

大規模開削工事に伴う地下鉄シールドの

リバウンド対策と実挙動

REDIMENTAL MEASURE TO REDUCE THE EFFECT OF BUOYANCY OF OPERATING TUNNEL CAUSED BY REMOVAL OF OVERBURDEN & FIELD MONITORING

國井一史¹⁾・角田浩¹⁾・小西由人¹⁾・金倉隆志²⁾・岡井春樹²⁾

Kazufumi KUNII, Hiroshi TUNODA, Yoshihito KONISHI, Takashi KANEKURA, Haruki OKAI

The Central Circular Shinjuku Route of Metropolitan Expressway SJ43(2・3) is the construction of a structure which consists of the road tunnel and the ventilation structure constructed using cut and cover tunnel method involving huge amount of excavation (232m(Length) x 35m(Width) x 28.6-35.0m(Depth)). The existing subway, Oedo Line, is running 3 to 5m below the base slab of the cut and cover tunnel and the rebound effect to the existing subway tunnel by the excavation works was concerned. This paper reports the movement analysis during the design stage, the precaution measures and actual monitoring result of the existing tunnel.

Key Words : Cut-and-cover tunnel, Rebound, Shield tunnel, Neighboring construction

1. はじめに

首都高速中央環状線 SJ43(2・3)トンネル工事は、道路トンネルと一体の換気所を建設する工事で、延長 232m、幅約 35m、深さ 28.6~35.0m の大規模掘削工事である。(図-1, 2)

掘削床付け直下には、3~5m の離隔で都営地下鉄大江戸線の双設シールドトンネル(以下、地下鉄シールド)が営業しており、掘削時のリバウンドによる地下鉄シールドへの影響が懸念された。本報では、事前影響予測、対策工検討およびシールドトンネルの実挙動について報告する。

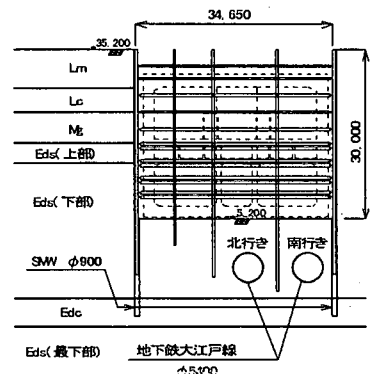


図-1 標準断面図

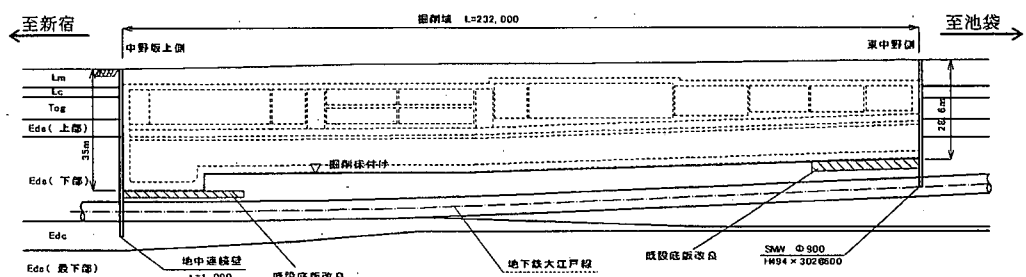


図-2 標準縦断面図

- 1) 正会員 首都高速道路公団 東京建設局 建設第1部
- 2) 正会員 ㈱熊谷組 土木本部 土木設計部

2. 近接構造物

地下鉄シールドは外径 5.4m で、図-1,2 に示すように、新設道路掘削縦断方向に沿って建設されている。リバウンドによって地下鉄シールドは主に縦断方向の変状を受けるが、シールド工の健全性確保と電車走行の安全確保が要求された。前者に対しては、リバウンドにより発生した変形量を外力に置換えてセグメント・ボルトに発生する応力度を照査することにした。後者に対しては、管理基準値として、1 次管理値 3.5mm/10m(2 次管理値 5.0mm の 70%)、2 次管理値 5.0mm/10m(管理限界 7.0mm の 70%)を設定した。

3. リバウンド予測と対策工検討

文献¹⁾によれば、リバウンド予測手法として、①弾性理論による方法(Steinbrenner の弾性解,etc)、②経験式による方法(リバウンド量と掘削排土荷重の相関式)、③FEMによる方法、等がある。①による方法と計測値の対応は良好であると言われているが、今回は、最大リバウンド量よりも相対リバウンド量の予測がより重要であるため、③の方法(弾性FEM解析)によることにした。

