

供用中の鉄道トンネルに対する補強工事

神保 誠二・蘭 康 則・杉山 伸 康

供用中の地下鉄路線である複線シールドトンネルの一部に、変形が確認された。変形区間は延長約110 mであり、その恒久的な安全性を確保するため、高圧噴射攪拌工法による外部補強工事と、110 m区間のうち変形の大きい30 m区間に対する二次覆工による内部補強工事を実施した。いずれの工事についても、供用中の鉄道トンネルに対する補強工であり、列車運行を確保することが施工時の絶対条件とされた。

本稿では、補強工事の概要、施工方法を決定するために実施した試験施工、および施工結果について述べる。

キーワード：地下鉄、トンネル、補強工事、試験施工、高圧噴射攪拌工法、計測工、鋼製段差継手セグメント

1. はじめに

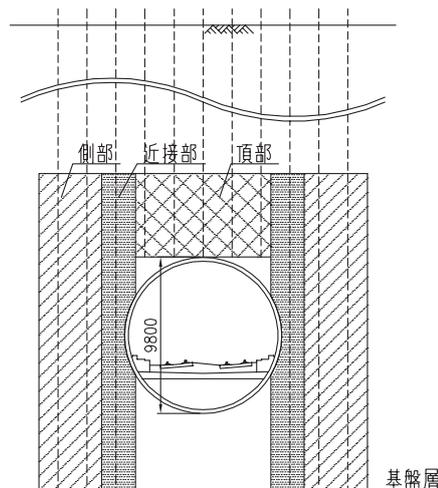
トンネルの変形が確認されたことをうけ、検討委員会が設立され、トンネルの現在の安全性の評価および対策工の選定が行われた。その結果、現状ではトンネルは一定の安全度を有するが、上部の土地利用計画による上載荷重の増加と首都直下型地震の可能性を考慮すると、対策工事は早急な実施が必須とされた。

2. 外部補強工事

外部補強工は、将来的な地上改変によって作用すると想定される荷重からトンネルを防護する目的で実施した。図一1はトンネルと改良体との位置関係ならびに改良体の形状を示したものである。改良体は地上改変によって生じる上載荷重をトンネルに作用させずに、基盤層に直接伝達させる門型構造を採用した。施工はトンネルとの位置関係で近接部、側部および頂部に分類し、施工を管理することとした。

(1) 試験施工

外部補強工の対象土質は粘着力Cが 50 kN/m^2 を超える高い粘着力を有する粘性土地盤であることから、高圧噴射攪拌工法による改良体の造成径が目標とする径を下回ることが懸念された。そのため、改良径や設計強度が確保出来ること、および近接するトンネルへの影響を確認するため、計16本の造成を試験施工と



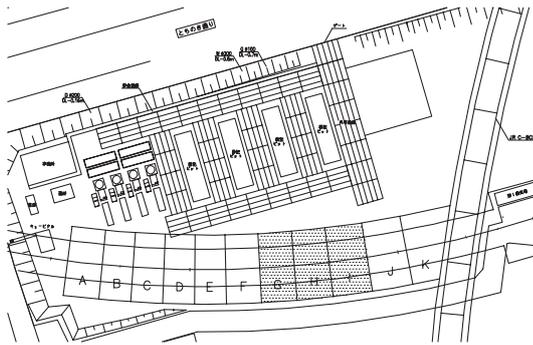
図一1 外部補強工計画断面図

して実施した。

(a) 地盤改良出来形

試験施工の結果、16本の中で出来形にばらつきが確認された。その原因は、対象地盤が高い粘着力を有する複雑な地質であることによると考えられた。このため、外部補強区間全体の110 m区間を均一な改良径および杭割付で施工することは品質確保の面で困難であると考えられた。

発注者及び設計者と協議の結果、図一2のように補強区間を約10 mの11ブロックに分割し、ブロックごとに四隅の杭に対して試験施工を行って有効径を設定し、有効径に合わせて杭の割付けを行う施工方法を採用した。

