

既設トンネル直上部を交差するトンネル工事の
影響予測と現場計測

ANALYSES AND FIELD MEASUREMENTS DUE TO TUNNEL EXCAVATION CROSSING ABOVE EXISTING TUNNELS

○小島 芳之* 藤沢 一* 金子 静夫* 五味 一男**

By Yoshiyuki Kojima, Hajime Hujisawa, Shizuo Kaneko and Kazuo Gomi

When a new tunnel is constructed near an existing tunnel in soft ground, it's very important to predict influences on the existing tunnel and compare predictions with the construction data. Although, there are few established methods to predict the influence about mechanical behaviors between crossing tunnels. Furthermore, there are few studies to comprehend these behaviors by field measurements.

We measured mechanical behaviors of existing paralleled railway shield tunnels caused by neighboring excavation of a box shaped tunnel, which was crossing closely above the existing tunnels and was excavated using pipe roofing method. And we compared these data with predictions by analyses using the finite element method and the beam-spring model method. This paper presents these results of comparisons.

1. はじめに

近年、都市部においては、土地の高度利用化に伴い、既設構造物に極めて近接して行われる工事が急増している。特に、鉄道等の線状構造物を都市域に建設する場合は地下空間を利用せざるを得ない状況にあり、これは必然的に、既設構造物とりわけトンネルに近接して交差する工事が増加することになる。このような事例をあげれば、最近のわが国においては枚挙にいとまがない。

軟弱な未固結地盤中に構築されたトンネルに近接して新たにトンネル工事が施工される場合、既設トンネルに及ぼす影響を事前に予測し、併せて施工時に計測を行い、予測値と実測値を比較し安全な構造物であることを確認することは、非常に重要と考えられる。トンネル交差による新設側、既設側のトンネルの力学的挙動に関する影響予測手法については、これまでにいくつかの研究事例（例えば文献1)、2))があるが、必ずしも確立された手法はないものと考えられる。また、トンネル上部を開削した場合の既設トンネルの挙動に関する現場計測を基に、影響評価を行った研究事例（例えば文献3)、4))は多いが、トンネル上部で交差するトンネル工事の現場計測を行った事例は以外に少ない。

* : 東日本旅客鉄道株式会社 東京工事事務所 工事管理室 (〒151 東京都渋谷区代々木2-2-6)

** : 東日本旅客鉄道株式会社 東京工事事務所 神奈川工事区 (〒221 横浜市神奈川区東神奈川1)

そこで、筆者らは、京浜急行羽田空港線延伸工事の一部で、パイプルーフ工法により非開削で掘削される箱型トンネル（函体）が、J R 東海道貨物支線のシールドトンネル（羽田トンネル）直上で交差する区間の工事において現場計測を行い、事前に行った影響予測解析との比較検討を行った。その結果、従来より行われている F E M や梁ばねモデルを用いた比較的簡易な 2 次元解析モデルによっても、地盤物性値を適切に設定することができれば、ある程度信頼性のある影響予測を行うことができる可能性があることを確認した。本稿では、主としてトンネル掘削時の既設トンネル覆工の挙動と、パイプルーフの挙動に着目した現場計測データについて、影響予測解析と比較した結果について述べる。

2. 交差工事の概要

2.1 地質及び位置関係

当該位置付近の地質断面略図を、図 1 に示す。一体は東京湾の埋め立て地で、埋め土も含めて地盤面より深さ 15m 程度までは主に N 値 5～20 の沖積細砂層が堆積している。この沖積細砂層中を新設トンネルが掘削されることになるが、細粒分含有量 11% で均等係数 4 程度のものが含まれていることから、掘削時に自立性が問題となる土層と考えられる⁵⁾。その下位には厚層 5～8m で上部洪積粘性土層が、更にその下に N 値 30 以上の上部洪積砂質土層が堆積している。上部洪積粘性土層は、一軸圧縮強度 2～7 kgf/cm² 程度で比較的よく締まった土層である。これらの上部洪積層は、下部洪積層（上総層群）の砂泥互層と傾斜した不連続関係にある。この不連続面は、既設トンネルの下り線側より上り線側に向かって大きく傾斜している。この下部洪積層の固結度は、上部洪積層に比較して幾分高い程度である。なお、既設トンネルの土被りは 16m 程度で、その断面の大半が上部洪積粘性土層内にある。

