

既設地下駅の大規模拡幅に用いる 地盤反力の同定と接続構造の提案

THE IDENTIFICATION OF THE GROUND REACTION AND THE REINFORCEMENT BEAM FOR THE WIDENING OF SUBWAY STATIONS

牛田 貴士¹・仲山 貴司²

Takashi USHIDA¹, Takashi NAKAYAMA²

This paper describes the identification of the ground reaction and the new connecting structure between the existing cut-and-cover tunnel and the new one. These are effective in the large-scaled widening of the subway station tunnel. The ground reactions of complicated shaped tunnels having two different depth under slabs are identified by multiplying the coefficient depending on the difference in level of the under slabs. The coefficient is studied by two-dimensional finite element analysis. the coefficient is 0.2 in the case of this paper, (an existing tunnel: three layers three spans, a new tunnel: one layer one span). It is similar to the value measured in the experiment. The reinforcement beam is devised for the reducing of the reinforcing the exist tunnel in the widening of tunnel. The beam consists of invert beam hooking on the existing slab, the vertical anchors and the horizontal anchors. By the real scale loading test, it is confirmed that the beam have a enough strength. By the trial calculation, the construction cost is 10 % reduced because of the beam.

Key Words : subway station, cut-and-cover tunnel, widening, ground reaction, reinforcement beam

1. はじめに

都市部の地下駅では、混雑緩和や複数線化などの機能向上を目的に、大規模な拡幅工事の事例^{1)~5)}が増加している(図-1)。地下駅の拡幅工事とは、一般に既設く体の側壁を開削し、開削工法で施工された新設く体と接続するものである。

近年は、上記の目的から拡幅規模が大きくなる傾向があり、既設く体に多くの補強が必要になる場合がある。このように既設く体を大規模に拡幅する場合に、営業線を運行しながら既設・新設く体を合理的に補強する構造に関する要望が高まっている。

そこで、本研究では、まず、開削工法による大規模な拡幅工事において既設く体の補強量を低減することを目的として、底面に段差がある「いびつ形状」のく体の構造解析において地盤をモデル化するための地盤反力の分布を同定した。続いて、新設・既設く体の接続部につい

て、新たな補強構造を提案した。最後に、これらを用いた2層2径間の開削トンネルの大規模な拡幅工事を想定した施工順序図を作成し、このケースでは、建設コスト10%削減と工期短縮が可能であること示した。

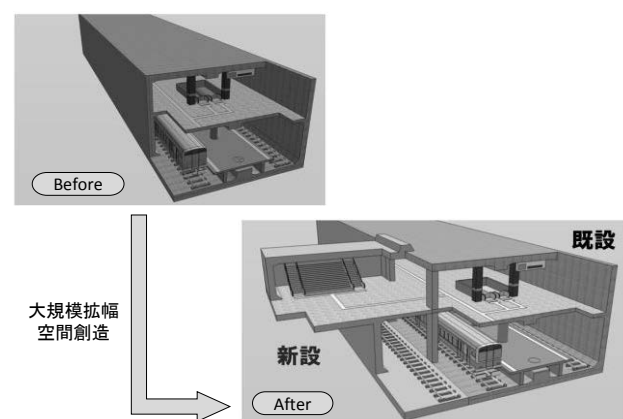


図-1 地下駅の大規模拡幅イメージ

キーワード：地下駅、開削トンネル、拡幅、地盤反力、既設・新設接続構造、

¹ 正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 基礎・土構造 Foundation & Geotechnical Engineering Lab., Structures Technology Division, Railway Technical Research Institute, (E-mail:ushida.takashi.33@rti.or.jp)

² 正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 基礎・土構造 Foundation & Geotechnical Engineering Lab., Structures Technology Division, Railway Technical Research Institute

2. いびつ形状のく体の地盤反力の同定

(1) 提案する評価法の概要

開削トンネルの設計では、一般に、地盤はウィングラ一型のばね要素でモデル化され、その鉛直方向の地盤反力係数の算定には式(1)が用いられる⁹⁾。

$$k_v = f_{ik} \times (1.7\alpha E_0 B_v^{-3/4}) \quad (1)$$

ここに、 k_v ：設計鉛直地盤反力係数 (kN/m³)

α ： E_0 の算定方法および荷重条件に対する補正係数、

E_0 ：地盤の変形係数 (kN/m²)