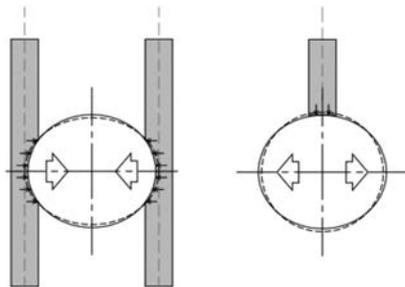


図—2 外部補強ブロック分割
※網掛部 内部補強併用箇所

(b) 計測結果と本施工の施工方法

当初、トンネルは横に伸びる方向に変形（以降「横伸変形」）が確認されており、地盤改良を行うことによって周辺地盤に乱れが生じて、さらに横伸変形が進行することが懸念された。このため、トンネル内外に計測機器を設置し、トンネルの変形、軌道の変位、周辺地盤の挙動を計測した。

トンネルの変形計測の結果、地盤改良の施工と連動したトンネルの変形が確認された。変形の方法は一方方向ではなく、近接部および側部の地盤改良を行った場合、横伸変形が復元する方向に変形（以降「復元変形」）し、頂部の地盤改良を行った場合、横伸変形が進行し（図—3）、1断面の施工完了時には、復元変形が卓越して残るとということが確認された。



図—3 トンネル変形の傾向

変形の大きさは、トンネルから最も近い近接部施工時に最も大きく、側部および頂部では比較的小さい結果となった。このため、近接部の施工は、列車運行が終了した線路閉鎖時間帯（約3時間）で行い、側部及び頂部の施工は、工期短縮のため、施工時間帯の制約を設けずに、昼夜間施工で行うこととした。

試験施工で復元変形が支配的であったことをうけ、外部補強および内部補強の併用区間では、トンネルや軌道の計測値を常時監視し、横伸変形が管理値を超えた場合は即座に施工を中断する事を条件に、外部補強を先行して実施する手順とした。

(2) 施工結果

有効径は、造成杭中心からの各離れにおいてコアボーリングを行い、硬化コアの採取率により判定した。頂部はトンネル上部の将来荷重を近接部および側部に伝達する梁部材であり、確実なラップが必要となる。このため、硬化コア採取率90%以上を合格値とした。近接部及び側部は、頂部に作用する荷重を基盤層まで伝達する柱部材と考え、硬化コア採取率が低下しても柱面積を増やす事で荷重の伝達が可能であると考えた。このため、70%以上を合格値とし、硬化コアが100%の場合に必要なブロックごとの最小改良面積を、硬化コア採取率で除算することで柱面積を算出した。

ブロックごとに有効径を判定し、杭の再配置を行いながら、外部補強を完了した。施工数量は、杭本数が657本、施工体積が43,900 m³となった。

地盤改良実施後、ブロックごとに近接部、側部、頂部の1箇所ずつ造成杭のラップ部を選定し、合計33本の事後調査工を実施した。その結果、すべての個所で硬化コアの採取率および一軸圧縮強度試験の結果が基準値以上であることが確認できた。

(3) 計測結果

内空変位については試験施工と同様、近接部および側部の施工時には復元変形が生じ、頂部の施工時には横伸変形が確認された。上下方向の変形量と水平方向の変形量とは、その絶対値が概ね同等の相反関係であり、トンネルにいびつな変形が生じていないことを確認した。

軌道計測の結果は、外部補強施工箇所近傍で僅かに変位はみられたが、列車の運行に支障となる変位は確認されなかった。これは、当該箇所が直結軌道ではなくバラスト軌道であることが一因であると考えられた。

地盤計測結果は、外部補強施工箇所近傍で僅かに変位はみられたものの、大きな変位は確認されなかった。

トンネル内の漏水については、近接部施工時に2回トンネル内で漏水が確認されたが、いずれも施工を終了した時点で漏水もとまったため、列車運行の支障とはならなかった。

3. 内部補強工事

トンネルは現状では一定の安全性は確保しているものの、変形が大きい一部区間を含めて所要の安全性を確保するため、内部補強工を実施した。内部補強工の

目的は、トンネルの覆工が終局状態に達する荷重（終局荷重）が現況荷重に対して安全率 $F_s = 1.5$ を確保する補強を行うこととした。補強構造は、既設トンネル覆工の内側にさらに覆工体を設置して二重リング構造とし、二重リングの全体で安全率 1.5 を確保する構造とした。