両トンネルの位置関係は、図 2 に示すとおりである。この図に示すように、函体を構築するためのパイプルーフは、既設トンネルの直上部を離隔距離 1m 程度で交差する。なお、交差角度は約 80° 程度である。パイプルーフは函体の全周を囲む箱型（幅 13.8m、高さ約 9m）に施工され、その内部を掘削した後に函体が構築される。

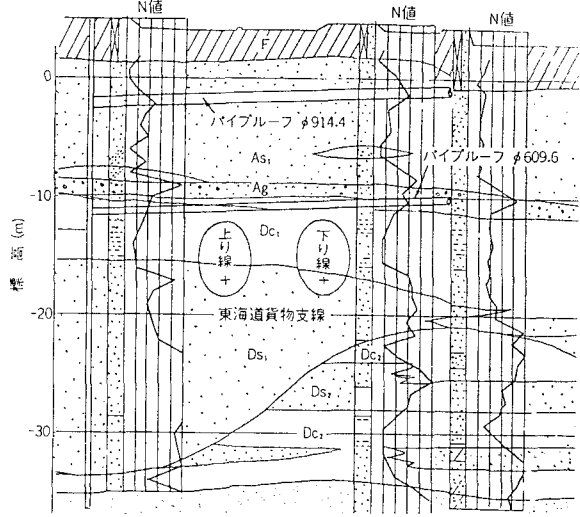


図 1 地質断面図（既設トンネルに対して直交断面）

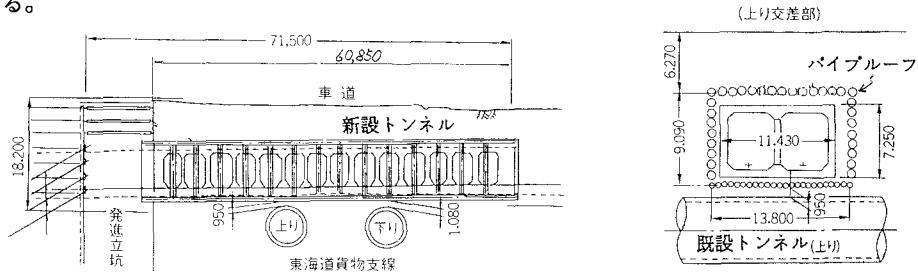


図 2 交差トンネルの位置関係

2.2 既設トンネルの構造

既設トンネルは、経年約 20 年の単線並列円形トンネルで、開放型シールド工法により施工された。図 3 に

示すように、トンネル外径は7.1mであり、上下線の離隔は10m程度である。覆工は箱型セグメントにより構成され、二次覆工は施工されていない。このトンネルの健全度については、セグメント間を締結するボルトに一部腐食が見られるものの、全体に良好である。なお、ボルトについては、施工前にせん断強度試験を実施し、十分な耐力があることを確認した。

2. 3 新設トンネルの施工概要

離隔が非常に小さく、既設トンネルの構造がセグメントのみであり、かつ、未固結の土砂地盤であることから、計画段階よりトンネルの施工法について種々検討を行った⁶⁾。比較案として、開削工法についても検討したが、事前に行ったFEM弾性解析によると、掘削時の応力開放による既設トンネルの浮き上がり(約21mm程度)が軌道整備基準を抵触し、発生応力も許容応力度を上回ることが予測された。そのため、ここでは、上部掘削による影響を極力軽減できる工法として、非開削による全周パイプルーフによる工法を採用した。