B_v ：上床版および下床版の換算幅 (m)

f_{ik} ：地盤抵抗係数

地盤反力の値は、一般に載荷面積の影響を受けるため、この算定式は、下床版の換算幅がパラメータに含まれる。大規模拡幅によって、く体が図-2のように底面に段差がある「いびつ形状」となる場合がある。このとき、換算幅について、新設と既設を合わせた幅を用いるか、新設と既設それぞれの幅を用いるか、その中間的な値であるのか明確でなかった。

そこで、く体全幅を換算幅として設定した場合の地盤反力に補正比率を乗じて、それぞれの下床版の地盤反力を同定できるか検討した。

(2) 有限要素法による地盤反力の補正比率の算出

図-2中の段差 h をパラメータとした地盤の弾性有限要素解析を実施し、段差 h がゼロのときに生じる地盤反力に対して、それぞれの下床版に生じる地盤反力の比率を算出した。

解析方法の概要を図-3に示す。く体の条件について、1層1径間あたりを5m×5mに単純化して寸法を設定した。既設く体を3層2径間(15m×10m)とし、新設く体は1径間を想定して幅5mとした。このく体の領域を剛体としてモデル化した。また、地盤条件について、基盤層の上に一様な砂質地盤が堆積していると仮定し、基盤層の上面が、既設く体下面から深度10mに位置するものとした。なお、上載荷重としては、く体および地盤の上面に等分布の単位荷重を作用させた。以上の条件で、段差 h を0～12mまで2mごとに变化させた計7ケースの解析を実施した。

段差 h と各層直下の鉛直変位の平均値の関係を図-4に示す。地盤反力①の位置より地盤反力②の位置の方が鉛直変位量は大きくなっており、く体全体に回転挙動が生じていることがわかる。

段差 $h=0$ mの地盤反力に対する地盤反力の補正比率を図-5に示す。地盤反力①は、段差 h に関わらず、ほぼ一定となるが、地盤反力②は、段差 h が大きくなるにつれて、小さくなる傾向にある。