(1) 施工方法検討

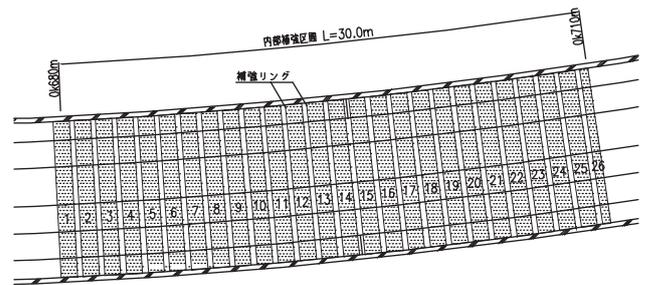
当初検討委員会が提案した内部補強方法は、コンクリート二次覆工による補強構造であった。しかし、限られた線路閉鎖時間内の施工では打継ぎ目が多数生じ、品質および維持管理上の不具合が発生する懸念があった。このため、一様な品質が期待できる二次製品である、鋼製段差継手セグメント（以降「セグメント」）を使用した施工方法を採用した。このセグメントは、継手が階段状になることで隣接するリングとイモ継ぎにならず、また一方の継手が凸の形状を、他方の継手が凹の形状を有し、それぞれが嵌合することにより高い剛性が得られるという特徴がある（写真—1）。



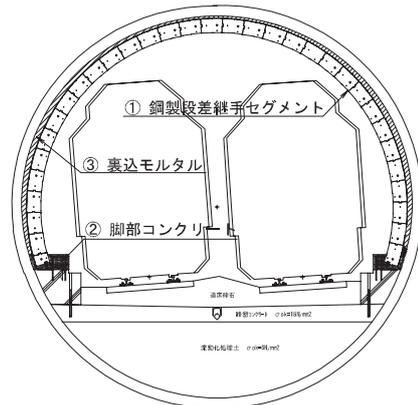
写真—1 鋼製段差継手セグメント

内部補強の形状は、1ピースの幅が 225 mm であるセグメントを 4ピース並べて1段とし、それをトンネル周方向に 33段組み合わせることで、幅 900 mm の補強部材 1リングとなる構造とした。シールドトンネルを構成する既設覆工幅（1,200 mm）の中央部分に配置して補強する構造として設計した。内部補強を行う 30 m 区間には、既設覆工が 25リングと半分の割り付けであったことから、セグメントも 900 mm 幅で 25リング、及び 450 mm 幅で 1リングの合計 26リングの構成とした（図—4）。

補強部材は、①鋼製段差継手セグメント、②脚部コンクリート、③裏込モルタルの 3部材で構成される（図—5）。それぞれの役割・構造・性能は下記のとおりである。



図—4 内部補強区間平面図



図—5 内部補強構造構成図

①鋼製段差継手セグメント

セグメントはインバートを通じてアーチ状となり、設計荷重を支える部材である。鋼製のセグメント、及びボルトからなる構造である。防錆仕様は、ピースが小さく、また形状が複雑であることから、溶融亜鉛めっき（HDZ55）とした。

②脚部コンクリート

脚部コンクリートは、セグメントと既設トンネル構造物との界面にて応力を伝達するための部材であり、鉄筋及び無収縮モルタルからなる構造である。

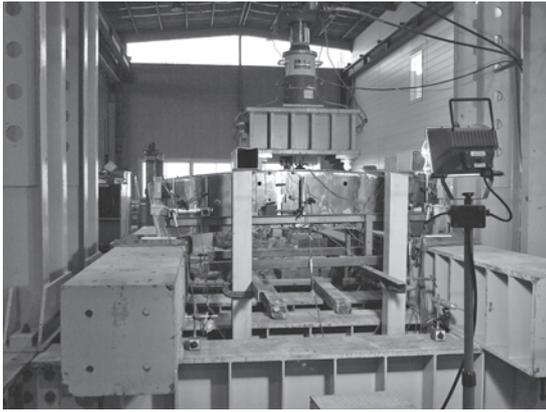
③裏込モルタル

裏込モルタルは、既設覆工に設計荷重が作用した際、二重リング構造間で応力を伝達する部材であり、無収縮モルタルからなる構造である。

(2) 工場検査および試験施工

(a) 性能確認試験の実施

セグメントの強度、剛性および組立形状が要求性能を満たしている事を確認するため、工場検査を実施した。強度および剛性については、4ピースを添接したセグメントに設計荷重相当を載荷し、弾性変形範囲内であること、目標とするたわみ量以内であることを確認した。組立形状試験は1リング33段の仮組を行い、寸法誤差が管理基準値内であることを確認した（写真—2, 3）。