施工手順は概略次のようである。即ちまず、発進立坑を作業基地として構築し、地盤強化(パイプルーフ内)及び止水(パイプルーフ回り)を目的として立坑より横方向に薬液注入を行う⁷⁾。次に、発進立坑より全周パイプルーフ(上床及び側壁部:外径914.4mm、下床部:外径609.6mm)を圧入した後、支保工を建て込みながらパイプルーフ内を掘削し、函体を構築する。なお、パイプルーフ長は、既設トンネルへの影響範囲を考慮し、約60mとした(図2参照)。掘削工法は、施工性を考慮して機械施工による全断面掘削工法である。切羽の自立性を確保するため、補助工法として上述した薬液注入とともに水平ロックボルト(自穿孔型I B Oアンカーφ42.2mm)を図4に示す配置で立坑より施工することにした。また、掘削中は図5に示すように、切羽の傾斜角を60°に保持しながら、一掘進長を2mに制限して施工することにした。

3. 影響予測解析

掘削による既設トンネルへの影響を把握するため、まず、2次元弾性FEM解析を行った。図6は、解析モデルを模式的に示したものである。表1は、解析に用いた物性値である。解析手順は、まず既設トンネルが存在する状態で自重解析(Step1)を行った上で、パイプルーフ内掘削後の解析(Step2)を行う。なおより厳密な予測を行うためには、掘削の進行を考慮したステップ解析を行う必要がある。今回の解析でこのようなステップ解析を行わなかったのは、既設トンネルの変形が最も大きくなると考えられる最終状態の挙動を概略予測することに主眼を置いたためである。解析に用いる地盤の変形係数については、砂質土はN値、粘性土は一軸圧縮試験による割線弾性係数を基にして、孔内水平載荷試験や三軸圧縮試験の結果も考慮して

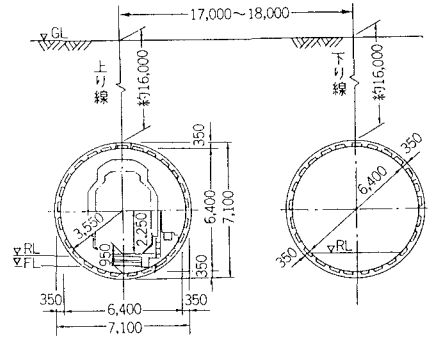


図3 既設トンネルの構造

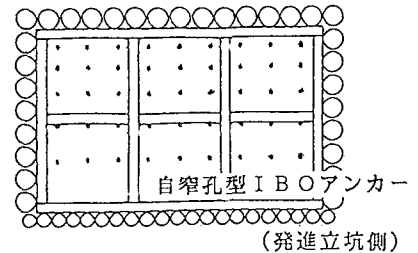


図4 水平ロックボルト概要図

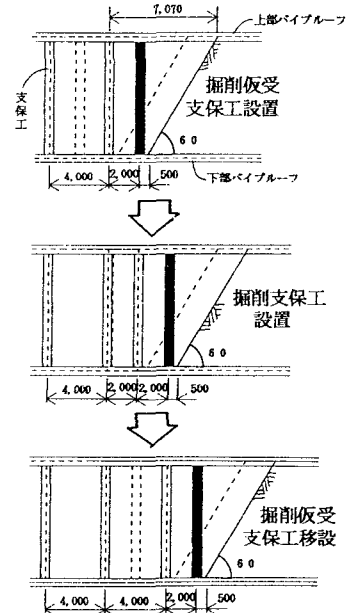


図5 新設トンネルの掘削手順

表 1 F E M解析に用いた物性値

	STEP 1			STEP 2			備 考
	E	ν	γ	E'	ν	γ	
1	3 500	0.35	1.90	1'	10 500	0.35	E = 3 E'
2	5 000	0.45	1.80	2'	15 000	0.45	
3	9 000	0.35	1.90	3'	27 000	0.35	
4	10 000	0.35	1.90	4'	30 000	0.35	
5	1.17×10^6	0.167	1.61	—	—	—	
6	—	—	—	6'	1 885	0.30	0.665

E, E':変形係数 (tf/m²) ν :ポアソン比 γ :単位体積重量 (tf/m³)