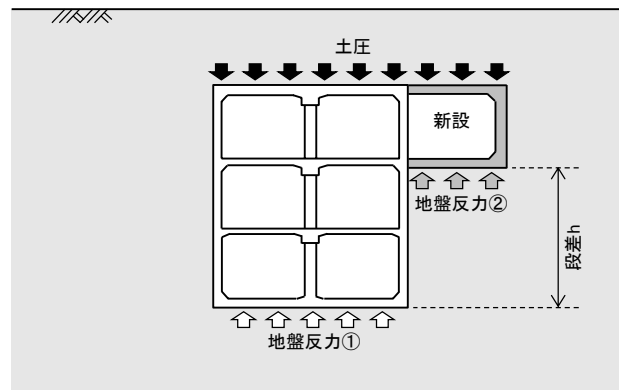


図-2 いびつ形状のく体の地盤反力

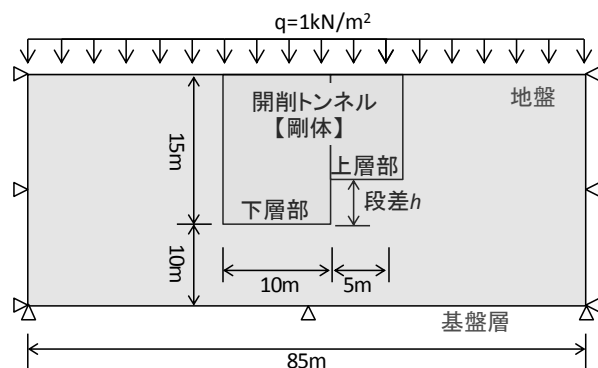


図-3 有限要素解析の概要

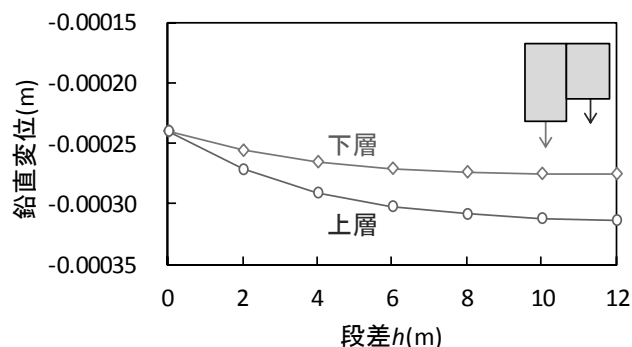


図-4 段差 h と鉛直変位の関係

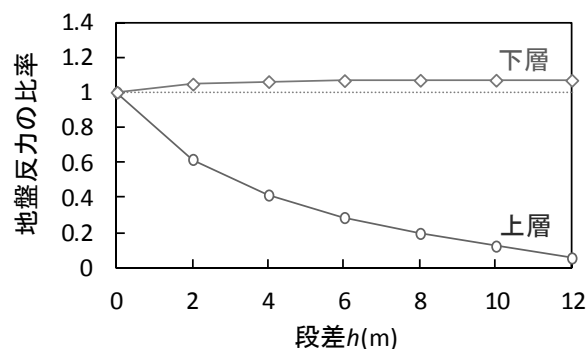


図-5 段差 h と地盤反力の比率の関係

この結果から、「地盤反力の補正法」としては、3層2径間の上層階に1層1径間の拡幅を行う場合 ($h=10$ mの場合)

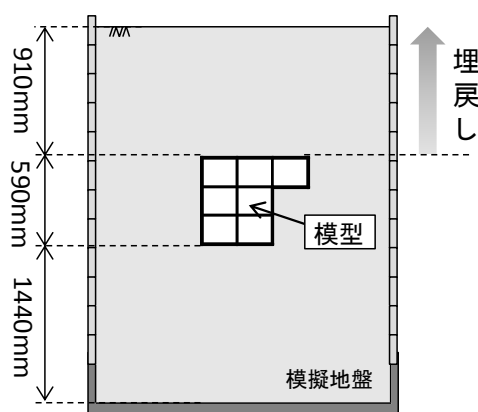


図-6 載荷実験の概要

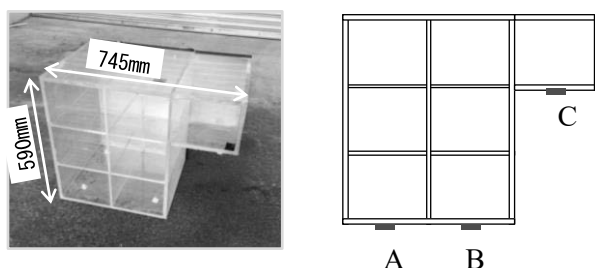


図-7 トンネル模型と土圧計の設置位置

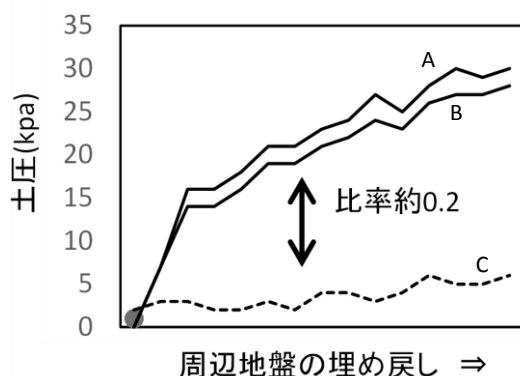


図-8 模型埋戻し時の地盤反力

合) には、地盤反力②は0.2程度までの低減が必要であり、上層階に2層1径間の拡幅を行う場合 ($l=5m$ の場合) には、地盤反力②は0.4程度までの低減が必要であることがわかる。

(2) 載荷実験による補正法の検証

a) 実験方法

補正方法の妥当性を検証するため、トンネル模型の載荷実験を行った。載荷実験の概要を図-6に示す。この載荷実験は、土槽に砂地盤を作成して、トンネル模型を埋戻しながら、作用する地盤反力を把握するものである。トンネルの埋戻し深さは約0.9mとした。

使用したトンネル模型と土圧計の設置位置を図-7に示す。模型はアクリル製で、3層2径間の既設く体の上層階

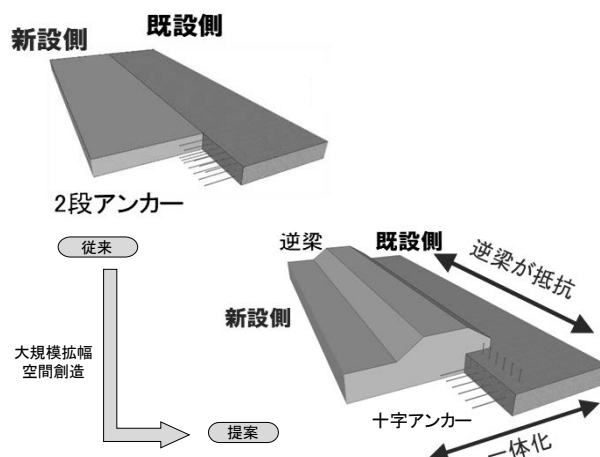


図-9 提案する接続構造の概念図

に1層1径間の新設く体を拡幅した状態を模擬した。模型の部材厚は、事前解析により、実寸法で1層1径間 ($5m \times 5m$ 程度) の開削トンネルの断面力と同様な分布となるように設定した。

