地盤改良工 地盤変形の既設構造物への影響検討	用地造成等に伴い発生する施工中及び設計供用期間中における地盤変形（不同沈下、側方流動等）が既設構造物に及ぼす影響については、既設構造物の構造特性を考慮し、地盤変形が既設構造物の構造安定性及び施設運用に影響を与えないことを定量的に示すこと。なお、定量的に示すことが困難な施設については、既往の実績等から、その妥当性を示すこと。	既設構造物図面集 京浜急行既設構造物関連資料

また、京浜急行電鉄株式会社より提示された留意事項（設計関係）を以下に示す。

- ①本事業が鉄道施設に及ぼす変状を軽減するための事前の変状防止工を提案すること。
- ②本事業（変状防止工を含む）による鉄道トンネルについて適切な解析手法、期間を設定した上で構造解析を行い、原設計における耐力及び耐震性能が維持できることを確認すること。
- ③本事業による鉄道施設の挙動が管理値以内であることを照査し、管理値を超える場合は対策工を提案し、管理値以内となることを照査すること。

3-2 検討方針

要求水準及び留意事項を満足するために、以下の検討方針で検討を行った。

- 1) 構造安定性及び施設運用に影響を与えないための目標値を設定する。
 - ・京急シールド部は、要求基準を満足する範囲で沈下を許容し、舗装へ及ぼす不同沈下の影響を軽減する。
 - ・立坑とシールドの接続部は、増加荷重をほぼ0とする。
 - ・シールド本体の応力レベルは、現状発生している応力レベル程度に抑える対策工とする。
- 2) 既設構造物の構造特性を考慮する。
 - ・二次覆工を考慮した適切な構造モデルを設定する。
 - ・沈下が現在までに生じているが、その影響を適切に考慮する。
- 3) 適切な解析手法を用い、設定した目標値を満足することを定量的に示す。
 - ・地盤変状については粘土層の圧密沈下による影響が主となるため、沈下の影響を適切に評価できる弾粘塑性 FEM 解析²⁾を用いる。
 - ・掘削リバウンド解析については、弾性 FEM 解析を用いる。
 - ・シールド構造検討については、地盤の弾粘塑性解析よりシールドへ作用する荷重を算出し、別途二次覆工を考慮した梁ばねモデルにより詳細な検討を実施する。その結果、設定した目標値を満足することを定量的に示す。

3-3 影響検討フロー

京浜急行シールドの軽量盛土工仕様は、前述の検討方針を踏まえ、図-2 に示す影響検討フローに従い検討を行った。

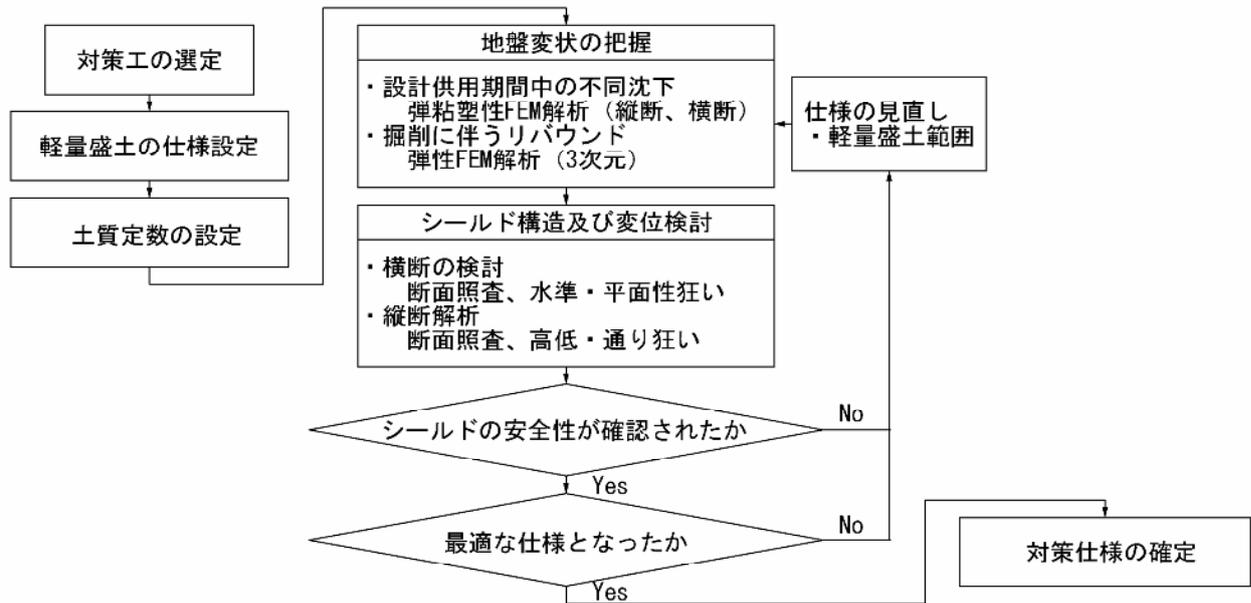


図-2 影響検討フロー

4. 軽量盛土仕様

図-2 の検討フローに従い検討を実施し、軽量盛土仕様を決定した。京浜急行シールドトンネル部に採用した軽量盛土の特徴及び使用箇所を表-2 に示す。

表-2 軽量盛土一覧表

軽量盛土	単位体積重量 (kN/m ³)	特徴	使用箇所
SGM (軽量混合処理土)	11	・羽田での実績がある ・建設残土や発生土を有効に利用できる ・水中で分離しにくいいため、水中打設できる	シールド一般部 (エプロン部)
FCB (気泡混合軽量土)	9 (気中) 11 (水中)	・SGMより軽量である ・原料土は購入砂 (Fc ≤ 15%)	シールド立坑近傍部 (GSE用地部)
水砕スラグ	14~15	・現地発生土より軽量である ・粒子の噛み合わせが良好なため、繰り返し荷重に対しても高い安定性を有する	SGM直上の路床部

