

2層構造トンネルにおける仮設支持杭による アンダーピニングの設計と施工

DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE TEMPORARY PILES TO UNDERPIN A TWO STORY TUNNEL

春山 和彦¹⁾・原田 浩史²⁾・寺本 哲²⁾・須藤 敏明³⁾・加藤 隆³⁾

Kazuhiko HARUYAMA, Hiroshi HARADA, Satoshi TERAMOTO, Toshiaki SUDOU and Takashi KATO

Ome Tunnel, of the Metropolitan Inter-city Highway (Ken-O-Do), is a two-story tunnel which has been constructed under the road through residential area in Ome city, Tokyo. The tunnel was constructed by inverted lining method where a middle slab and upper arch lining were supported by temporary piles. This report describes the design method of the temporary piles and the lining and discusses the adequacy of the design method by comparing the pre-analysis results with the measured behavior of the tunnel structure.

Key Words : Urban area, Two story tunnel, Design, Auxiliary methods, Temporary Piles

1. はじめに

「首都圏中央連絡自動車道(圏央道)」は、東京都心からおよそ40~60kmの位置に計画されている延長約300kmの自動車専用高規格幹線道路である。圏央道の一部である青梅トンネルは、平均掘削断面積230m²の2層構造トンネルであり、全長2,095mの内中央部1,056mがNATM区間である。本工事では、下部ベンチ掘削時に仮設支持杭を採用したが、杭の耐力検討と覆工設計の際に、地盤のリバウンドによる杭の増分軸力と、覆工挙動および地山挙動を精度良く予測する必要性が生じた。ここでは、一連の予測解析結果に含まれる不確定要素を考慮した設計と、その妥当性の検討結果を報告する。

図-1に圏央道の全体路線図を示す。

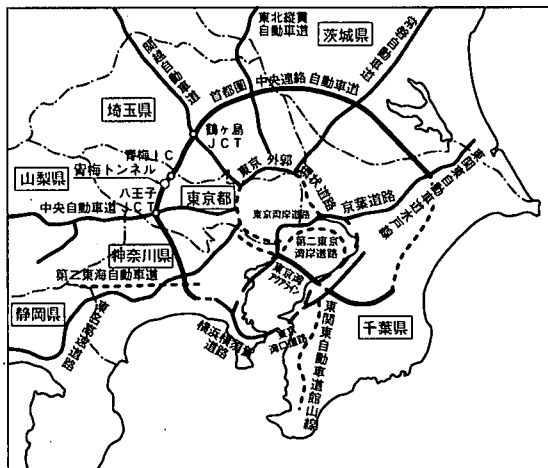


図-1 圏央道全体路線図

- 1) 日本道路公団東京建設局 八王子工事事務所 青梅北工事区 工事長
- 2) 大成建設(株)・戸田建設(株)・佐田建設(株) 青梅トンネル南工事共同企業体
- 3) 正会員 大成建設(株) 土木設計第一部解析技術室

2. 工事概要および工法変更経緯

図-2 に標準断面図を示す。施工対象となる地質は、複合扇状地的性質を有する河岸段丘であり、基盤の飯能礫層を浸食して堆積した段丘礫層と関東ローム層である。段丘礫層は約 25 万年前に形成された下位 (GL-12.5m 以深) の青梅礫層と、その上部の約 3 万年前に形成された立川礫層から成り、硬砂岩・粘板岩・チャートを母岩とする数 cm から約 70cm までの玉石を含む。地形および地質状況と NATM による上部 1, 2 段ベンチ掘削時の報告は、既発表文献に詳しい。¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ 3 段ベンチ以降の掘削方法は、当初、図-3 に示すように、掘削区間 (区間 B) を覆工完成区間 (区間 A) と前方の上部覆工のみの完成区間 (区間 C) とで支持する「上部覆工橋梁支持方式」として計画されていた。しかしながら、上部ベンチ掘削時の計測結果の分析⁴⁾により、3 段ベンチ以降の掘削による地表面沈下量増分値が既設地下埋設物に与える影響が大きくなることが予測され、種々の対策工法を検討した結果、上下線を隔てる中床版構築前に、2 段ベンチレベルより仮設支持杭を打設して、3 段ベンチ掘削以降の地表面沈下を抑制するアンダーピニング工法が採用され、施工を実施した。図-4 には仮設支持杭構造図を示す。先行構築する中床版以上の上部覆工と仮設支持杭に対する検討は、以下の手順で実施した。