b) 実験結果

埋戻し時に下床版に作用した土圧 (地盤反力) を図-8に示す。周辺地盤の埋戻しに伴い、図-2の地盤反力①にあたるA、Bと、地盤反力②にあたるCの土圧は上昇していくことがわかる。このとき、Cに対するA、Bの比率は、埋戻し過程を通して、概ね約0.2で推移した。

このCase2のトンネル模型は、前述の有限要素解析における3層2径間の上層階に1層1径間の拡幅を行う場合 ($l=10m$ の場合) に相当するものであり、地盤の弾性有限要素解析から得られた地盤反力の補正比率と一致する結果を得た。これにより、提案する「地盤反力の補正法」は、載荷実験における実際の挙動も表現していることが確認された。

3. 新設・既設く体接続部の補強法

(1) 概要

大規模な地下駅の拡幅工事において、既設く体の補強が多くなると、作業時間の制約や設備類の切回し等のため、施工費の増加、施工期間の長期化の原因となりうる。そこで、既設く体の補強量低減による拡幅工事の低コスト化を目的として、新設・既設く体の接続部の新たな補強法を提案した。

(2) 提案する補強法

従来の補強法と、提案する補強法の概要を図-9に示す。従来は接続部に2段のあと施工アンカーを配置して、既設側と新設側の横断方向の一体性を確保し、縦断方向は

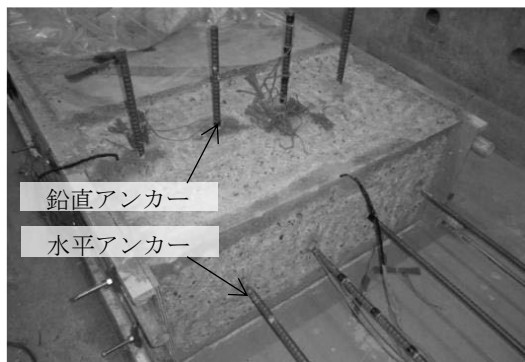


図-10 接続構造のアンカー配置（既設く体側）

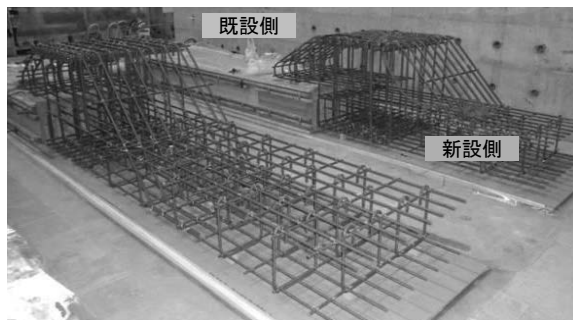


図-11 新設部材の打継状況

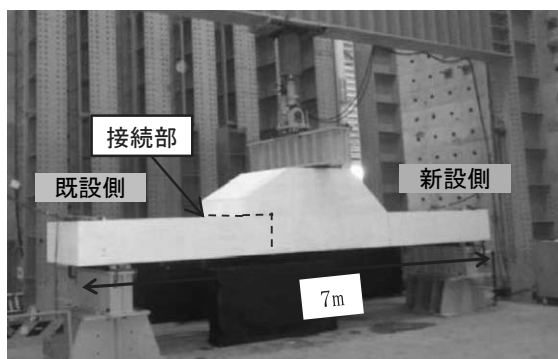


図-12 載荷試験状況（Case1）

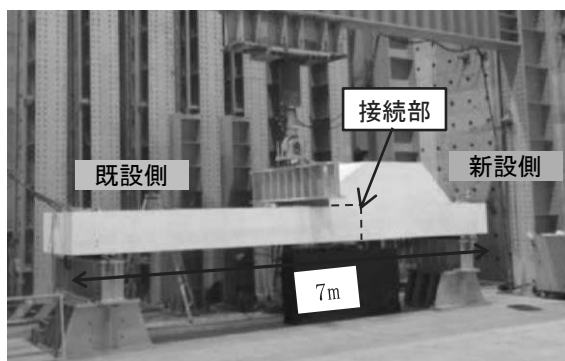


図-13 載荷試験状況（Case2）

別途の補強を設ける構造とする場合が多い。一方、提案する補強法では、横断方向の一体性を十字に配置したアンカーにより確保し、縦断方向は場所打ちの鉄筋コンクリート造の逆梁を既設く体を抱き込む形状で配置することで補強するものである。

