駅非開削部の大断面馬蹄形トンネルに採用した角形エレメント推進工法の坑口止水対策

茶木　勇太[1]・藤川　博樹[2]・立石　和秀[3]・田中　宏典[4]

[1]（独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構　東京支社 綱島鉄道建設所

（〒232-0053 神奈川県横浜市港北区綱島西 1-10-10 第 5 吉田ビル 2 階）

E-mail: chanoki.yut-2g43@jrtt.go.jp

[2]（独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構　東京支社 綱島鉄道建設所

E-mail: fujikawa.hir-w2rc@jrtt.go.jp

[3]正会員　（独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構　東京支社　工事部

（〒105-5403 東京都港区芝公園 2-4-1（芝パークビル B 館））

E-mail: tateishi.kaz-u7gk@jrtt.go.jp

[4]正会員　戸田建設（株）価値創造推進室　技術開発センター　社会基盤構築ユニット

（〒104-8388　東京都中央区京橋 1-18-1）

E-mail: hirofumi.tanaka@toda.co.jp

新綱島駅（仮称）は，相鉄・東急直通線羽沢横浜国大駅起点 7k800m に位置し，深さ約 35m，幅員約 14～25m の島式ホームを有する地下 4 層を基本とした構造の地下駅である．当該駅の始終端部はシールドトンネルの発進立坑として利用している．駅全長 240m のうち日吉側 34.5m は非開削工法を選定している．また，非開削区間はホームを設置するため内空 224m^2（H=14m，B=19m）を有した大断面が必要となる．当該箇所の地層は，全体としては N 値 50 以上の強固な上総層となっているが，砂層と泥岩の互層であり，砂層分布は不明確で豊富な地下水を有している．地上部は，病院および商業ビルなど堅牢な建物が密集し，地上部の利用に制限があること，また地質状況を踏まえて，非開削工法で到達立坑の設置不要な角形エレメント推進工法を採用した．本稿では，地表面の影響を最小限に抑えるための止水性の確保に向けた対策について報告する．

Key Words: *rectangular element jacking method,horseshoe-shaped, trenchless tunneling, water stop*

1.　はじめに

相鉄・東急直通線は，神奈川東部方面線の一部として，相鉄・ＪＲ直通線羽沢横浜国大駅から新横浜駅（仮称）を経由し，東急東横線・目黒線日吉駅までの区間に延長約 10km の連絡線を整備するものであり（**図**-1，**表**-1），平成 24 年 10 月に工事施行認可を受けている．

相鉄・東急直通線，新綱島駅（仮称）は，駅全長 240m のうち日吉側 34.5m は非開削工法を選定しており，本報告では，角形エレメント掘進時において坑口での止水対策に焦点をあて，報告する．

2.　工事概要

(1)　新綱島駅（仮称）の概要

新綱島駅（仮称）は，相鉄・東急直通線羽沢横浜国大駅を起点として 7k800m に位置し，深さ約 35m，幅員約 14～25m の島式ホームを有する地下 4 層を基本とした地下駅である．当該駅の始終端部はシールドトンネルの発進立坑として利用している．

図-1　路線図

表-1　事業概要

路線名		相鉄・JR直通線	相鉄・東急直通線
整備区間		相鉄本線西谷駅～JR東日本東海道貨物線横浜羽沢駅付近	JR東日本東海道貨物線横浜羽沢駅付近～東急東横線日吉駅
事業者	建設主体	鉄道・運輸機構	鉄道・運輸機構
	営業主体	相模鉄道(株)	相模鉄道(株)，東京急行電鉄(株)
事業内容	鉄道の種類	普通鉄道	普通鉄道
	延長	約2.7km	約10.0km
	軌間	1,067㎜	1,067㎜
	運行区間	海老名駅･湘南台駅～西谷駅～羽沢横浜国大駅～新宿方面	海老名駅･湘南台駅～羽沢横浜国大駅～日吉駅～渋谷方面・目黒方面
	駅の位置	羽沢横浜国大駅(横浜市神奈川区)	新横浜駅(仮称，横浜市港北区)新綱島駅(仮称，横浜市港北区)