- ①杭支持によりアンダーピニングを行う場合の発生軸力の推定。
- ②実規模載荷試験による杭支持力の確認と設計。
- ③杭支持を行った場合の上部覆工の配筋仕様の再検討。
- ④杭全数に亘る軸力増分値の計測と、覆工挙動計測結果に基づく事後解析。

3. 仮設支持杭に発生する軸力の推定

アンダーピニング時の仮設支持杭の設計軸力は、初期に導入するプレロード荷重に加えて、3 段ベンチ掘削以降のアーチ上部からの増分荷重と、下方地盤からのリバウンドによる増分荷重が考えられる。杭の設計軸力は、杭仕様および上部覆工の設計に大きな影響を及ぼすことから、不確定要素を担保しつつ合理的に設定する必要がある。特に、本報告における支持対象物は、上部覆工とその周辺に分布する地盤であり、掘削進行に伴う荷重増分が不確定要素となる。また、リバウンドに関してもアーチ天端の地盤

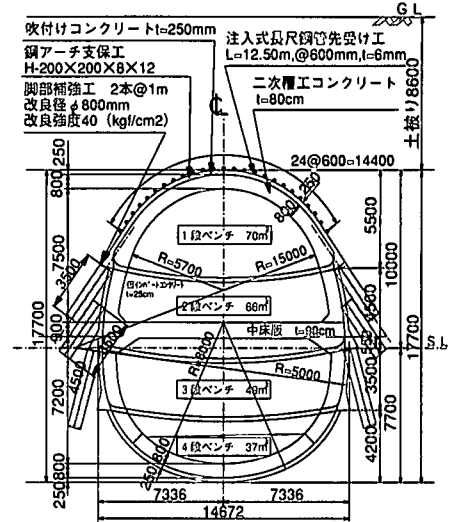


図-2 標準断面図 (DIV-2)

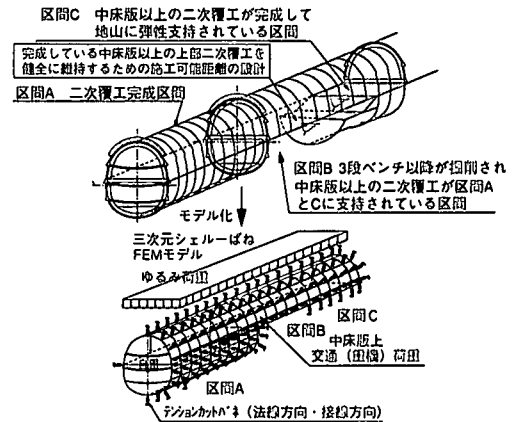


図-3 上部覆工橋梁支持形式の考え方

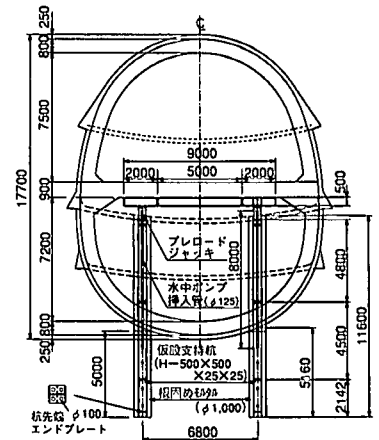


図-4 仮設支持杭構造図

拘束のために、リバウンドがそのまま上方への変位として現れず、アーチ天端の地盤反力が直接に杭軸力の増加と覆工の断面力増加となると考えられる。したがって、荷重の上限値を確定することが難しく、地盤を含めた構造系全体の変位モードについても検討する必要がある。