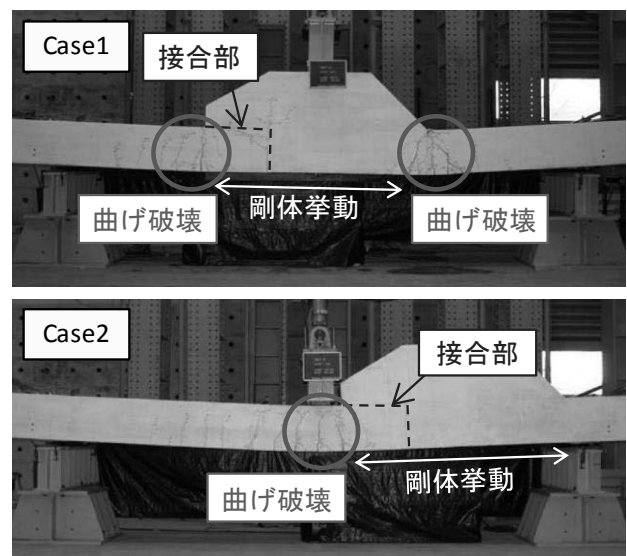


図-14 破壊状況

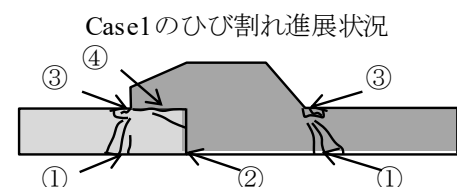
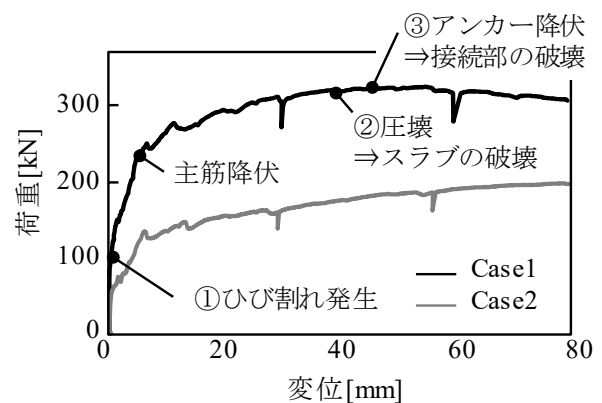


図-15 荷重 - 変位関係

(2) 実物大模型の載荷実験

提案する構造の妥当性を検証するため、実物大模型の載荷実験を実施した。模型の製作手順は以下の通りである。

- ① 既設く体を模擬してあらかじめ作成したRC部材にアンカーを十字に配置する（図-10）
- ② ①の模型に新設部材を打ち継ぐ（図-11）

なお、施工性の確認のため、補強梁にも実際の配筋を施した。

載荷実験は、載荷位置が異なる2ケースとした（図-12、図-13）。Case1は補強梁に、Case2は既設部に載荷した。支点間距離は実スケールの正曲げスパンを想定して7mとした。

載荷終了時のひび割れ発生状況を図-14に示す。継手部が変形せずに接合部で破壊していないことがわかる。

また、荷重-変位曲線と鉄筋応力測定等から把握した破壊の進展状況を図-15に示す。この結果、接合部よりもスラブが先行して破壊するなど、スラブと同等以上の耐力を有することを把握することができた。