1) FEMモデルの評価—掘削平面形状の考慮—

2次元モデル(掘削幅B)と、3次元モデル(掘削幅Bとして、長辺長さ $L=B, 2B, 4B, 6B$ の4ケース)を用いてリバウンド量を算定し形状効果について検討した。図-3 に示すように、掘削幅B(35m)を固定し、長辺長さLを大きくして行くと、リバウンド量はLの増加とともに増加し、 $L=6B$ で概ね2次元モデルに一致した。本工事の掘削規模は $L=6B$ であり、2次元モデルで最大リバウンド量が評価できると考えた。一方、管理対象は縦断方向の相対リバウンド量であるため、別途、縦断方向の2次元モデルによって縦断変形モードを求めた。結局、2次元横断解析(最大量) + 2次元縦断解析(変形モード)でリバウンド量を推定することにした。(図-4、この段階では先行工区における物性値を適用した。)

2) 地盤変形係数の再評価—隣接工区の計測結果を用いた逆解析—

一般に、FEM解析による掘削解析では底面リバウンドを過大評価すると言われており、徐荷地盤の変形係数や構成則を適切に評価する必要がある。本工事では、先行工区で掘削に伴う地下鉄シールド浮上り量が計測されていたため²⁾、先行工区における掘削形状、地盤構成、山留め仕様をモデル化し、掘削に伴うリバウンド量をフィッティングすることで、最適除荷時の変形係数を求めた。なお、地盤のポアソン比は先行工区と統一した。フィッティング時のモデルを図-5に、地山条件・土留め条件を表-1,2に示す。フィッティングパラメータは、地下鉄シールドの浮上りに関係する床付け以深の地盤変形係数とし、基本値(孔内水平載荷試験結果)を一律数倍に変化させた。結果を、図-6、表-3に示すが、各層の変形係数を基本値の6倍とした場合に最も計測値を近似できたので、この値を予測解析時の変形係数とした。

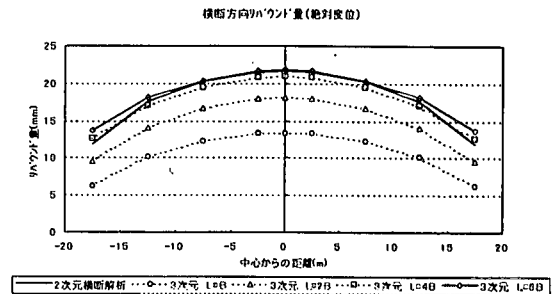


図-3 3次元形状効果図

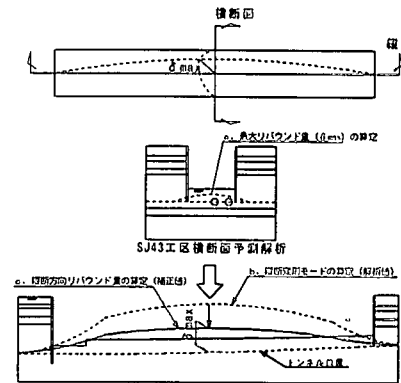


図-4 2次元リバウンド量算出概念図

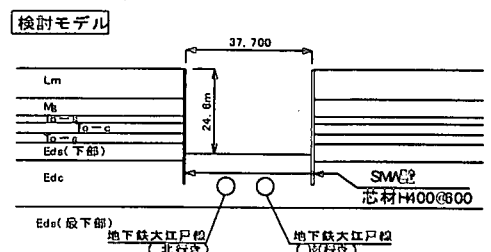


図-5 先行工区標準断面図

表-1 地盤物性値

地層	深度 (GL-m)	層厚 (m)	単重 γ (kN/m ³)	粘着力 C(kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)	変形係数 E_g (MPa)	ポアソン比 ν
Lm	8.714	8.714	14	50	0	5	0.45
Mg	13.714	5	18	15	20	32	0.3
To-a	15.814	2.1	19	0	35	15	0.35
To-c	18.914	3.1	17	60	0	15	0.4
To-g	21.814	2.9	19	0	40	40	0.3
Eds(下部)	26.814	5	20	10	40	90	0.3
Edc	40.114	13.3	18	500	0	60	0.35
Eds(最下部)			20	70	40	75	0.3