本設計では、2 段ベンチ掘削完了時までの計測結果に基づく逆解析⁴⁾を実施し、地盤物性値および低土被り地盤に見られる共下がり現象をシミュレートして地盤の応力状態を再現し、この応力状態で 3 段ベンチ以降の掘削を模擬した予測順解析を実施することで杭軸力増分値を推定した。図-5 は 2 段ベンチ掘削までの逆解析結果を示す。アーチ肩部からせん断ひずみが卓越する領域が発達し、地表面を含む地山変形として、低土被りトンネルの掘削時挙動の 1 つである「共下がり」が的確に表現されている。⁴⁾

この結果に続き、杭をモデル化して 3 段ベンチ以降の掘削解析を行い、覆工断面力および杭軸力を抽出した。図-6 には上記解析の結果である覆工断面力を再現する荷重モードを示す。この内、CASE1 は覆工が鉛直下方に沈下する場合を

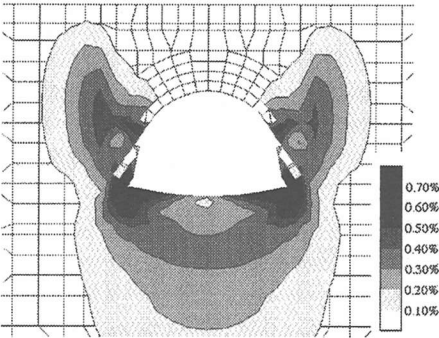


図-5 逆解析によるトンネル周辺地山の最大せん断ひずみ分布⁴⁾

表-1 仮設支持杭の状態別設計軸力

支持状態	設計荷重 N (kN/本)	支持力照査方法	支持杭 照査方法
覆工自重のみを支える場合	2,700	短期許容支持力 Fs=2.0	短期
3、4段へ ⁴⁾ 掘削解放力を伝達する場合	5,400	極限支持力	降伏

ケース名	ケース 1 (自重のみ)	ケース 2 (FEM推定荷重)	ケース 3 (FEM推定荷重 一側圧均等型)
想定状態 及び 設定根拠	一次覆工と二次覆工との縫が切れて、杭が自重のみを支えている状態	3、4段へ ⁴⁾ 掘削による掘削解放力が杭より伝達され覆工に鉛直上向き力として作用している状態。荷重値はFEM掘削解析により推定した。支保と覆工の縫は切れる。地山からの鉛直反力、水平荷重が隅角部に集中的に作用している。	ケース2と同様に、3、4段へ ⁴⁾ 掘削による掘削解放力が杭より伝達され、覆工に鉛直上向きの力として作用する状態。ケース2と比較して、中床盤に発生する軸力が小さくなる荷重条件として設定。
載荷方法	鉛直下向きに覆工自重のみを載荷する (載荷範囲：全区間)	2次元FEM掘削解析により推定した杭軸力、鉛直反力、水平荷重を載荷する (載荷範囲：区間B)	杭軸力、鉛直反力はケース2と同様に載荷し、水平荷重は等分布荷重として載荷する (載荷範囲：区間B)
変位量の取扱	沈下側の管理値とする	隆起側の管理値とする (ケース1と比較し、隆起側の管理値とする)	隆起側の管理値とする (ケース1と比較し、隆起側の管理値とする)
荷重図			
杭の モデル化	覆工自重を支える反力体	掘削解放力を覆工に伝達する荷重体 [作用荷重値=FEM解析結果値 ×1.3 (荷重係数)]	掘削解放力を覆工に伝達する荷重体 [鉛直荷重値=FEM解析結果値×1.3 (荷重係数)] [水平荷重値=FEM解析結果値×0.8 (荷重係数)]
支持力照査	作用力 < 許容支持力	作用力 < 極限支持力	作用力 < 極限支持力
備考	・覆工自重、重機荷重 (衝撃考慮) は全ケース、全区間にわたり載荷する。 ・ケース2、3において、杭を1本抜いた箇所 (区間B中央部) では隣接杭に1.5倍の杭軸力を載荷する。		