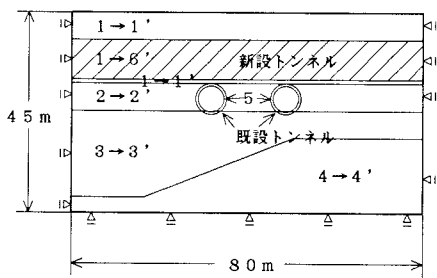


図 6 F E M解析モデル

適当と考えられる値を設定した。なお、一般に除荷時の地盤の変形係数E'は載荷時の変形係数Eに比較して大きいと言われている³⁾。ここでは、Step2においてE' = 3 Eの値を用いた。

解析面上を通るトンネルの剛性は、パイプルー全体曲げ剛性の総和に等しくなるような剛性に換算したときの値を入力した。なお、支保工はトンネルの曲げ剛性に寄与しないものと考え、支保工のモデル化は行っていない。更に、シールドセグメントの剛性については、曲げ剛性の有効率 $\eta=0.5$ を考慮した⁵⁾。

図 7 は、Step 2 における相対変位図である。この図に示すように、最終的に、既設トンネルのクラウン部は 6 mm 程度の浮き上がりを示し、パイプルー天端は既設トンネル直上部で 70 mm 程度の沈下を示した。なお、掘削による既設トンネルの影響範囲については、新設トンネルと直行する断面における 2 次元弾性 F E M 解析を行った結果によれば、54 m 程度となった。また、既設トンネルは、全体的に覆工全体が浮き上がる挙動を示し、変形モードは、相対的に側圧が卓越するため水平方向に縮小する傾向にあるが、変位量は些少である。覆工応力については、トンネル軸直角方向は、軸力が低下するとともに曲げモーメントが相対的に非常に小さくなるために全圧縮状態となり、許容応力度を大きく下回る結果となった。また、トンネル軸方向応力についても、軸方向の断面での F E M 解析から求め

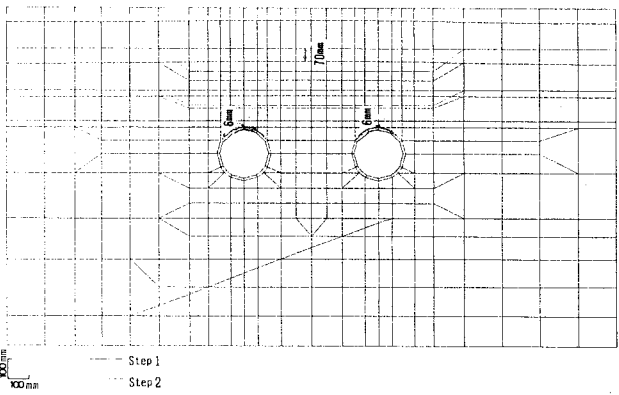


図 7 F E M 解析による相対変位図 (Step 2)