表-2 土留め支保工

土留め	仕様	ヤング係数 E (N/mm ²)	断面二次 モーメント I (m ⁴)	断面積 A (m ²)
SMW壁	H400@600	2.0×10^5	0.00111	0.03645
支保工	仕様	ヤング係数 E (N/mm ²)	断面積 A (m ²)	分担幅 B (m)
1~2	H300	2.0×10^5	0.01048	3.0
3~4	H350	2.0×10^5	0.01549	3.0
5~6	2-H350	2.0×10^5	0.03098	3.0
7	H350	2.0×10^5	0.01549	3.0

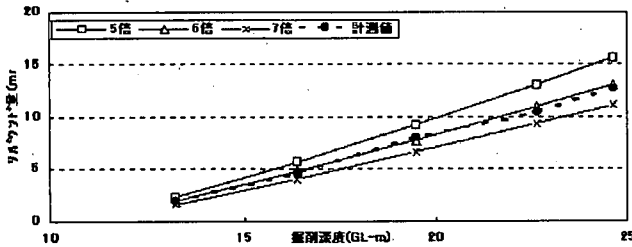


図-6 リバウンド量フィッティング結果図

3) 予測解析と影響評価

最大リバウンド量の予測は区間中央部の横断方向二次元FEMにより求め、縦断方向変形モードは縦断方向二次元FEMより求めた。また、解析領域の影響を除去する目的でフィッティング時と同じ解析領域とした。予測結果を図-7に示す。

地下鉄シールド覆工への影響は、地下鉄シールドをセグメント・リング系の剛性と等価な剛性(縦断剛性)を持つ一様連続な梁と評価し、地盤バネで支持された弾性床土の梁モデルに変形量から算定した応答荷重を載荷し、セグメント圧縮応力、ボルト引張応力、ボルトせん断応力を照査した。その結果、全てのタイプで許容応力以下となり健全であることが確認できた。

一方、軌道変位量については相対変位量が二次管理値(5.0mm/10m)をオーバーする結果となったため、対策工の検討を行うことにした。

表-3 変形係数結果

	変形係数の 基本値(Mpa)	逆解析に用いる変形係数(Mpa)		
		(5倍)	(6倍)	(7倍)
Eds(下部)	90	450	540	630
Edc	60	300	360	420
Eds(最下部)	75	375	450	525

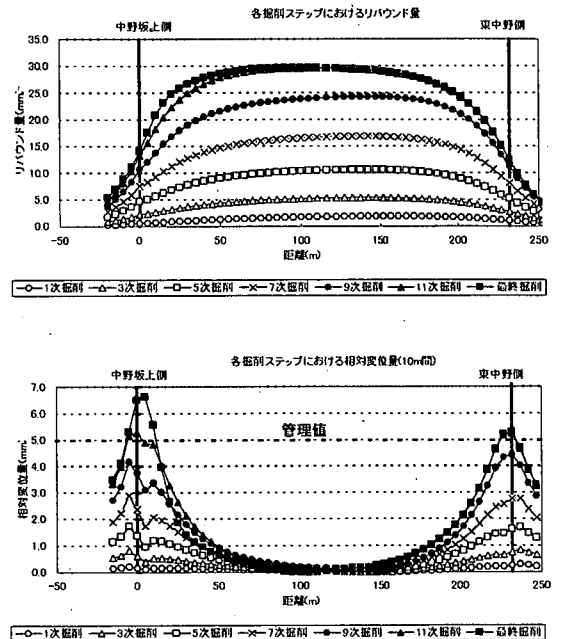


図-7 無対策時リバウンド量及び相対変位量図

4) 対策工検討—地盤改良工—

対策工の目的は、相対リバウンド量の低減であるため、両端部の相対リバウンド量に注目し、分割施工案と端部地盤改良案を考えたが、工程上の制約などから最終的に後者の地盤改良案を選択した。地盤改良対策の効果は、地盤の変形係数を局所的に高めることにより、リバウンド相対変位量を抑えることであるが、対象地盤であるEds層やEdc層の変形係数(採用値)が360MPa~540MPaと高く、設計基準値(ジェットグラウト協会)の最大値である300MPaを用いても、解析上効果が見込めないという矛盾が生じるようになった。そのため、改良体の真の変形係数を求め直すことにした。