図-6 覆工設計のための荷重ケース一覧

考慮するものとして、解析結果とは別途に定めたものである。CASE2, 3 はインバート部からのリバウンドによる増分軸力を考慮した場合であり、杭と杭周辺地盤とのモデル化の方法により、リバウンドによる荷重を過大に評価する可能性があり、予測値としては大きな不確定要素を含んでいる。また、トンネル縦断方向の地盤性状は一定ではないことから、リバウンドを含む構造系全体の挙動は縦断方向に大きくばらつくものと推測された。

上記の結果を総合して表-1 に示す設計杭軸力を決定した。設定値は、自重 (プレロード相当) によるものが最低値 $N_1=2,200$ (kN/本)、リバウンドによる増分荷重を含む全軸力を $N_2=2,750$ (kN/本) とした。 N_2 に対しては、リバウンドの不確定さを考慮して 1.3 の割増係数を設定した。また、施工時のプレロードジャッキの故障によるメインテナンスを考慮して、隣接する 1 本の杭が荷重を分担できない状態を想定し、設計上 N_1, N_2 を 1.5 倍して杭の設計を行うものとした。ただし、設計荷重の発生頻度を考慮して、同表に示す各応力レベルまでの照査を実施した。

4. 仮設支持杭の試験施工と設計

仮設支持杭は、道路橋示方書・同解説〔下部構造編〕に基づいて事前設計を行った後、試験施工により杭を施工した。次に、「杭の鉛直載荷試験・同解説（地盤工学会）」に基づく載荷試験を実施して、杭先端の極限支持力度と最大周辺摩擦力度を確認して仕様を決定した。

図-7 に試験施工の概要図を示す。杭先端荷重と周面摩擦力は、杭に設置したひずみゲージにより根固めモルタルを含む杭全体の軸力を算定し、杭頭荷重から差し引いて周面摩擦力度を推定した。図-8 に、各荷重段階において推定された杭先端支持力度と最大周辺摩擦力度を示す。試験最大荷重である $P=4,000$ (kN) までは両者に線形関係が見られた。また、載荷荷重は杭設計軸力から $P=4,000$ (kN) としたが、極限

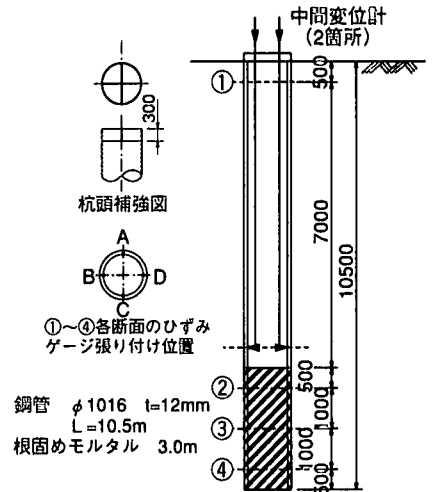
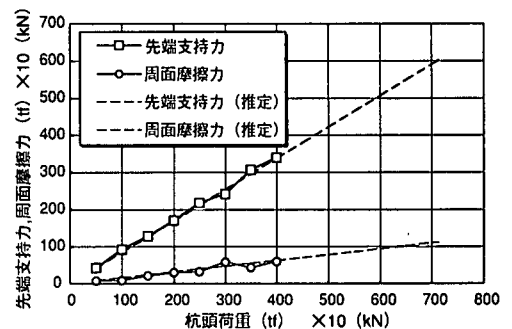