写真-1　新綱島駅（仮称）付近航空写真

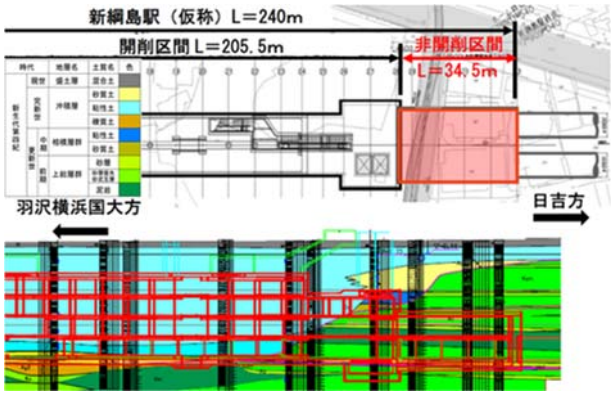


図-2　平面図および地質縦断図

また，非開削区間はホームを設置するため内空 224m^2（H=14m，B=19m）を有した大断面が必要となる．地上部は，病院および商業ビルなど堅牢な建物が密集し（写真-1），地上部の利用に制限があること，また地質状況を踏まえて，非開削工法で到達立坑の設置不要な角形エレメント推進工法を採用した．

(2)　地質概要

当該箇所の地層は，全体としては，N 値 50 以上の強固な上総層群となっているが，砂層と泥岩の互層であり，砂層分布は不明確で豊富な地下水を有している（図-2）．

(3)　非開削部の構造

トンネル断面形状は，従来の施工実績で用いられている長方形断面よりも構造的に有利な馬蹄形断面を採用した．図-3 は長方形断面の施工実績の一例 [1]として，つくばエクスプレス六町駅工事における非開削区間の横断面図を示したものであり，当該区間の施工延長は約 15m，掘削対象の地盤の N 値は 1～10 程度であった．今回の施工は，従来の施工実績と比較して固い地盤内の施工であること，施工延長が長いこと，および本設部材とすることなどから，角形鋼管や推進機に以下の改良を行った．

a)　角形鋼管の改良

角形鋼管については，従来実績より施工延長が長くなること，本体利用することおよび馬蹄形断面を採用したことなどから，推進時継手抵抗力の低減，継手品質向上のためのモルタル充填の確実性，および確実な継手閉合のための施工誤差の吸収性向上が課題であった．そのため，形状に変更を加えた新たな継手を用いた角形エレメントを開発した（図-4）．この技術は，鋼板を溶接で接合した 1000mm×1000mm の箱型断面を 1 エレメントとし，凹形状と凸形状の継手を嵌合させ推進し，ボルトで拘束することで，継手部にも鋼板部と同等以上の耐力を確保する構造である．また継手内の大きなクリアランスにより継手篏合時の抵抗低減や，補助工法を必要としない止水対応型等の特長を持つ．