地盤の変形係数はひずみ依存性であるため、微小なひずみ域では、 E_{50} などの値より大きい。予測解析結果から高さ20mの改良体に生じる変形量は5mm程度であり、 $\epsilon = 5/20000 = 0.00025 = 0.025\%$ となる。このようなひずみレベルでの変形係数を求めるため、LDT（局所変形測定装置）³⁾を用いた一軸圧縮試験を実施した。試験結果の一例を図-8に示すが、 $\epsilon = 0.025\%$ に対応する変形係数は2,200MPa～4,000MPaとなり、95%信頼区間の下限値を基に2,300MPaを採用値と決定した。この値は、設計基準値の約7.7倍の値となり改良効果が期待できる値であることが確認できた。

実際の改良範囲の設定に当たっては、

- ① リバウンドを抑えるために端部での改良が効果的である。
- ② 地下鉄シールドおよび既設ポンプ室から1.5mの離隔を確保する。
- ③ 施工可能な深さとして、最大改良長(床付け面から)を20mとする。

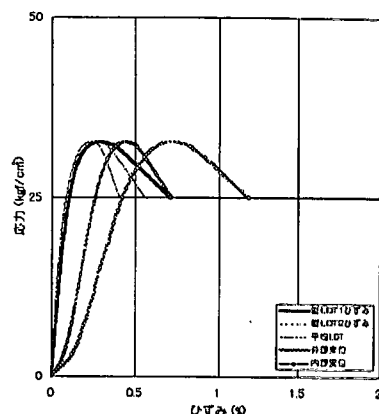


図-8 一軸圧縮試験（LDT）結果図

等の基本方針を基に、最適(経済的)な改良範囲を求めた(図-9)。改良部は、原地盤と改良地盤の複合地盤(面積比)として評価した。地盤改良時と無対策時を比較した結果を図-10に示す。

また、地下水低下工法についても対策効果を検討したが、①相対リバウンド量低減効果が少ないこと(排水量の制限から地下水位低下量に限界がある)、②定量的効果として見込むには誤差が大きいと思われること、等から緊急対策として位置付けた。許容排水量(2000m³/日)より逆算した地下水位低下量4mから、全区間に10本のディープウェルを設置し、必要に応じて稼働させる計画とした。