図-7 試験施工の概要図

支持力まで達しなかったため、Weibull 分布曲線により図-9 に示す荷重 P -沈下 S 関係を推定し、 $S/D=10\%$ 時の値を極限支持力値とした。図-8 には、極限支持力推定値における杭先端極限支持力度と最大周辺摩擦力度を示す。この内、杭先端の極限支持力度は、 $q_d=7,430$ (kN/m²) と推定されたが、設計に際しては地盤の不均一性と根入れ効果の減少を考慮して、前出示方書に示される参考値 $q_d=5,000$ (kN/m²) を採用した。施工は、トンネル全線に亘り杭本数が多くなるため、特に坑内でのハンドリングと部材接合のし易さに重点を置き、H 型鋼による杭を採用した。削孔は、BG-7 のロッドをテレスコピック仕様とした先端オーガによるケーシング掘りとし、先端部はコアバケットにより底質処理した。



荷重	50	100	150	200	250	300	350
支持力	42	84	127	169	211	253	295
先端支持力	8	16	23	31	39	47	55

荷重	400	450	500	550	600	650	700	714
支持力	338	380	422	464	506	549	591	603
先端支持力	62	70	78	86	94	101	109	111

図-8 各荷重段階において推定された杭先端支持力度と最大周辺摩擦力度

5. 覆工構造の設計

図-6 に示す上部覆工断面力と杭軸力とを再現する荷重を、仮設支持杭を付加した三次元シェル-ばねモデルに載荷することにより、トンネル覆工全体のアンダーピニング時の構造検討を実施した。アンダーピニングは期間が限定されているため、短期許容応力度による照査とした。

また、完成後の構造は、ボックスカルバートの設計に準拠²⁾³⁾しているが、地盤-覆工-杭で構成される構造系全体が、沈下ないしは隆起するかはトンネル縦断位置により大きく異なることが推測された。したがって、設計においては、前述した 3 段ベンチ掘削以降のアーチ上部からの荷重と、下方地盤からのリバウンド荷重による発

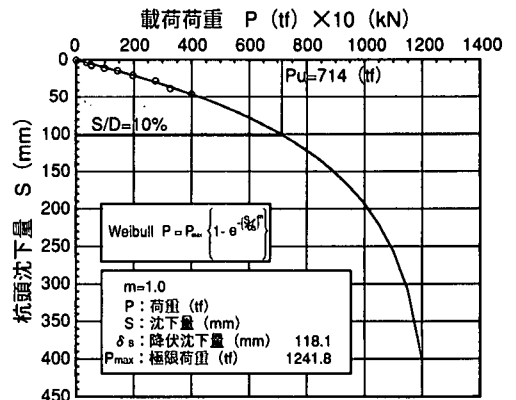


図-9 Weibull 分布曲線による P - S 関係

生断面力双方に耐え得る構造を確保した。検討の結果、杭直上のせん断補強鉄筋量は増加するものの、図-3 に示した「上部覆工橋梁支持方式」における必要縦断方向鉄筋量を減らすことが可能となり、全体で約 17% の鉄筋量の削減となった。

図-10 には配筋概要図を示す。

6. 計測結果および挙動分析による考察

6.1 杭頭ばね値に対する検討

一連の設計の後、杭設置・プレロード導入 (2, 200kN/本、覆工自重相当)・3, 4 段ベンチ掘削を実施した。計測は、水盛り式沈下計による中床版の沈下計測および仮設支持杭の軸力計測を主体とした。図-11 には、プレロード導入時のジャッキストローク量を用いて、杭頭ばね値 k を推定した結果を示す。

図-12 には、設計に用いた杭周面および先端の地盤ばねをモデル化して、梁-ばねモデルにより杭頭ばね値を算定した結果を示す。同図には、全地盤ばねを考慮した場合と、杭先端を固定して、杭部材剛性のみからばね値を算定した結果を示す。各々の場合で、 $k=546$ (MN/m) および $k=1,040$ (MN/m) を得た。図-11 に示す計測データによる杭頭ばね値の平均は、立坑を挟み、北行き $k=255$ (MN/m)、南行き $k=381$ (MN/m) となっており、各々設計値の 47%、70% と小さな値であった。ただし、ジャッキストローク量にはプレロード時の中床版の変形も含まれるため、計測により推定される値は過小評価されるものと考えられる。これらのことから、杭部材に考慮するばね値は、施工法による低減や、