各エリアの軽量盛土仕様は、下記のとおりを設定した。

①京浜急行シールド一般部 (エプロン部)

- ・要求水準を満足する範囲で沈下を許容し、舗装へ及ぼす不同沈下の影響を軽減した。
- ・エプロン部は軽量盛土として、実績の多い軽量混合処理土 (Super Geo-Material : 以降SGM) を採用し、路床には水砕スラグを用いた。
- ・SGMの範囲は、シールド中心より35mの範囲 (幅70m) とし、深さはシールドの沈下量の曲率が厳しくない様にブロック毎に設定した。 (t=2.5m、t=3.0m、t=3.5m)

②京浜急行シールド立坑近傍部 (GSE 用地部)

- ・立坑とシールドの接続部は、不同沈下を極力生じさせないため、増加荷重をほぼ0とした。
- ・As舗装部であり、万-の場合に補修が容易であることから、羽田での実績はないがSGMより軽量の気泡混合軽量土 (Foamed Cement Banking Method : 以降FCB) を用いた。・FCBの範囲はシールド中心から35mの範囲 (幅70m) 、深さAP+0.2m~路盤下端 (t=5m程度) とした。

決定した軽量盛土縦断面を図-3に、京急直上部断面図（SGM部）を図-4示す。

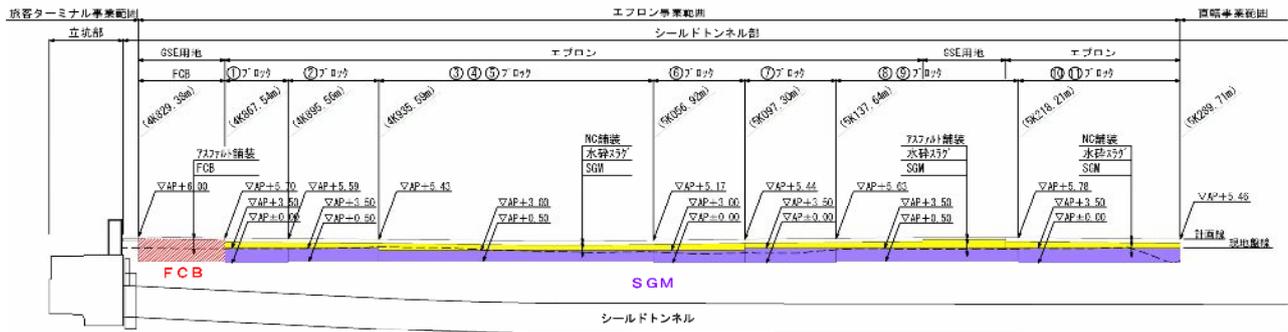


図-3 軽量盛土縦断面

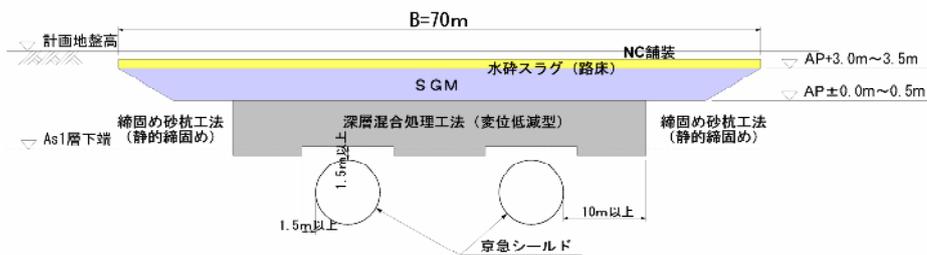


図-4 京急直上部断面図（SGM部）

5. 設計供用期間中の不同沈下に対する検討

5-1 地盤変状の検討

5-1-1 解析断面位置及び断面形状

本事業により発生する京浜急行シールドの不同沈下の影響を検討するため、京浜急行シールドに沿った断面（縦断）の解析を行った。

また、当該区間の京浜急行シールドは鉄筋量が異なる2種類のセグメントがあり、土被りの小さい範囲に適用されるRC1セグメントと、土被りの大きい範囲に適用される鉄筋量の多いRC2セグメントに分けられる。そのため、それぞれの区間のうち縦断解析の結果において沈下量大きい2断面（横断1：4K+900付近、横断2：5K+100付近）について横断解析を行った。