写真一 性能確認試験 載荷状況



写真一 組立形状試験状況

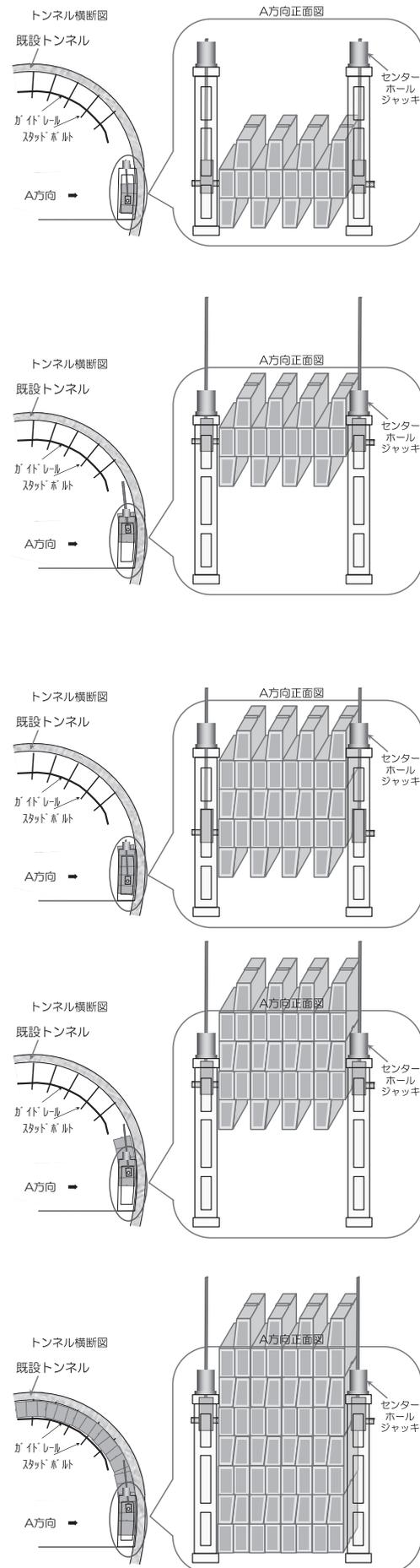
(b) 組立方法の検討

列車の運行を確保しながら、夜間線路閉鎖時間内にセグメントを組み立てるには、列車の建築限界内に大規模な仮設物を設置することは出来ない。この条件下で施工を行う方法として、設置箇所の最下段に1段分のセグメントを組み立てて油圧ジャッキでせり上げ、出来たスペースに更に1段分を組み立ててせり上げるという手順でセグメントを下から順に組み上げ、天頂部で閉合させることで1リングの補強材を組み立てる方法を採用した(図一6)。

この施工方法の場合、閉合する前の過程では、組み立てたセグメントが自立しない不安定な状態となる。このため、既設トンネルからセグメントを吊り下げて安定性を保ち、かつ組立位置まで正確にセグメントを誘導するガイドレールを設置することとした。また、建築限界外の限られた空間に設置できるセグメントせり上げ用架台および油圧ジャッキなどの設備を計画した。

(c) 実物大組立試験

計画している仮設設備および機械設備による施工の実現性を確認するため、実物大の模擬トンネルを作成して組立試験を実施した。セグメント吊り下げ部材で



図一6 セグメント組立ステップ



写真一4 組立試験状況

あるスタッドボルト及びガイドレールにはひずみ計を設置し、組立中に想定外の荷重が発生していないことを確認した(写真一4)。

さらに、万一吊り下げ部材の破壊が発生した場合でも、セグメントが軌道に倒れないダブルセーフティー対策として、既設トンネルに落下防止金具を取り付けることとし、設置状況及び建築限界に対する収まりについて確認を行った。組立試験の結果、セグメントの形状や仮設部材、及びせり上げ方法に細かい改善点を確認されたが、施工方法の実現性を確認することができた。