b)　推進機の改良

推進機については，到達立坑を構築できない当該工区では，従来の実績のように到達側から駆動部などを回収

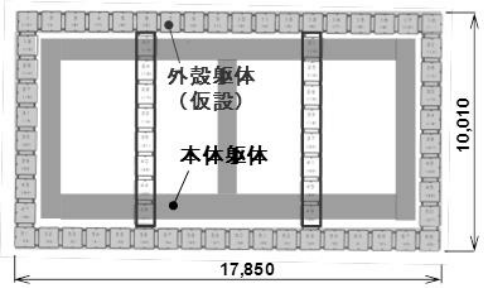


図-3　つくばエクスプレス線六町駅構築断面図

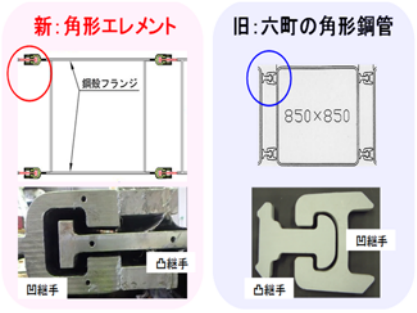


図-4　角形エレメント継手概要

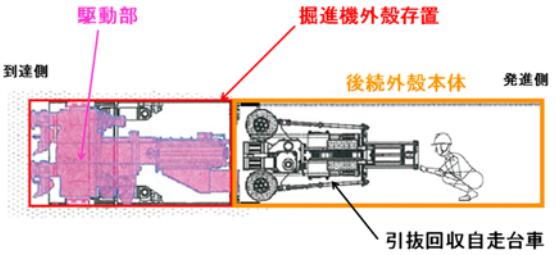


図-5　角形エレメント駆動部引抜概要図

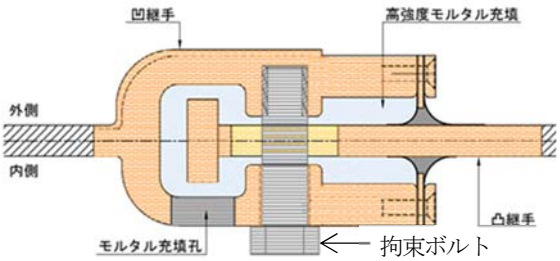


図-6　角形エレメント間継手標準図

することは不可能であったため，新たに引抜き回収自走台車（図-5）を開発し，駆動装置などを再利用することとした．

また，経済性から外殻を本体構造部材とするため，エレメント内をコンクリートで充填する一体化構造とするとともに，継手は約 60kN（トルク約 288N・m）の軸力を導入して拘束ボルトで締め付け，内部をモルタルで充填することとした（図-6）

また，断面形状は構造的には真円形状が有利であるが，経済性・施工性を考慮し，馬蹄形断面を採用した．

3.　非開削部の施工前止水性能確認試験

(1)　非開削施工フローおよび坑口止水装置の概要

非開削部の施工ステップ図を図-7 に示す．①継手部推進は，エレメントから張り出した継手が掘進中に抵抗となるため，流動化材に置き換えた．⑤エレメント間の土砂搬出は，人力による手はつりで掘削し，土砂はバキュームで吸引した．

前述したとおり，当該工区にて初採用となる工法のため，施工ステップ各段階で施工に支障が無いことを確認するため，実施工前に確認試験を実施した（表-2）．本編では，⑤の坑口止水装置試験について報告する．

角形エレメント掘進工では，土留めに設置したガイドプレートに坑口止水装置（図-8）を取り付け，角形エレメントを掘進させる．1 本施工後は，坑口止水装置を取り外し，鉄板を設置する．その後，隣接部に坑口止水装置を取り付ける一連の作業を繰り返しながら，躯体を施工する．坑口止水装置は，2 段のゴムパッキン（以下，

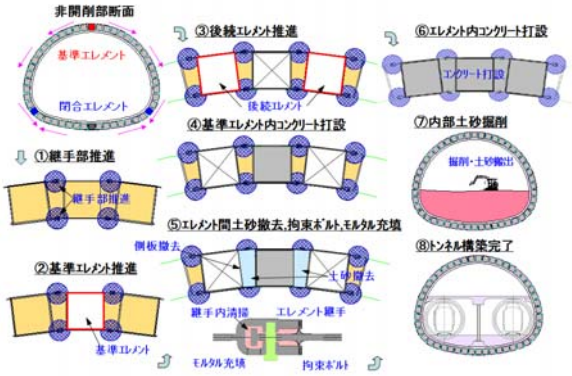
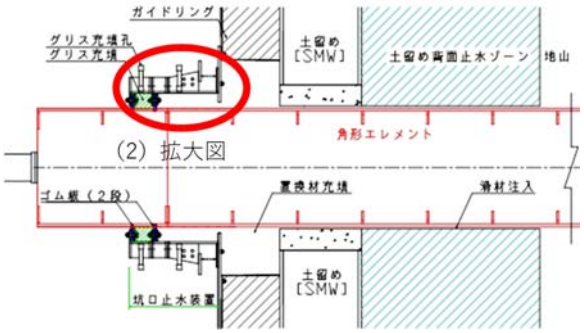


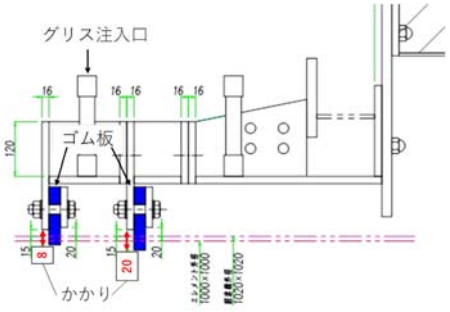
図-7　非開削部施工ステップ

表-2　施工前試験項目

番号	項目
Ⅰ.構造性能確認試験	
①	単体エレメント載荷試験
②	継手単体引張試験
③	連結エレメントによる載荷試験
Ⅱ.止水性能確認試験	
④	継手部止水装置試験
⑤	坑口止水装置試験
⑥	開口蓋止水性耐力確認試験
⑦	凹継手止水性能確認試験
Ⅲ.施工性能確認試験	
⑧	継手部充填材注入試験
⑨	推進時の精度確認試験