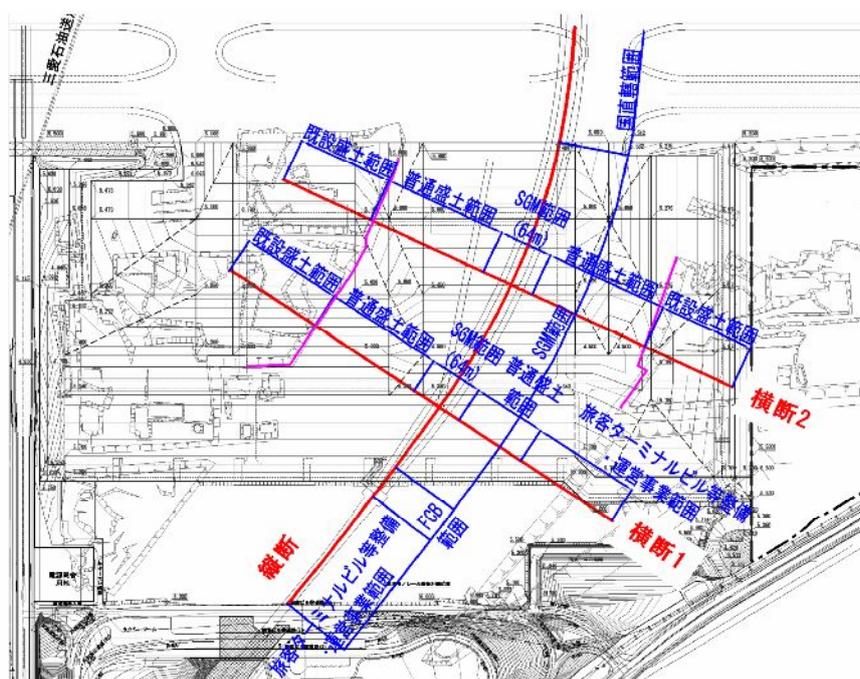


図-5 検討断面位置図

土質調査結果より3次元土層モデルを作成し、対象断面位置の土層断面を取り出すことで、水平成層地盤ではなく実際の土層断面を忠実に表現した2次元弾粘塑性FEMモデルを作成した。

図-6(a)に縦断、図-6(b)に横断1の解析断面図を示す。なお、横断解析におけるSGM幅は、天端幅(70m)と下端幅(58m)の平均値(64m)としてモデル化した。

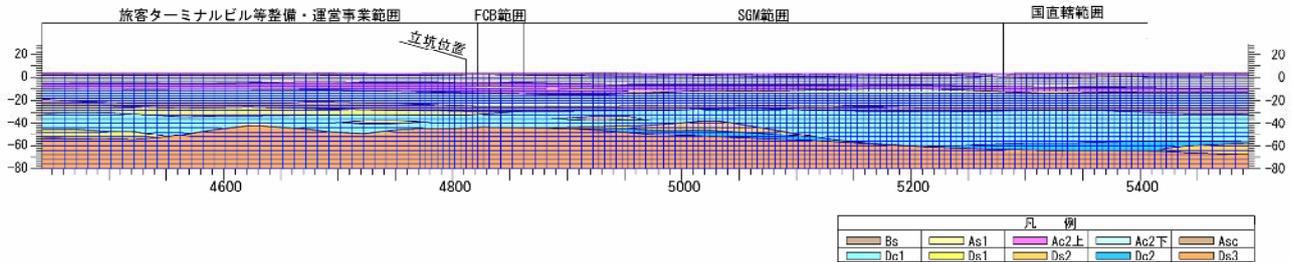


図-6(a) 解析モデル図(縦断)

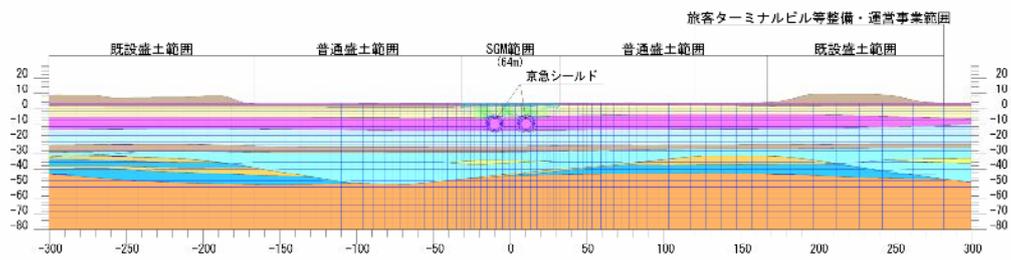


図-6(b) 解析モデル図(横断1)

5-1-2 解析ステップ

地盤変状検討(弾粘塑性FEM解析)に用いる解析ステップは、実際の工事工程に準じて設定した。図-7に示す工事工程表より、地盤変状に影響を及ぼすと考えられるステップを抽出して解析を実施した。