4. 提案工法を用いた拡幅工事の施工手順の検討及び施工費の試算

(1) 検討条件

本検討では、下記の条件で既設地下駅を拡幅する場合の施工手順検討及び施工費の試算を行った。

既設く体：2層2径間

新設く体：1層1径間

接続構造：提案した補強構造（以下、提案工法）

地上利用：道路

施工法：開削工法

土被り：3.4m

(2) 施工手順の検討

施工手順を図-16および以降のa)～f)に示す。

a) STEP1

既設く体の側方において、杭打、路面覆工、土留支保を施しながら地盤掘削を行う。なお、杭打、路面覆工は地表面の工事であり夜間作業となる。

b) STEP2

既設く体に対して、新設構造物の接続のためのアンカーを施工する。上床版に対しては本研究で提案する接続補強を行うため、十字にアンカーを施工する。

c) STEP3

新設構造物のく体を築造し、土留支保（切梁）を盛替えながら、新設く体の上床版位置までの地盤の埋戻しを行う。

d) STEP4

既設構造物と新設構造物の接続部の開口位置に、仮囲い、サポートを設置して、開口位置の撤去を行う。仮囲い、サポートは供用中の既設構造物にも設置するため、この際の施工において、供用空間を一部占有することとなる。

e) STEP5

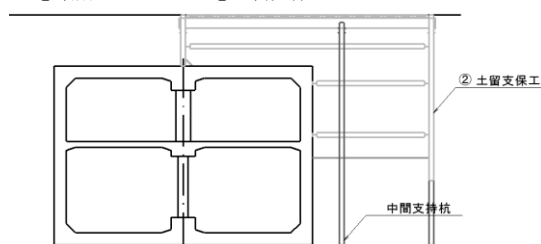
本設支柱を設置する。この際、縦断方向の開口は10m間隔を想定している。従来の水平アンカーを2段配置とする場合には、この段階までに既設く体の補強が必要となる。