(1) 全体側面図



(2) 拡大側面図

図-8　坑口止水装置構造図

ゴム板とする）と固定金物で構成される．ゴム板間にグリス注入孔を設け，ゴム板と充填したグリスによって地下水に対抗する．

角形エレメント間継手は形状が複雑であるため，施工上重要となる角形エレメント掘進時の坑口部の止水性能を確認するための施工前止水性能確認試験（以下、施工前試験とする．）を実施した．

(2) 試験概要

施工前試験では，坑口止水装置が所定の止水性能を有することを実証することを目的とし，実物大の坑口止水装置を製作し，角形エレメントを挿入させて止水性能を確認した．坑口止水装置はシールドのテール部に使用されるブラシパッキンを使用する計画であったが，複雑な形状にも適用でき，止水性に実績のあるゴム板とした．

ゴム板の構造は，推進工で実績のある硬度 60 度で厚さが 35mm のものを使用した．また，試験体とゴム板が重なり合う長さ（以下，かかりとする）は，坑口側は 8mm，切羽側は 20mm とした．

(3) 試験方法

施工前試験の概要を**図**-9 に示す．試験装置は，坑口止水装置，水槽，押込みジャッキ，架台で構成される．試験方法は，坑口止水装置を取り付けた水槽に，実物大のエレメント供試体を押込みジャッキで挿入し，水圧を作用させる．作用させる水圧は想定される最大水圧 0.35MPa に対して，安全率 1.2 を考慮し，0.45MPa とした．試験体挿入後，水圧を 0.1MPa に上昇させる．1 時間保持し特に漏水がなければさらに 0.1MPa 毎に水圧を上げ，0.45MPa まで載荷する．

この時，坑口止水装置と角形エレメントの隙間から漏水が確認された場合には，漏水原因を調査し，高粘度のテールシール材（以下，グリスとする）をゴム板間に注入するなど対策を講じた上で再試験を行う．角形エレメント推進時も漏水量が施工に支障がない範囲であれば，試験終了とする．止水装置は，前述したとおり 2 段のゴム板の配置とし，グリス注入孔は，ゴム板 2 段の間にグリスを注入することで止水性を高める目的で設けた．ポンプは高圧注入できるエアポンプを使用した．

(4) 試験結果

図-10 に施工前試験時の水圧の測定結果を示す．水圧は 1 時間ごとに 0.1MPa 上昇させ，0.45MPa に達してから 24 時間圧力を保持し，漏水がないことを確認した．