解析対象期間は、要求水準書で示された設計供用期間である供用開始後50年までとした。

工種	2006年度(H18年度)			2007年度(H19年度)												2008年度(H20年度)												2009年度(21年度)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
解析ステップ	STEP3			STEP4			STEP5						STEP7			STEP8			STEP9			STEP10			STEP11			STEP12			STEP13(供用開始)								
国際線事業 事業工程	▼本工事着手			▼旅客ターミナル引渡し						STEP6			▼貨物ターミナル引渡し			▼カーサ付引渡し									▼本工事引渡し														
土工 準備土工	表土撤去整地・京急緩衝部			仮置土砂撤去工			貨物地区→旅客地区						貨物ターミナル地区引渡し												供用準備期間														
路体盛土	仮置き土撤去部整形・転圧			軽量混合処理工						軽量盛土												2ヶ月																	
軽量盛土	京浜急行トンネル対策:SGM			京浜急行トンネル対策:FCB						空港連絡道路対策			軽量盛土												STEP14: 供用後1年 STEP15: 供用後5年 STEP16: 供用後10年 STEP17: 供用後20年 STEP18: 供用後27年 STEP19: 供用後50年														
舗装工 路床工	路床工(京急防護部除く)			路床(京急防護部)						下層路盤			上層路盤			NC舗装			目地工																				
エポキシ舗装工	エポキシ舗装工			GSE舗装工						GSE半たわみ舗装工			路床			路盤			路盤、As舗装			路盤、As舗装																	
サルダール舗装工	サルダール舗装工			路床						路盤																													

図-7 工事工程表(南側エプロン)

5-1-3 荷重条件

設定した軽量盛土形状での増加荷重を以下の通りに算定した。

実施設計時に行った測量により詳細な現地盤高を設定し、計画地盤高との関係より、それぞれの位置での増加荷重を算定し、工事工程に準じてステップ毎に増加荷重を载荷した。

本事業範囲外(旅客ターミナルビル側、及び国直轄側)の増加荷重についても本事業範囲の沈下分布に

影響を及ぼすため、関係事業者（旅客 PFI 事業 SPC、国土交通省 関東地方整備局、及び京浜急行電鉄株式会社）との協議により図-8 の様に設定した。特に、旅客ターミナルビル側の増加荷重は立坑近傍の沈下に影響を与えるため、FCB 範囲と同等の荷重レベルに抑えることで調整した。

なお、増加荷重の算定時には、安全側を考え地下水位は AP+2.1m のままとし、盛土による地下水位面上昇は無視した。立坑近傍部は、FCB を採用することにより増加荷重をほぼ 0 としている。また、SGM 範囲は、極力増加荷重分布が滑らかとなる様に各ブロックの軽量盛土形状を設定した。増加荷重の最大値は 32kN/m² 程度となった。