地盤の不均一性に起因する上下限値を設定するなどして、支持構造物の機能を検討することが重要であると考えられる。

図-13 は、計測によるばね値を距離程に対して整理している。

同図において、 $k=1,000$ (MN/m) 以上のばね値が計測されている

が、これは図-12 に示すように、杭下端が固定されている部材剛性のみの計算上のばね値に対応しているものと考えられる。これらの杭の先端部は、局所的に分布する変形係数の大きな地盤に設置されたか、もしくは根入れ部において礫などにより幾何学的に拘束されていたものと推察される。また、北行きのばね値の平均は、南行きの 67% となっている。これは、北行きトンネルでは変形係数の小さな青梅礫層 ($E=49$ MPa) が厚く堆積し、一方で南行きでは強風化凝灰岩層がインバート付近にまで分布していることが主な原因であると推察される。

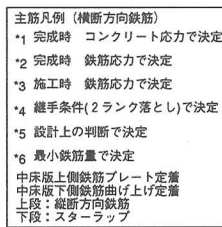


図-10 配筋概要図

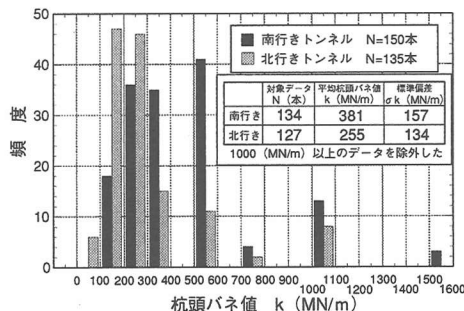


図-11 ジャッキストロークによる杭頭ばね値

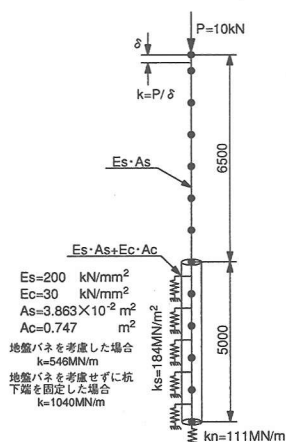


図-12 杭の検討モデル

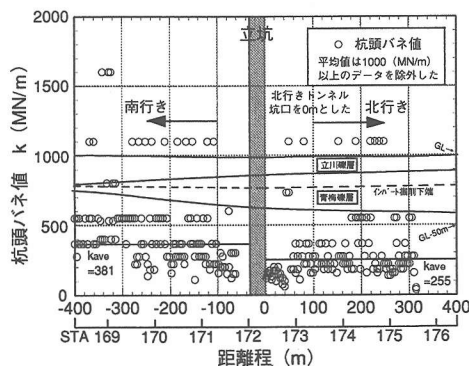


図-13 トンネル縦断方向のばね値分布

6.2 仮設支持杭軸力増分と上部覆工の挙動

構造系全体の沈下、隆起が不確定であるとの想定で設計および施工を実施したが、図-14には杭軸力のプレロード荷重からの増分と、中床版上で計測した覆工沈下量ないしは隆起量との関係を示す。北行きでは、ほぼ全数が覆工の沈下量に比例して杭軸力が増加しており（A）、南行きでは隆起する場合と沈下する場合（B）があった。これは、北行きでは、変形係数の小さな青梅礫層（ $E=49\text{MPa}$ ）がインバート下 40m 程度まで厚く分布していることが原因であると考えられる。一方、南行きでは青梅礫層の下位に分布する強風化凝灰岩がインバート付近まで分布しており、このため、隆起モードが卓越したものと考えられる。計測された杭軸力増分量の平均値は 365 (kN) であり、標準偏差は 222 (kN) であった。設計値として 95%信頼区間を設定した場合、 $P=730$ (kN) となる。