(d) 裏込モルタル充填試験

裏込充填工事も営業線内での施工となるため、大量のモルタルの漏れや、作業終了後の滴下を発生させることはできない。このため、使用した材料には、高いチクソトロピー性を有する空隙充填用グラウト材を採用した。この材料は通常の無収縮グラウトのように自然に流れることはなく、ポンプ等の圧力が作用するときだけ流動するという特性を持つ。漏れが発生した場合でも、ポンプの吐出を停止すれば漏れはとまり、打設完了後に漏れ出す事もないという材料である。

トンネル内での施工に先立ち、セグメント組立試験を実施した模擬トンネルにて、充填試験を行った。試験の目的は、選定材料の適合性、注入方法の実現性、棲型枠や使用機械の適合性、およびモルタルの充填性の確認とした。

その結果、選定材料及び注入方法で、天端部まで確実に充填できることを確認した。また、一部ポンプ吐出中の棲枠からの漏れがあったものの、棲枠の固定方法の見直しを行うことで、大量のモルタルの漏れや、作業終了後の滴下を発生することなく、施工可能であることを確認した。

(3) 仮設工事

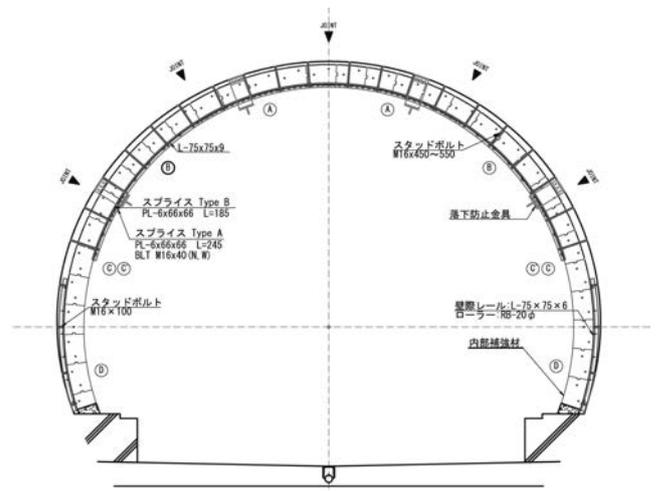
(a) 断面形状の計測

内部補強実施区間は元来トンネルの変形が大きい箇所であり、かつ外部補強によって変形量が変わることが確認されている。セグメントは組み立てた形状が真円形となるため、仮設物も真円形に設置するために、内空断面計測器によりトンネル内の断面計測を実施した。内空断面計測器は、レーザー距離計が台座上で回転しながら角度及び距離を計測することで、内空断面を計測できる機械である。これを軌道用の台車に設置し、トンネル横断方向に回転させることにより、トンネル断面の計測を行った。

(b) 仮設部材の設置

スタッドボルト、ガイドレール、および落下防止金具の設置作業はすべて、線路閉鎖およびき電停止後にトンネル内に足場を組み立てて行った。

仮設部材の設置断面形状を図一7に示す。ガイドレールは、上半部はスタッドボルトにてトンネルから吊り下げる形状で、下半部はトンネルにもたれ掛ける形状である。これは、セグメントを最下段よりせり上げた場合、初期の段階ではトンネル側部にもたれ掛かりながら、ある程度の高さからトンネル中心方向にもたれ掛かりながらせり上がることになるためであり、どちらの場合でもセグメントが不安定とならない形状とした。



図一7 仮設部材設置計画断面図

(4) セグメント運搬工

セグメントは、1ピース約100kgである。地上からの搬入および駅構内での運搬は、すべて荷役用の台車を用いて、2ピース単位で行った。台車への積み込み及び荷下ろしは人力にて行った。駅構内移動はエレベータを使用し、営業時間外で行った。ホーム上の仮