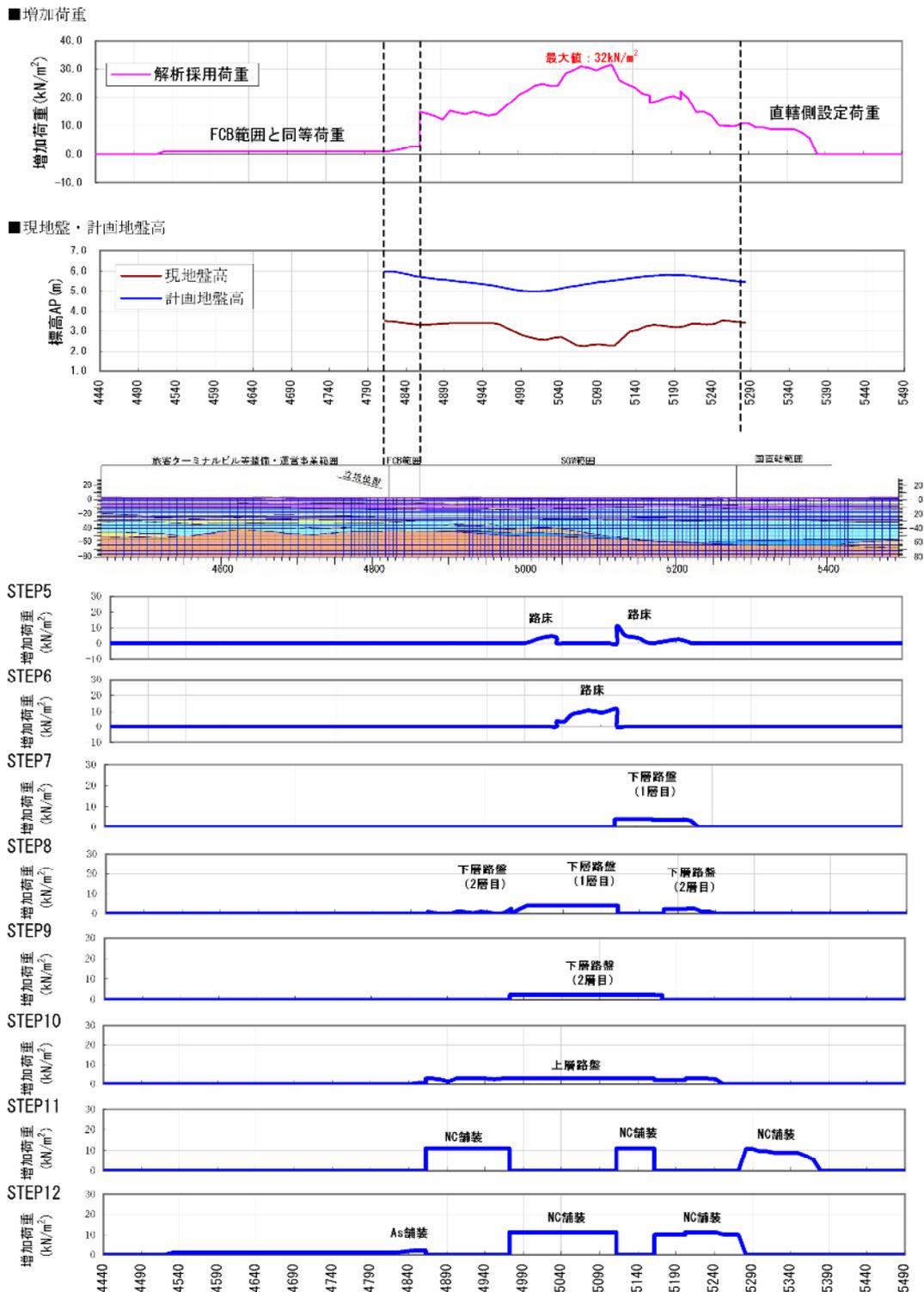


図-8 増加荷重（縦断解析）

5-1-4 縦断方向沈下量分布

シールド縦断方向検討時には、地盤変状解析（弾粘塑性 FEM 解析）より得られる各ステップの地盤沈下量をシールド解析の荷重条件とした。弾粘塑性解析は、横断、縦断のそれぞれで実施しているが、二次元の解析を行っていることから横断と縦断との交点である同じ位置での地盤変位が一致していない。そこで、横断と縦断の交点における最終ステップ（供用 50 年後）での地盤変位の比率（表-3）より縦断沈下量に 1.2 倍の割増を行い、シールド構造検討を行うこととした。

割増後の縦断の沈下量を図-9 に示す。縦断方向最大沈下量は 9.3cm となった。

また、シールド本体の検討時には、シールド完成後から現在までの沈下による影響を適切に考慮するため、実施設計時に実施したシールド本体の水準測量結果より現在までの沈下量を算定し、上記の本事業による沈下量に加算して検討を行った。

表-3 地盤変位の比率

変位 (cm)		荷重倍率	決定倍率
横断一断面 1	縦断 (横断 1 位置)	1.13	1.2 倍
4.2 cm	3.7 cm		
横断一断面 2	縦断 (横断 2 位置)	1.06	
8.0 cm	7.5 cm		

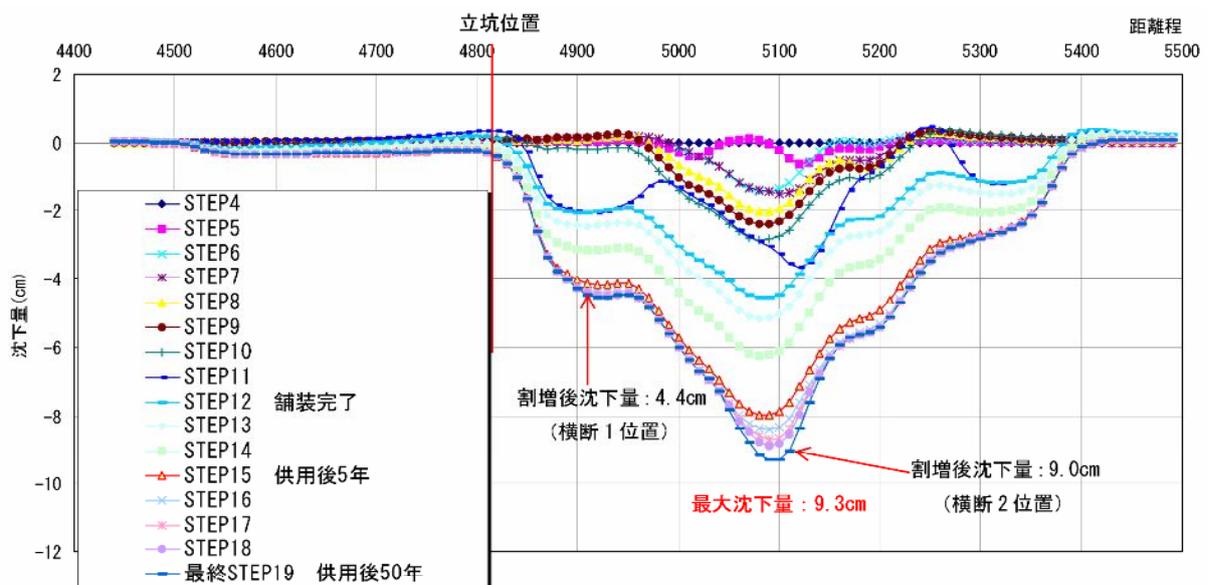


図-9 京浜急行シールド縦断の地盤沈下量

5-2 シールド本体の検討

京浜急行シールド本体の検討結果は、二次覆工に対する照査結果がクリティカルな要因となっており、軽量盛土工仕様の決定に際しては二次覆工の安全性の照査が非常に重要となる。

二次覆工の断面照査時に用いる許容値の設定については、エプロン事業範囲東側（沖合い展開側）において、現状の沈下により二次覆工縦断方向鉄筋の鉄筋応力度が長期許容応力度 $\sigma_{sa}=200\text{N}/\text{mm}^2$ 程度となると推定されること、現状においても問題なく列車が運行されていることを考慮し、鉄筋の許容応力度 $\sigma_{sa}=200\text{N}/\text{mm}^2$ より許容曲げモーメントを設定した。