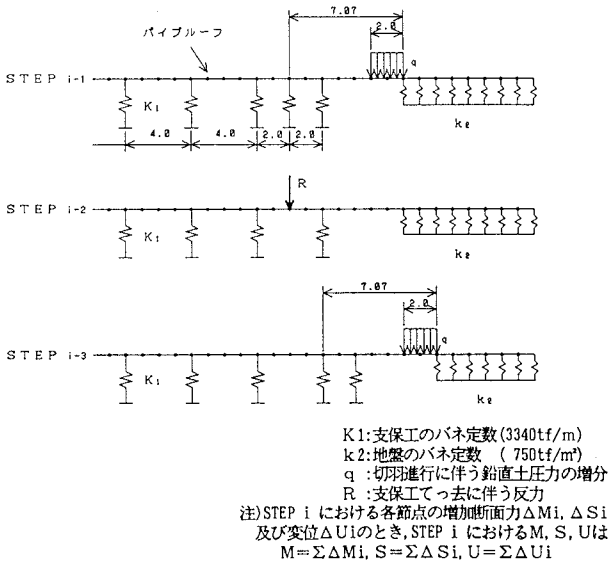


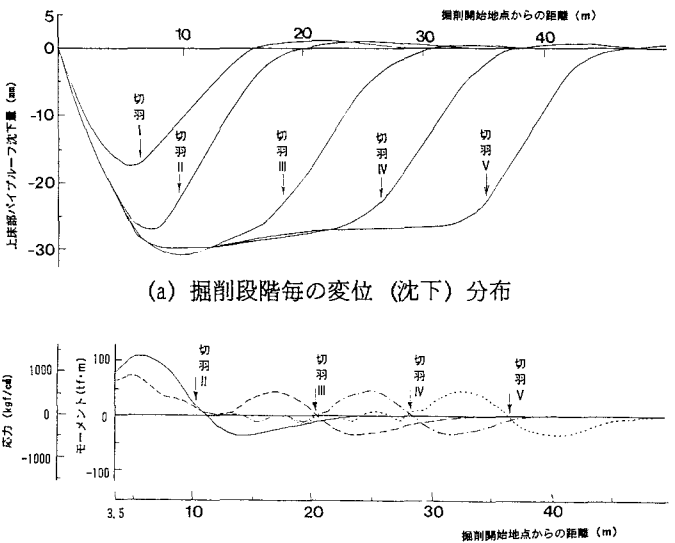
図 8 梁ばねモデルによる上床パイプルーの逐次掘削解析モデルの概念図

た変形量より推定した結果によれば、十分安全な値であると考えられる。

以上の結果より、トンネル掘削によるシールドへの影響は少ないものと予測される。

次に、掘削に伴う上床パイプルーフの挙動を把握するため、梁ばねモデルによる弾性解析を行った。図8に、解析モデルの概念図を示す。解析方法は、この図に示すように、切羽位置の移動に従って、逐次、地盤バネの作用範囲を変化させ、支保工部材のバネの増設・撤去や増加荷重の載荷を行うものである。なお、解析に用いる地盤ばね定数は、変形係数 $E = 350\text{kgf/cm}^2$ を用いて文献8)に示される杭の水平地盤反力係数の算定式を参考として求めた。また、切羽に 60° の角度を設けて掘削を行うことや、水平方向にロックボルトが施工されていることから、切羽付近の地盤の緩みは少ないものと想定し、地盤ばね定数の低減は行っていない。

逐次解析の結果の一部を、図9に示す。この図より、パイプルーフの沈下量の最大値は 31mm 程度である。また、発生応力の最大値は 1400kgf/cm^2 程度であるが、切羽Ⅲ以降の各切羽位置近傍の最大発生応力はほぼ一定で、切羽後方 4m 付近の位置において約 600kgf/cm^2 である。なお、これらの値は、パイプルーフの許容応力(1710kgf/cm^2)より十分小さい値である。