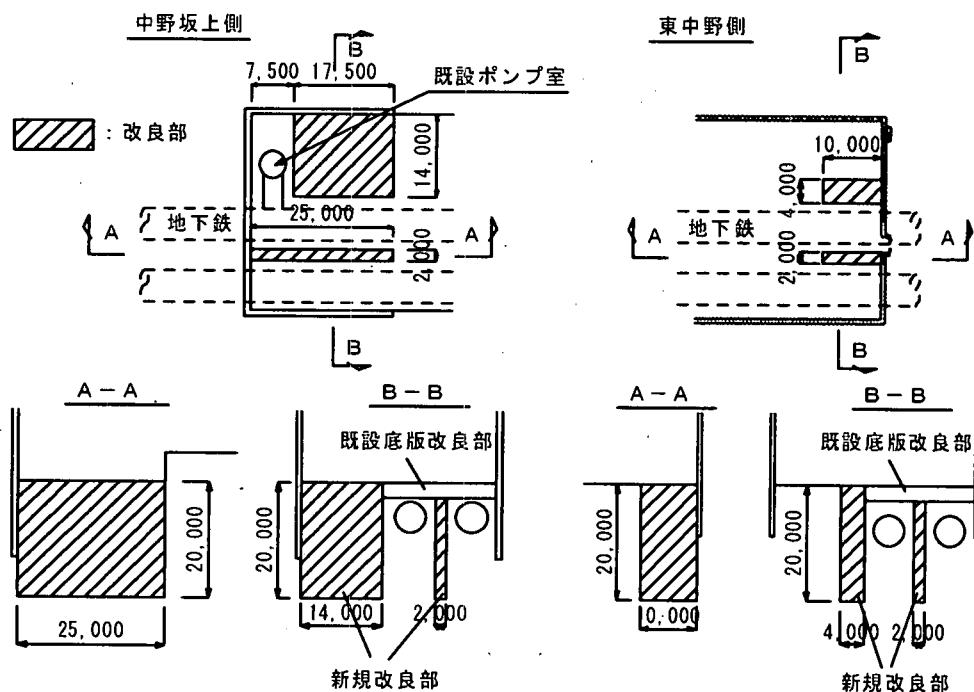


図-9 対策工（地盤改良工）図

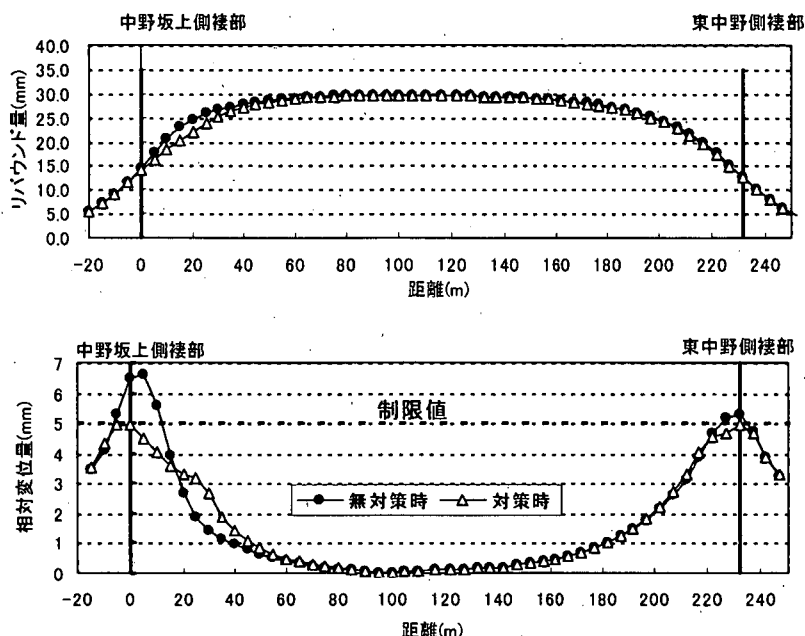


図-10 対策時リバウンド量及び相対変位量図（最終掘削時）

4. 掘削時の実挙動

1) 計測管理体制

本工事では、地下鉄シールドの変位を管理する目的で、水盛式沈下計を 320m 区間に 10m 間隔(掘削端部付近)で 25 箇所(／片線)設置し掘削北側端部から 130m 離れた東中野駅舎に不動点を設けた。また、定期的なレベル測量と目視観察を併用した。また、地盤の鉛直変位や間隙水圧の変動を把握する目的で層別沈下計(不動点 GL-70.0m)と間隙水圧計を設置した。(図-11)

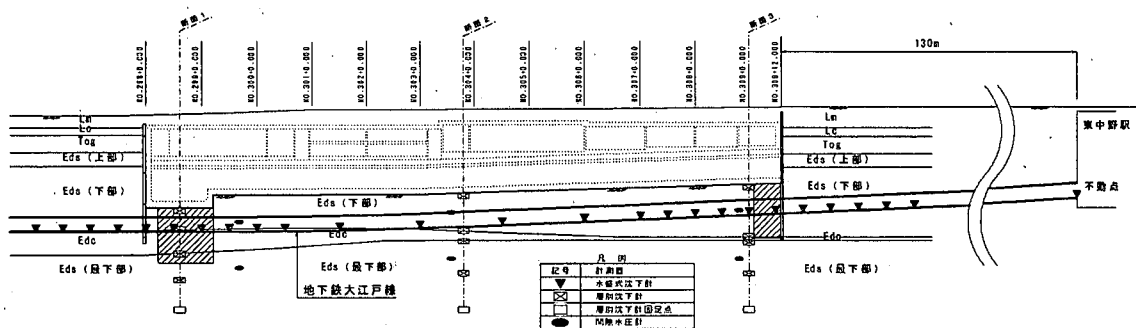


図-11 計測工配置図

2) 掘削に伴うリバウンド量予測値と実測値の比較

図-12に最終床付け時の全体リバウンド量と両端部における相対リバウンド量について予測値と実測値の比較を示した。(予測値は、地下水位低下を考慮した)