一次覆工（セグメント）の常時許容曲げモーメントは、引張り側の継手部が最も弱部となっているため、継手板の長期許容応力度に相当する許容曲げモーメントにて設定した。

シールド本体の検討モデルは、以下の様にモデル化した。シールド本体検討モデルを図-10に示す。

- ・一次覆工および二次覆工を構造部材として考慮するため、2本の梁バネモデル（重ね梁）として評価する。
- ・二次覆工は、ひび割れの発生による剛性の低下が適切に考慮できるように非線形モデルを用いる。
- ・立坑部、可撓継手部等の結合条件についてもモデル化を行う。
- ・沈下量（現状の沈下量+本事業による沈下量）は、バネ端に強制変位として作用させる。

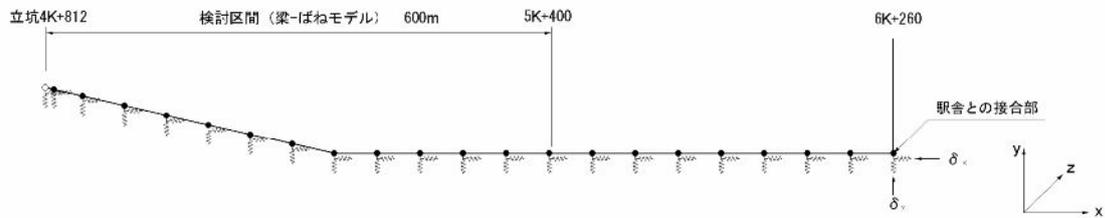


図-10 シールド本体検討モデル（梁バネモデル）

検討結果の例として、下り線の断面照査の結果を図-11に示す。図に示すとおり、すべての解析ステップにおいて許容値を満足する結果となった。また、得られたシールド鉛直変位分布より軌道に関する照査（高低狂いの照査）を行い、管理値を満足することを確認した。