f) STEP6

上床版以浅の地盤を埋め戻し、仮設材の撤去を行う。

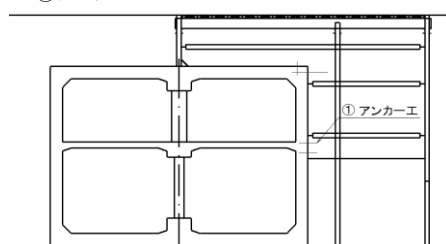
STEP 1

- ①杭打ち（夜間）
- ②覆工（夜間）
- ③掘削工
- ④土留支保工



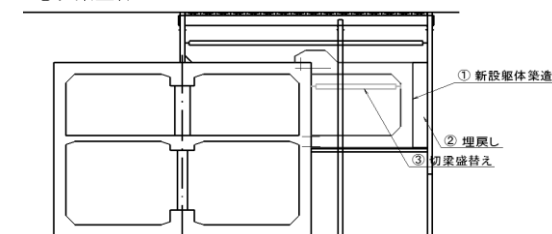
STEP 2

- ①アンカー工



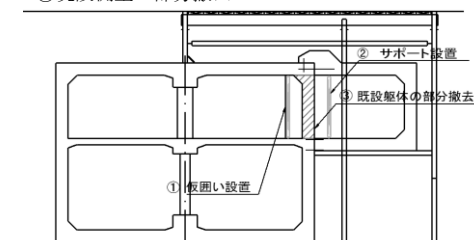
STEP 3

- ①新設躯体築造
- ②埋戻し
- ③切梁盛替え



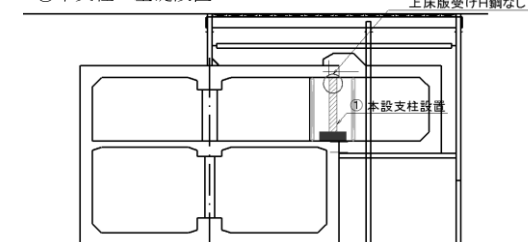
STEP 4

- ①仮囲い設置
- ②サポート設置
- ③既設側壁の部分撤去



STEP 5

- ①本支柱・基礎設置



STEP 6

- ①埋戻し

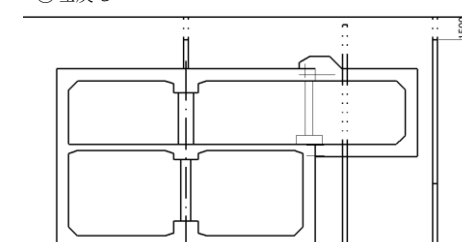


図-16 施工ステップ図

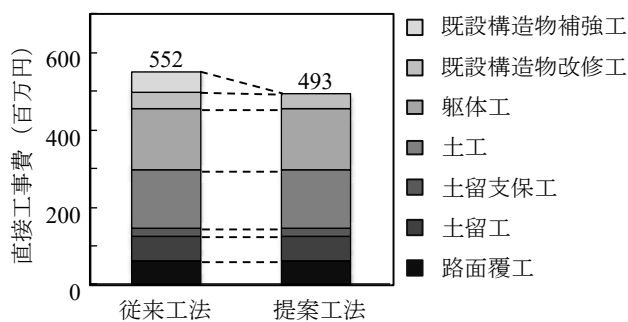


図-17 直接工事費の試算結果

提案工法の利点としては、次の事項が挙げられる。

- ・STEP2のアンカー配置において、この既設構造物の部材の表面近くは、既設鉄筋の腐食等によるひび割れがあり、従来のように表面近くに水平方向のアンカーを2段配置すると十分な引き抜き耐力を得るのが難しい場合がある。一方、提案する工法では、水平方向のアンカーは健全性を有する部材中心付近にのみ配置するため、十分な引き抜き耐力を得やすい。これにより、施工の信頼性の向上を図ることができる。
- ・STEP5の開口部の既設く体の撤去において、従来工法では実施されていた既設躯体の補強が不要となる。これは補強工の直接工事費を削減できるのみならず、供用空間を工事で占有しないことから、利便性の低下を低減できること、また、補強工のための電気・通信ケーブル等の切り回しがないため、工期短縮を図ることができる。

なお、図-16の施工手順図の作成にあたっては、構築した設計法を用いているため、工事中の想定外の箇所へのひび割れや漏水の発生も低減できるものと考えられる。

一方、提案する工法を用いる場合の留意点としては、開口規模が大きくなるにつれ、新旧接続部の逆梁は曲げ剛性を大きくする必要がある。この場合、土留支保や近接する既設埋設管等がある場合に、RC造でない部材の使用などの対応が必要となることがある。

(3) 工事費の試算

施工手順の検討結果をもとに、工事費の試算を行った結果を図-17に示す。本検討では、既設く体の負担増分が大きくなる箇所については鋼板接着工法で補強することを想定した。提案工法では、この補強工事が不要であること等から、直接工事費のみでも全体で約10%のコス

ト縮減が期待できることが明らかになった。

5. おわりに

本研究で得られた知見を、以下に示す。

- 1) 大規模拡幅後の底面高さが異なるいびつ形状のく体の地盤反力について、有限要素解析および模型実験によって、段差が大きくなるにつれて底面が高い側の地盤反力が小さくなる傾向を把握し、底面が高い側の地盤反力を低減する補正法により同定した。
- 2) 底面が高い側の地盤反力の補正量について、3層2径間の上層階に1層1径間、2層1径間の拡幅を行う場合に、上層階の地盤反力をそれぞれ0.2倍程度、0.4倍程度であることが分かった。
- 3) 新設・既設く体の接続部について、開削工法での拡幅工事を想定して、逆梁で既設く体を抱き込み、十字に配置したアンカーで補強する構造を提案した。
- 4) 提案した補強構造の実大模型の載荷実験により、接続部が一般部に先行して破壊しないことを確認し、スラブと同等以上の耐力を有することを把握した。
- 5) 2層2径間の既設地下駅に1層1径間の新設く体を拡幅する工事を想定して、建設コストが10%削減可能であるという試算結果を得た。

参考文献

- 1) 中島宗博，古舘健一：混雑緩和のための地下駅大規模改良，営団地下鉄東西線東陽町駅，トンネルと地下，Vol.34，No.4，pp.37-43，2003。
- 2) 佐野正生，中村茂之，平山義貴，岩本史生；都営地下鉄・浅草線と大江戸線をつなぐ一汐留連絡線東新橋工区，トンネルと地下，Vol.37，No.1，pp.29-39，2006。
- 3) 柄澤正芳：羽田空港国際線ターミナル駅建設工事－供用中の鉄道トンネルを拡幅し地下新駅を構築，建設の施工企画，Vol.733，pp.20-26，2011。
- 4) 鈴木章悦，藤沼愛，西川祐：東京メトロ有楽町線・副都心線小竹向原～千川駅間連絡線設置計画，地下空間シンポジウム論文・報告集，Vol.16，pp.73-81，2011。
- 5) 坂口淳一，梶山雅史，石田和彦：ホーム増設とコンコース一体により地下駅を大規模改良－都営地下鉄大江戸線勝どき駅，トンネルと地下，Vol.42，No.12，pp.45-51，2011。
- 6) 国土交通省 監修・鉄道総合技術研究所 編：鉄道構造物等設計標準・同解説 開削トンネル，2001。