囲い内に一時ストックしたセグメントは、補強リング1段分である4ピースをボルトにて締結し、以降はすべて4ピースを1単位で作業を行った。

ホームから施工箇所までの運搬は、組立式の簡易門型クレーンを用いて軌道にセグメントを下ろし、軌道上を走行できる台車を用いて手押しで運搬した。施工箇所ではローラーコンベアを用いて組立箇所まで移動し、ホイストにて組立箇所への投入を行った（写真—5）。

(5) セグメント組立工

トンネル内でのセグメントの組立は、線路閉鎖時間内の約180分間の間で施工を行った。この間に足場の組立解体、資材の運搬、片付けおよび跡確認を行うため、セグメント組立の実作業時間は約100分間であった。

試験施工の際は、製作精度などの原因により、1ピースのごとの組立でも嵌合部が入りにくく作業に時間を要したが、凸部及び凹部の面取りを行ったこと、ロール発注により製作精度が向上したことなどにより、4ピースごとであってもわずかな調整で組み立てることができた。

1日の作業では平均して、両脚からそれぞれ4段の組立を行った。33段分の組立および閉合作業、ジャッキなどの仮設物の移動を含めたサイクルタイムは、1リングあたり6日程度であった。

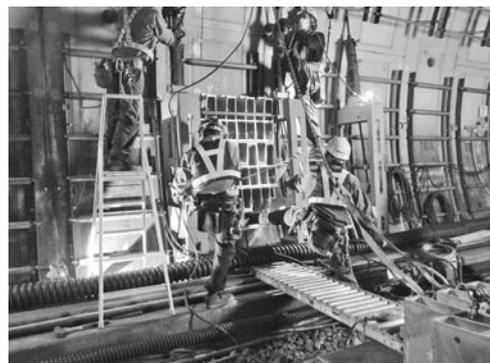
写真—6に施工状況を示す。

(6) 脚部コンクリート工

鋼製段差継手セグメントの脚部と既設トンネルとの界面には、水平方向の応力を伝達する脚部コンクリートを打設した。セグメントからの水平分力は、最下段のピースに設置したボルト鋼材を介して伝達し、既設トンネルに打設したあと施工アンカー、鉄筋、および無収縮モルタルにて既設トンネルと閉合させる構造とした。

(7) 裏込モルタル工

トンネル内での充填作業は、ペール缶およびハンドミキサにて混練を行い、モルタルポンプにて圧送した。充填試験で漏れが生じた棲枠部は、サポート材で補強を行い、トンネル内に大きな漏れを発生させることなく、無事充填が完了できた（写真—7）。



写真—5 セグメント運搬フロー



写真—6 内部補強工施工状況



写真—7 内部補強工完了全景

4. おわりに

供用中の鉄道トンネルに対して外部補強および内部補強を実施した。

外部補強では、複雑な土質に対して、施工範囲を細分化して試験施工を密に行うことで、所要の品質を確保することができた。内部補強では、線路閉鎖時間内

の限られた作業時間、建築限界を確保した狭い作業スペースという条件のなか、実物大の実証実験など細心の準備を行い、列車の運行支障を発生させることなく工事を完了することができた。外部補強と内部補強を通じて、トンネルの恒久的な安全性を確保することができた。

本工事で得られた知見が、同様のトンネルの補強工事の参考事例となり、公共輸送の更なる安定供給に供することができれば幸いである。

JICMA

《参考文献》

- 1) 杉山仲康・蘭康則・神保誠二：地盤沈下により変形したシールドトンネルを供用中に補強（設計編），トンネルと地下，pp.31-40，2015.9.
- 2) 杉山仲康・神保誠二・桜井靖彦・横山頭：内部補強と外部補強を組み合わせたシールドトンネル変状対策（施工編），トンネルと地下，pp.25-36，2015.10.

【筆者紹介】



神保 誠二（じんぼ せいじ）
清水建設㈱
土木東京支店 千葉土木営業所
工事長



蘭 康則（あらかぎ やすのり）
日本シビックコンサルタント㈱
地下空間技術事業部
課長



杉山 仲康（すぎやま のぶやす）
横浜市交通局
工務部施設課
安全担当係長