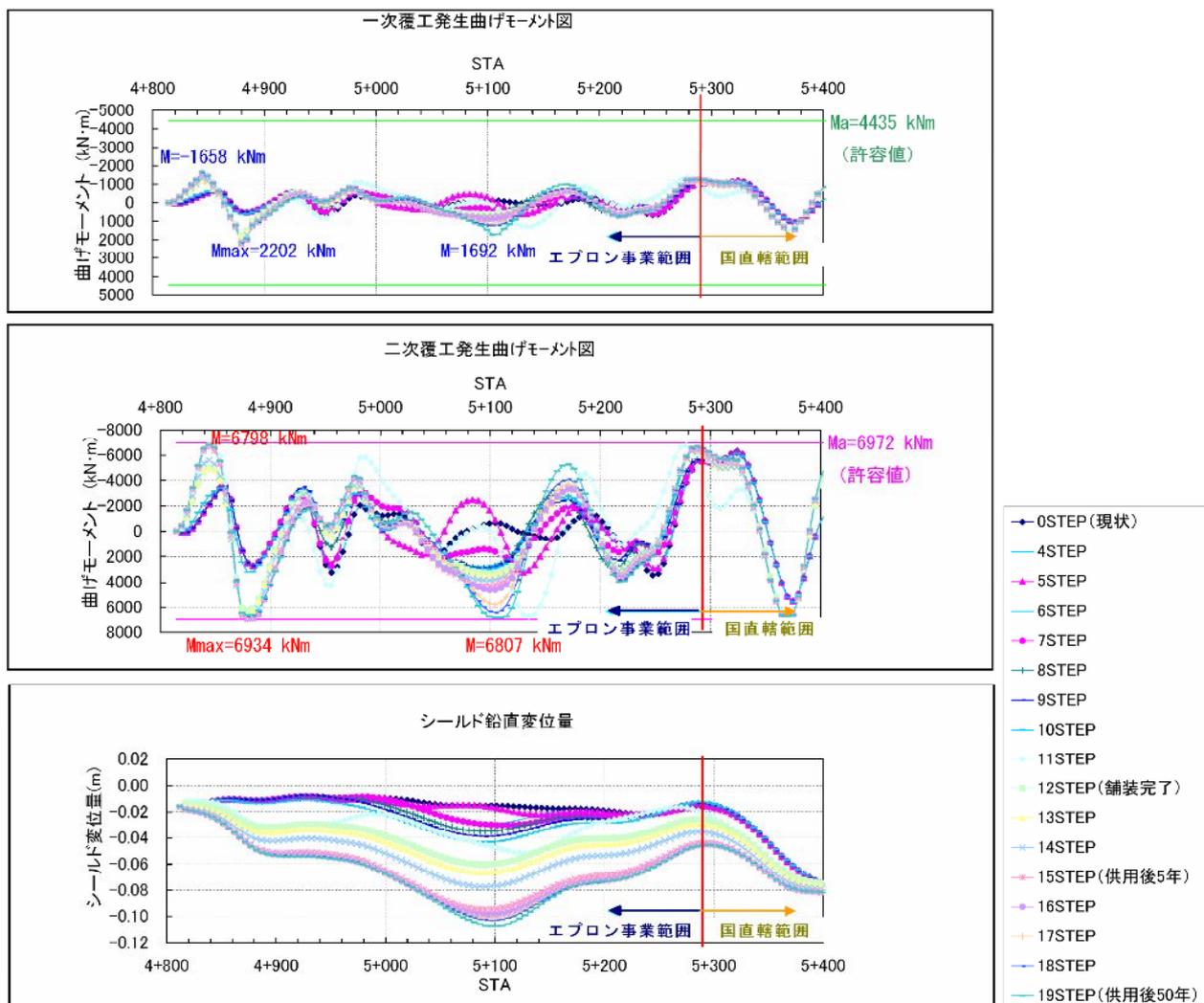


図-11 下り線曲げモーメント図及びシールド鉛直変位図

6. 掘削時のリバウンドに対する検討

軽量盛土（SGM、FCB）施工時には、一旦現地盤から掘削を行い、その後、軽量盛土で置換えすることとなる。そこで、掘削に伴うリバウンドがシールドに与える影響について検討を行った。なお、掘削に伴うリバウンドは、埋め戻しが為されれば元に戻るため短期的な荷重と考え、長期的に作用する沈下の地盤変状とは足し合わせないこととした。

6-1 地盤変状の検討

6-1-1 解析モデル

掘削による地盤のリバウンドは短期的な変形であるため、弾性的な挙動を対象とした線形解析にて検討した。掘削除荷による応力解放の3次元的な効果を考慮するため、解析には3次元モデルを使用した。

解析土層モデルは、現地盤高が高くリバウンド量が大きくなるSGMとFCBの取合部での土層断面を用いた。解析モデルは1/2断面モデルとし、後述する施工ステップに従い掘削を模擬した。リバウンド解析モデルを図-12に示す。

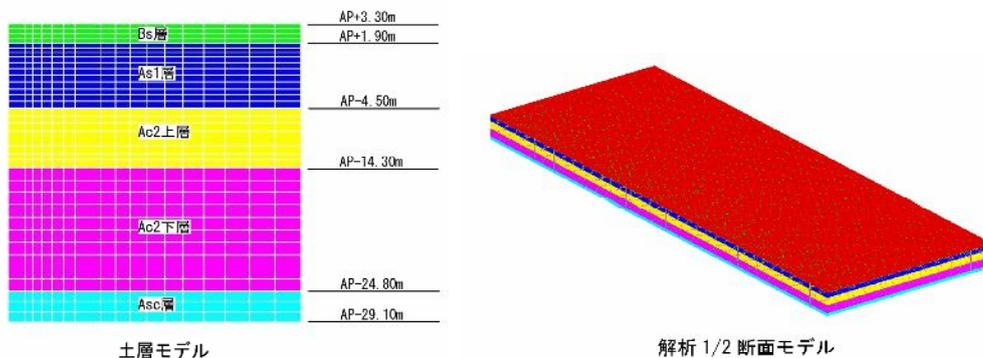


図-12 リバウンド解析モデル

6-1-2 解析ステップ

施工計画に基づき設定した軽量盛土エブロックを図-13に示す。掘削は全長を12ブロック（SGM範囲11ブロック、FCB範囲1ブロック）に分割し、1ブロック当たり幅70m、延長約40mとした。

SGMの施工は図-13に示す分割のうち①ブロックより行う。SGMの施工方法は、前ブロックのSGM置換え（打設）と並行して次ブロックの掘削を行うため、各ブロック単独での掘削に比べて掘削深さは浅いが延長が長い工程が含まれる。そこで、解析では、各ブロック掘削完了時だけでなく、前ブロックのSGM置換えを深度の半分まで行った時点で、次ブロックの掘削を延長の半分まで行うステップも考慮した。

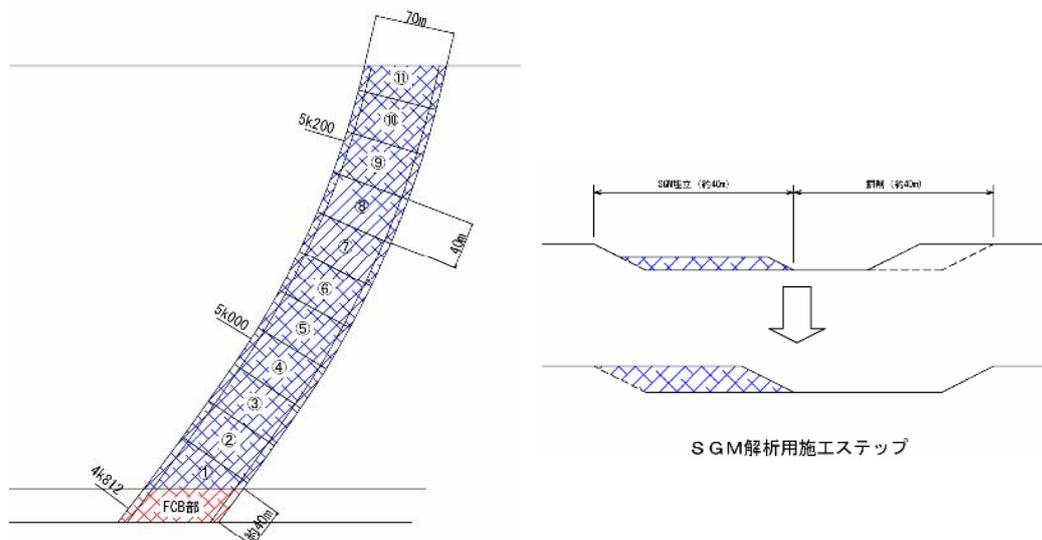


図-13 軽量盛土工施工ブロック分割及びSGM解析用施工ステップ図

6-1-3 縦断方向リバウンド量分布

リバウンド解析結果を図-14 に示す。なお、SGM 範囲のリバウンド量分布グラフについては、リバウンド量が大きい①ブロック側の 5 ステップ分の解析結果を抽出して示す。グラフで示す通り、SGM 範囲では①ブロック全掘削時のリバウンド量が最も大きな値を示し、次ブロックに移行するに従ってリバウンド量が減少する傾向となった。これは、①ブロック側（立坑側）のシールド位置が最も高く、②ブロック側に向かってシールドが深くなっていくことによるものと考えられる。