また，0.45MPa を維持しながらジャッキで角形エレメントを坑口止水装置に押し込み，角形エレメントを推進させた状態でも止水性能が確保されることを確認した．

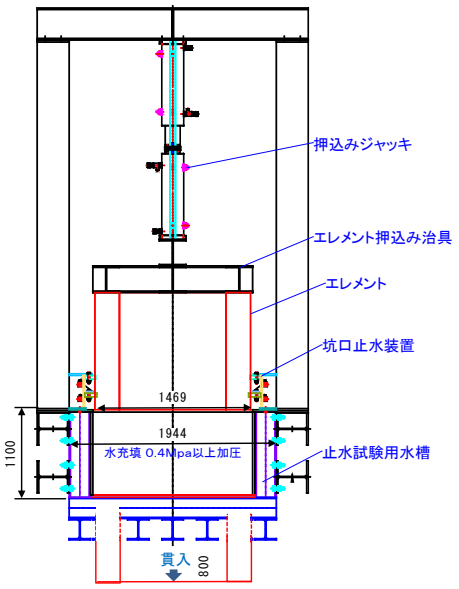


図-9 施工前試験概要図

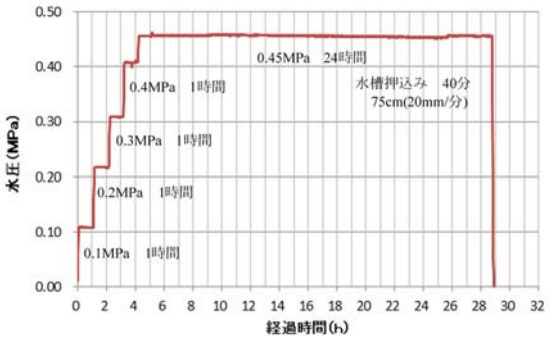


図-10 施工前試験結果（試験槽圧力）

4. 上半角形エレメント施工

(1) 施工計画

角形エレメントの本数は，全部で 42 本あるが，シールド掘削と並行して作業する必要があったため，施工を上部の 17 本（以下，上半とする），下部の 25 本（以下，下半とする）に分けた．3.の試験を経て，有効性が確認できた坑口止水装置（**図**-8）を用いて，上半の施工を行った。

(2) 施工結果

上半の角形エレメント推進の実績を以下に示す．推進機と後続エレメントの出来形の精度については，平均水平変位は±15mm，平均鉛直変位は±20mm 程度であり，標準偏差については 10mm 程度であった．推進精度は推進機，角形エレメントともに，概ね推進精度管理値内（±25mm）に収まった．基本的には，推進機の掘進精度が管理目標値を満足していれば，追随する角形エレメ

ントの位置も管理目標値内に収まることが確認された．

しかし，エレメント推進時において，主に、坑口の継手部から漏水が発生し，その漏水が起因となり，地表面沈下の進行を増大させた．これは，**図-11** にあるように「土留め SMW～地山」及び「土留め SMW～地盤改良体」との間に微細な空隙が生じ，沖積層中の砂層の水を，上総層中の砂層を通じて引き込み，エレメント継手回りを伝って坑口に漏水が発生（**図-12**）したものと想定された．

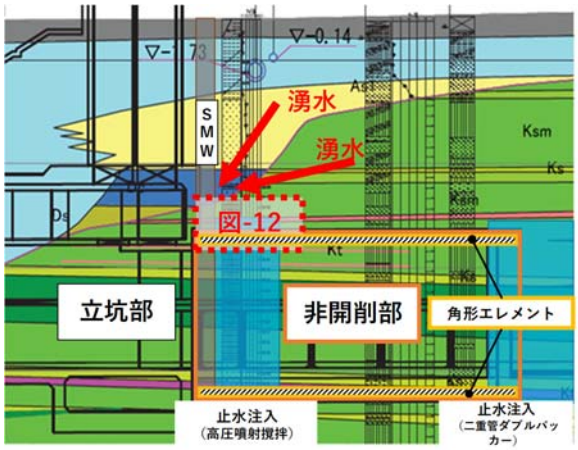
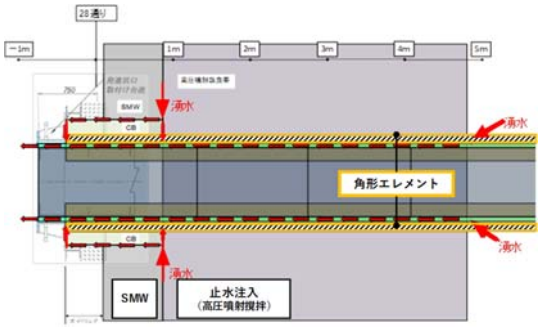
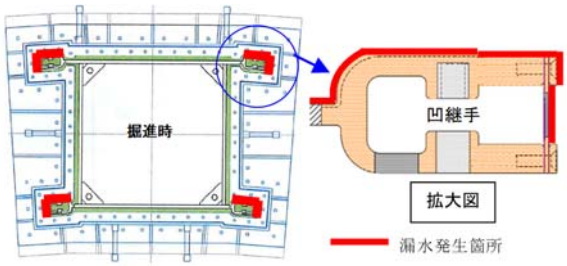


図-11　漏水発生概念図



(1) 側面図



(2) 正面図

図-12　漏水発生概念詳細図

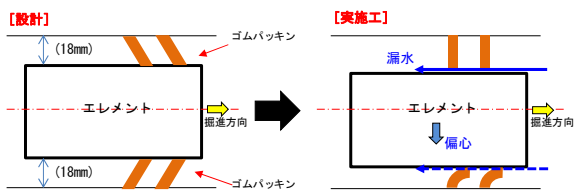


図-13　エレメント掘進による漏水概念詳細

(3)　課題

下半の施工では，上半時よりさらに高い水圧がかかることによる漏水リスクが増加することにより，地表面沈下を進行させる可能性があるため，より確実な止水対策を行う必要があった．