(a) 掘削段階毎の変位（沈下）分布
(b) 掘削段階毎のモーメント（応力）分布
図9 梁ばねモデルによる解析結果

4. 計測結果とその考察

4. 1 計測内容

上記の予測解析結果に基づき、トンネル掘削期間を中心に、以下に示す項目について監視計測を行った。

①既設トンネル：浮き上がり、内空変位、セグメント継目の変位

②新設トンネル（パイプルーフ）：上床パイプルーフの沈下、上床・下床パイプルーフの応力

既設トンネルの計器配置は、図10に示すとおりである。

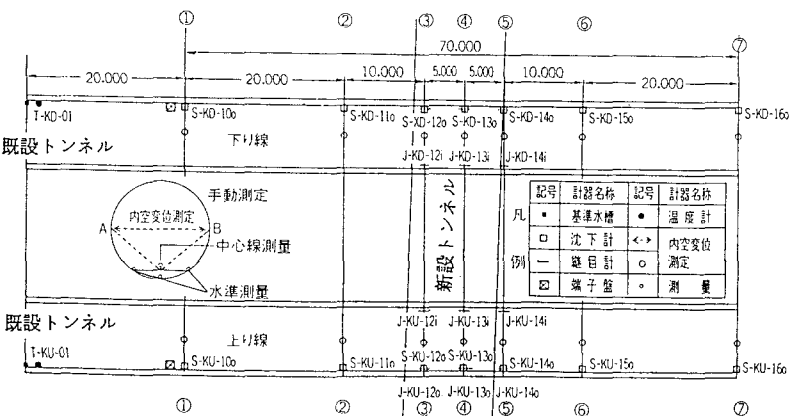
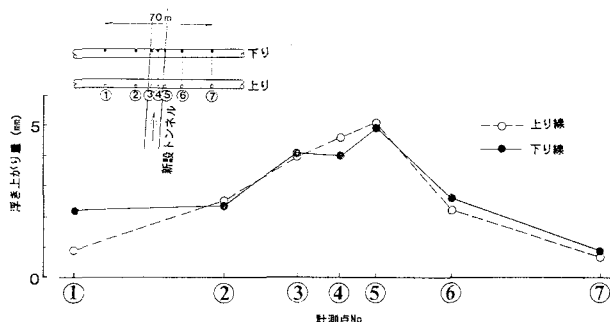


図10 既設トンネルの計器配置図

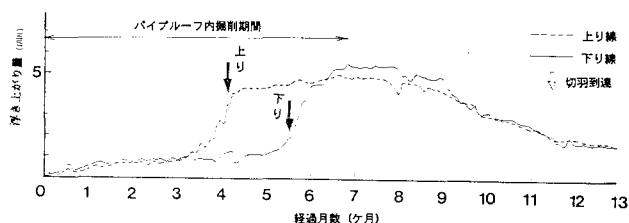
4. 2 既設トンネルの挙動

(1) 浮き上がり

図11は、掘削に伴う既設トンネルの浮き上がり量を示したものである。掘削開始から掘削完了までの累積浮き上がり量のトンネル軸方向分布は、図11(a)より、最大値は上・下線ともに測点 No. ⑤（新設トンネル断面の右下方）において発生しており、各々4.9mm、5.1mmである。この値は、FEM解析による予測値（6mmの浮き上がり）にほぼ合っている。また、図11(b)には、測点 No. ⑤における経時変化を示した。この図より、①掘削開始時点より切羽の接近に伴い先行変位が徐々に発生し、②切羽がトンネル直上を通過する時点で急激に浮き上がり、③その後掘削完了まで先行変位とほぼ同様な勾配で上昇し、④掘削完了時点で最大値を示す、という状況が見られる。なお、掘削終了後に沈下に転じているのは、函体の構築に伴う増加荷重によるものである。



(a) 掘削完了時の浮き上がり量の分布



(b) 浮き上がり量の経日変化

図11 既設トンネルの浮き上がり量

(2) 内空変位

内空変位測定の結果から、上り線については有為な変形挙動は観測されなかったが、下り線については水平方向に若干縮小する傾向（0.5mm以下）が認められた。変形モードとしては、予測解析結果の傾向（水平方向に縮小）と概ね一致する結果が得られたと言える。

(3) 継ぎ目変位

アーチ部のキーセグメントの継ぎ目において周方向及び軸方向変位を測定した結果では、掘削による変位の増減は見られなかった。これは、内空変位が微小であり、浮き上がりによる軸方向の変形も少ないことと調和的である。

4. 3 新設トンネルの挙動

(1) 上床部パイプルーフの変位

図12(a)は、いくつかの掘削段階毎に掘削に伴う上床部パイプルーフの変位分布を示したものである。この図より、次のことが分かる。即ち、①切羽の進行に伴い切羽位置におけるパイプルーフの沈下量は増大するが、切羽後方においては、支保工が逐次設置されるために沈下は収束する。②最終沈下量は、即点No. 5付近までは直線的に増加するが、それ以降は頭打ちとなる。③沈下量が最大となる箇所は測点No. 6（56mm）であり、既設トンネル直上部の測点No. 7及びNo. 10では、この値に対して各々5mm、15mm程度少ない沈下となっている。これは、支保工設置後の荷重が下床部パイプルーフを介して既設トンネルに作用したためと考えられる。