SGM 範囲、FCB 範囲ともに、リバウンド量は最大で 3cm 程度となった。

なお、SGM 範囲の解析で考慮した半置換、半掘削のステップは、各ブロック全掘削時に比べてリバウンド量が小さくなるため、施工時には各ブロックの全掘削時に最も注意を払う必要があることがわかった。

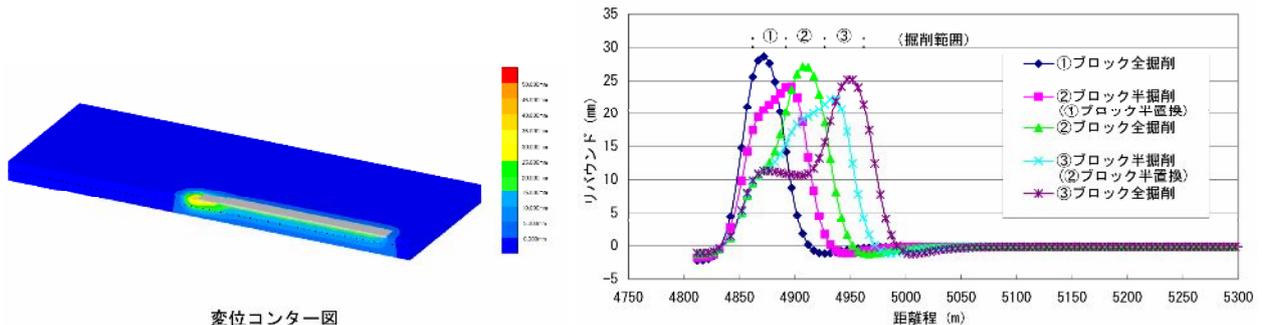


図-14(a) SGM 範囲掘削リバウンド解析結果

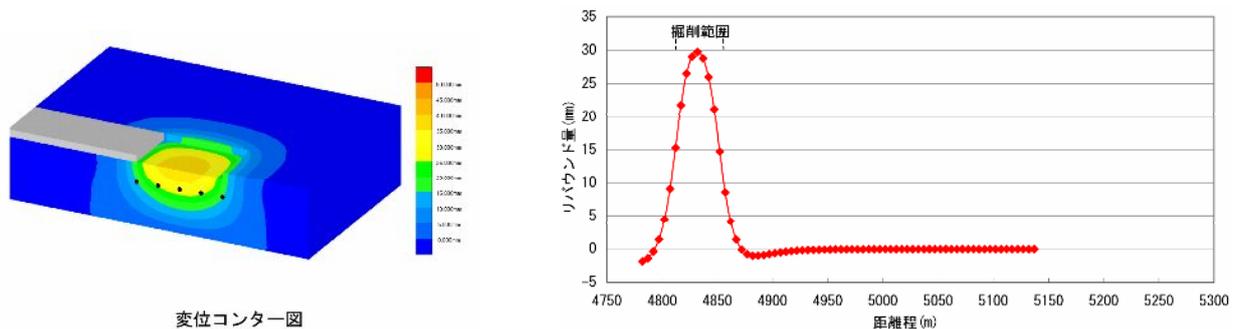


図-14(b) FCB 範囲掘削リバウンド解析結果

6-2 シールド本体の検討

掘削リバウンド解析から得られた地盤変位量を前述のトンネル縦断方向の梁バネモデルに強制変位として載荷し、シールド本体の断面照査、及び軌道に関する照査を行いシールドの安全性を確認した。

ただし、最初の掘削となる SGM①ブロック全掘削時には、掘削による影響範囲についてトンネル内に防護工（防護ネット）を設置した上で動態観測を行って、許容値の妥当性を確認し、必要に応じて対策工の検討を行うこととした。

7. あとがき

本報告で対象としている京浜急行シールドトンネルは、現在営業している路線であり構造安定性及び施設運用に影響を与えることは出来ない非常に重要な構造物である。本事業施工期間中は、シールドトンネルの挙動を常に動態観測し、問題が生じた場合には即刻作業中止、対策工の検討・実施ができる体制を確保した上で作業を遂行することとする。

(参考文献)

- 1) 東京国際空港国際線地区エプロン等整備等事業 業務要求水準書 国土交通省関東地方整備局 pp42, 2005.11
- 2) Atsushi Iizuka and Hideki Ohta, A DETERMINATION PROCEDURE OF INPUT PARAMETERS IN ELASTO-VISCOPLASTIC FINITE ELEMENT ANALYSIS, SOILS AND FOUNDATIONS Vol.27, No.3, pp71-87, Sept. 1987