トンネル軌道位置での絶対リバウンド量は、最大値で予測値<実測値となったが、相対リバウンド量では、予測値のように、滑らかにはならず部分的な凹凸が生じた。前者の原因としては、実施工においてディープウェルの稼動が掘削ステップの途中段階であったこと。また、後者の原因としては、施工ブロックにおける掘削速度の違いや端部の地盤改良施工中も離れた場所では、掘削を行っていたためと考えられる。

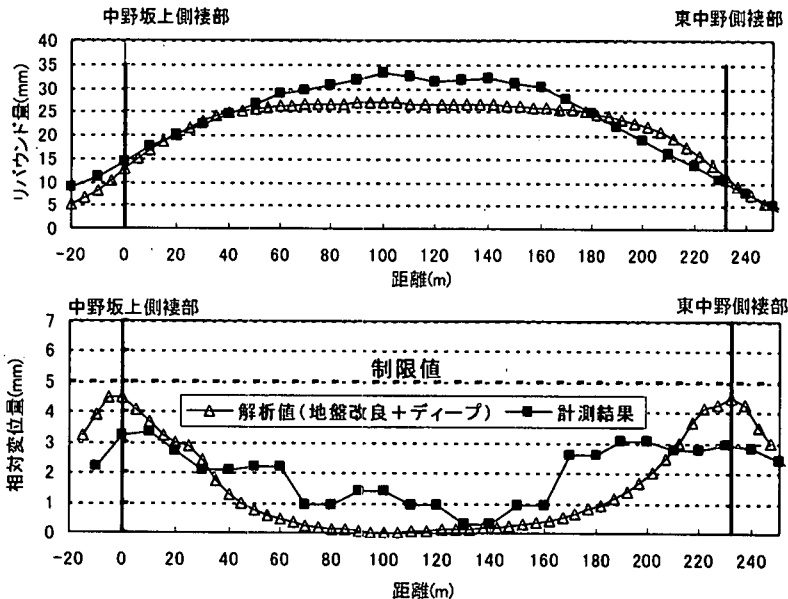


図-12 計測結果比較図

図-13では、掘削深度10mを過ぎたあたりで一度、相対変位の増加が見られる。これは、地盤改良対策工実施の影響である。また、中野坂上側ではGL-29m付近から、東中野側ではGL-25m付近から一時的な相対リバウンド量の低下が見られる。これは地下水低下開始の影響で、その後の増加量の頭打ち傾向要因と考えられる。

5. まとめ

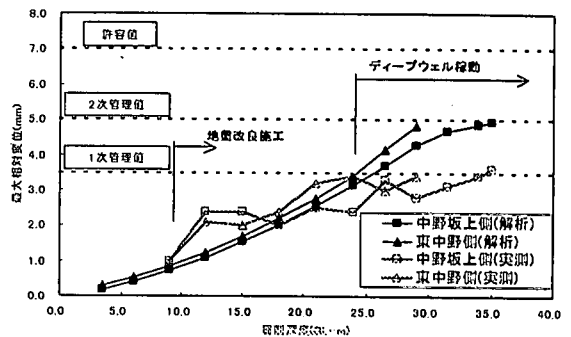


図-13 掘削ステップ毎の最大相対変位図

工事は、平成14年8月末時点で、全ての掘削が終了し底版コンクリートを施工中である。地下鉄シールドへの影響と言う点では峠を超え、躯体構築に伴って、地下鉄シールド変状が減少するものと予想される。今回の、予測解析、対策工検討、実挙動の把握を通して得た知見を以下に整理する。

- 1)断面方向と縦断方向それぞれの2次元FEM結果を組合せることで、概ね実挙動を予測できた。
 - 2)リバウンド相対変位量の抑制には、腰部(掘削端部)の部分的地盤改良が有効である。
 - 3)改良体の変形係数には、実際のひずみレベルに応じた値を採用する必要がある。
 - 4)変形係数のフィッティング値は、解析モデル等によって変化する値であることを十分理解する必要がある。
- 最後に多大なるご指導とご協力をいただいた、東京都交通局並びに関係各位に対し、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1)(社)地盤工学会：根切り・山留めの設計・施工に関するシンポジウム p.80～p84、1998
- 2)田嶋・川田・深山・山地・黒川：大規模開削に伴うリバウンドによる地下鉄シールドの挙動、トンネル工学研究論文・報告集第10巻、2000.11
- 3)(社)地盤工学会：土質試験の方法と解説—第1回改訂版一、2000