一方、梁ばねモデルによる予測解析結果（図9）を図12(a)の計測結果と比較すると、解析により全体的な沈下形態が非常によく表現されていることが分かる。沈下量の最大値については、梁ばねモデルによる予

測値（31mm）と比較すると大きい値となった。しかし、予測精度は必ずしも高くないものの、実用上は実測値を概ね予測できたものと思われる。ただし、今後は更に予測精度を高める必要がある。

(2) 上・下床部パイプルーフの応力
図12(b)は、上・下床部パイプルーフの応力分布の変化を掘削段階毎に示したものである。応力分布は、切羽位置、支保工の設置に応じて逐次変化するが、ほぼ同様な波形を示している。なお、測点No.6、No.7における応力が逆転しているのは、当該位置に支保工が設置されたことによる反力の発生によるものである。上床部と下床部では、地盤反力の発生方向が逆であるため、当然のことながら応力の発生モードも逆になっている。また、上床部は土被り圧を直接受けるため、下床部に比較して発生応力は大きい。応力値は、各掘削段階において、切羽位置付近及び切羽前方の測点において大きい値を示している。切羽位置付近の応力は上・下床部とも各々ほぼ一定で、上床部においては 750kgf/cm²程度である。

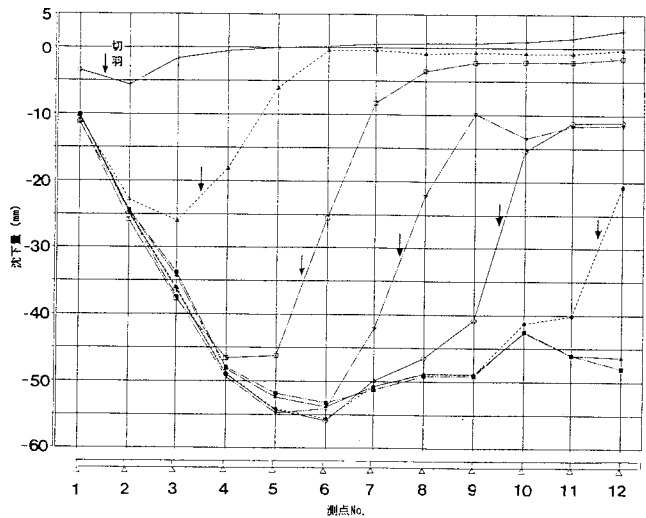
以上の結果を梁ばねモデルによる解析結果（図9）と比較すると、応力分布の形態は、変位分布と同様にほぼ合っていることが分かる。応力値については概略同様な値を得ることができたが、実測値の方が2割程度大きい。

以上(1)及び(2)の結果より、パイプルーフの挙動については、今回の逐次解析モデルにより表現できることが分かった。予測精度を上げるためには、解析時のモデル化に関して、地盤ばねの非線形性を考慮する等の検討が今後必要がある。

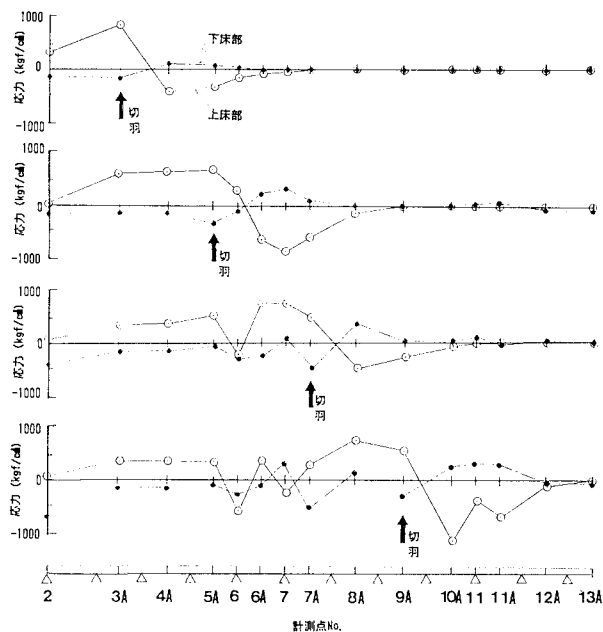
5. まとめ

以上述べた予測解析及び現地計測により得られた知見を要約すれば、以下の通りである。

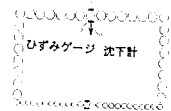
(1) トンネル交差による上部掘削に伴う既設トンネルの変形挙動を、2次元弾性FEM解析によっても予