前述の FEM 解析結果では、隆起量の予測値は 2.6 (mm)、杭軸力の増分値は 500 (kN) であり、計測と整合性のある結果であった。

また、計測結果は概ね設計値の範囲内であることが確認され、図-6 に示す沈下モード（ケース 1）を想定した設計により、覆工の安定性は確保されたものと考えられる。

図-15 には、全測線における最終地表面沈下横断分布図を示す。トンネル縦断方向に沈下量の傾向を見た場合、地層構成により沈下量分布は大幅に異なり、青梅礫層（ $E=49\text{MPa}$ ）が厚く堆積する北行きでは、沈下量も大きくなる傾向となる。また、これらをモデル化した FEM 解析でも、その傾向を明瞭に表現することができた。

7. おわりに

本トンネルは、2層構造という点で、いわゆる「都市トンネル」の中でも特殊な例に位置づけられるものと考えられるが、今後、同種の施設計画および構造計画、設計、施工の際に参考となれば幸いである。

「都市トンネル」は、数多くの施工実績が示すように、従来の山岳工法の理念のみではなく、補助工法の効果を情報化施工により常に確認しつつ、これらを合理的に組み合わせて適用することで、はじめて施工可能となる。

今後も同種のトンネルにおける検討を重ねて、合理的な設計法ならびに施工法の発展に寄与したいと考えている。

謝辞 本稿に掲載した計測データの収集および総合的な処理は、株式会社東横エルメス 高城氏 月井氏に多大なる協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 藤村・山野・須藤・猪狩：柱列式地下連続壁と鋼製連壁による立坑の設計と施工例，基礎工，Vol. 26, No. 4, pp80-84, 1998. 4.
- 2) 藤村・山野・原田・須藤：国内初の 2 層道路トンネル 首都圏中央連絡自動車道青梅トンネル，トンネルと地下，Vol. 29, No. 9, pp15-25, 1998. 9.
- 3) 藤村・山野・原田・加藤：市街地道路直下の二層構造トンネルの施工 首都圏中央連絡自動車道青梅トンネル，土と基礎，Vol. 47, No. 7, pp17-20, 1999. 7.
- 4) 桜井・藤村・原田・岩野・加藤：土被りの浅い大断面トンネルにおける地山挙動の非線形逆解析，トンネル工学研究論文・報告集，Vol. 9, pp95-100, 1999. 11.
- 5) 春山・下山・信田・平・奥本：大断面土砂トンネルにおける水平ジェットグラウト工の沈下抑制効果，トンネル工学研究論文・報告集，Vol. 10, pp95-100, 2000. 11.

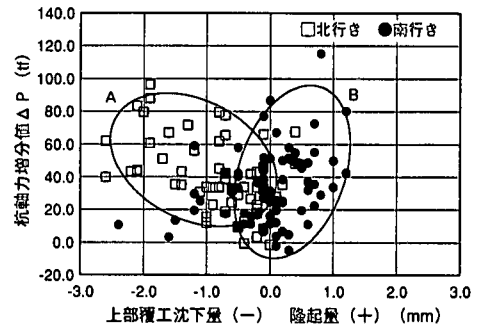


図-14 覆工沈下、隆起と杭軸力増分量

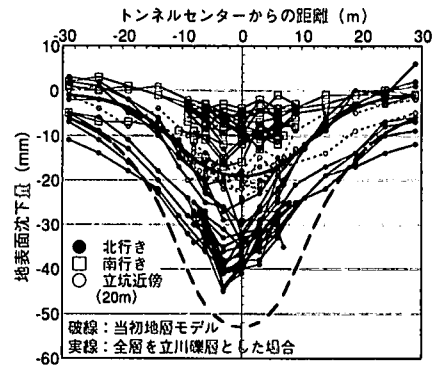


図-15 区間別の地表面沈下横断分布図