(a) 上床部パイプルーフの変位（沈下）分布



注1) △：支保工設置位置
注2) 沈下計、ひずみゲージ設置位置は右図参照



(b) 上・下床部パイプルーフの応力分布

図12 パイプルーフの変位と応力

測できる可能性があることが現場計測により確認できた。特に、今回の工事のように、浮き上がりに起因する地盤の歪みレベルが小さい場合には、信頼性の高い予測が可能と考えられる。

- (2) 除荷の解析に用いる地盤の変形係数を、載荷時の変形係数に対して3倍の値に設定することにより、浮き上がり量を精度よく予測できた。今後、変形係数の設定方法については、更に深度化した検討を行う必要がある。
- (3) 掘削に伴うパイプルーフの挙動は、梁・ばねモデルによる逐次解析により表現できることを確認できた。地盤ばねの非線形性等を考慮することにより、更に精度の高い挙動予測ができるものと考えられる。
- (4) シールドトンネルのような円形トンネルの場合は、局部的な上部掘削による数mm程度の浮き上がりに対しては、覆工に及ぼす応力的な影響は非常に小さいことが確認された。

6. おわりに

供用中の鉄道用シールドトンネルの直上部をパイプルーフに囲まれた箱型トンネルが交差する工事について、主としてトンネル掘削時の既設トンネル覆工の挙動と、パイプルーフの挙動に着目した影響予測解析と現場計測結果の比較検討を行った。その結果、いくつかの有益な知見を得ることができた。しかしながら、今回行った検討は、限られた条件下において行ったものであって、今後に残された課題も多い。

今後、本稿で取り上げたような近接工事の事例は益々増加することは必至であると考えられ、より簡便な手法でより精度の高い予測ができることが実務上の課題の一つであるといえる。トンネルの交差は3次元問題であるので、本来、影響予測解析を厳密に行うためには3次元解析が必要となる。しかしながら、3次元解析を行うことは時間と労力を要するため、2次元問題として扱っても十分信頼できる手法の開発が必要である。筆者らは、このような観点から、今回行ったような比較的簡易な影響予測解析手法によって、より精度の高い予測値を得るための研究を深度化したいと考えている。そのためには、信頼性の高い現地計測データを多数収集し、予測解析結果を適切に評価するとともに、シミュレーション解析を行い、予測と実際の相違点を明らかにしてゆくことが重要であると考ええる。更に、今後、施工段階において、計測結果を基に予測値を修正しながら行行情報化施工を積極的に導入する必要があるだろう。

参考文献

- 1) 土屋、吉田、安田、松本：トンネル設計用プログラムの開発とその設計事例、鉄道技術研究報告、No.1351、1987.3
- 2) 朝倉、松本、伊藤、久武：近接交差トンネルの2次元・3次元解析、第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、1991.2
- 3) 村山、岩崎、橋本、平山、松崎：開削に伴う地盤の浮き上がり現場計測工法、土と基礎、Vol.30、No.7、1982.7
- 4) 桜井、清水、金澤、梶原：地表面掘削による既設トンネルの挙動、第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、1990.
- 5) 国鉄建設局、構造物設計事務所：シールドトンネルの設計施工指針（案）、1977.12
- 6) 福山、五味：シールドトンネルの直上をパイプルーフで交差 ― 京浜急行空港線延伸工事 ― 、トンネルと地下、Vol.23、No.8、1992.8
- 7) 久永、吉永：薬液注入工事に伴う周辺地盤の変位、基礎工、Vol.19、No.3、1981.3
- 8) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説 ― 基礎構造物、抗土圧構造物 ― 、1986.3

(1992年9月21日受付)