漏水発生原因として，ゴム板がエレメント継手の複雑な形状になじまなかったこと，エレメントの推進精度にゴム板が追従できなかったこと（**図-13**）が考えられた．

そこで，下半施工に向け，坑口止水装置の最適な構造や形状を決定するため，追加試験を実施した．

5.　下半角形エレメント施工に向けた追加試験

(1)　試験概要

追加試験では，継手部を対象とした試験装置を用いて，止水装置の要素試験を実施した．これは，漏水が坑口部の継手部に集中していることから，継手部を止水できれば実施工で確実な止水が可能と判断したためである．試験の流れは，以下のとおりである．

① 試験 1：止水性能確認試験（以下，止水試験とする．）として，上半部の実績（掘進精度）を踏まえて実施工に近い条件での止水性能の確認を行う．

② 試験 2：耐久性能確認試験（以下，耐久試験とする．）として，試験 1 の結果から，従前よりも止水性能が高いと判断した試験ケースにおいて，連続した継手試験体の挿入によるゴム板の耐久性の確認を行う。

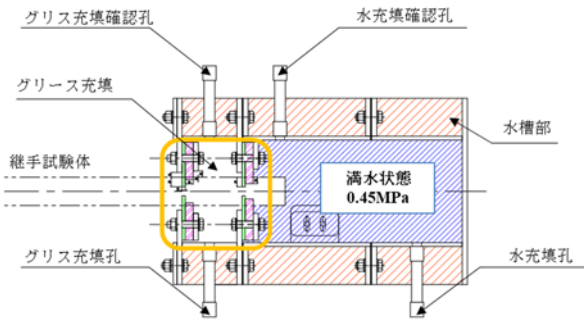
③ 試験 3：止水性能確認試験（以下，止水試験とする．）試験 2 で耐久性を確認した後，試験 1 と同様の止水試験を再度実施し，下半部施工に用いる最適な坑口止水装置の構造を決定する．

試験装置を**図-14**，**写真-2** に示す．装置は，より実施工に近い形とし，事前試験とは異なり挿入方法を横向きにした．

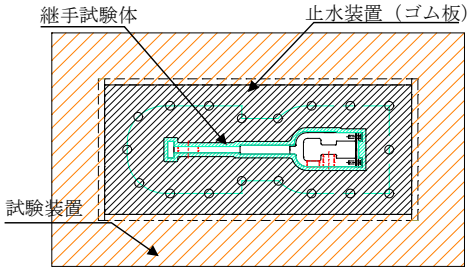
(2)　試験方法

a) 試験 1：止水試験

止水試験では，より実施工に近い条件を鑑み，一度に 0.45MPa の水圧を載荷した際の，坑口からの漏水量の管理基準値は，5L/min 以下（上半施工時のリチャージウェル実績値）とした．上半施工時の掘進精度（偏心・ローリング・斜め挿入）を考慮して，継手試験体には偏心を与え，ゴム板間にグリス圧，ゴム板の外側から水圧を与える．止水装置（ゴム板 2 段構造）に向けて，継手試験体を油圧ジャッキを用いて水平方向に挿入し，試験体受け台の高さ調整用のボルトの締め込みによって上下させることで試験体の偏心量や傾きを調整した．試験 3 の止



(1) 側面図



(2) 正面図

図-14 試験装置概要図

写真-2 試験装置全景

水試験も同様である．

b) 試験 2：耐久試験

試験装置は止水性能試験と同様のものを使用し，継手試験体は長さ 1.0m のものを 3 本を用いて，1m 挿入ごとに挿入後の試験体を取り外して、挿入前の試験体に追加することを繰り返して，非開削区間 34.5m 分の連続挿入を行った．試験終了時に，ゴム板に著しい損傷が生じた場合は試験終了とし，損傷が認められない場合は，再び止水性能試験を行い，実施工で推進到達までにゴム板の止水性が保たれるかの確認を行った．

(3) 試験ケース

本試験で検証したゴム板の試験ケース一覧を**表-3** に示す．

本試験ではまず，上半施工時に用いたゴム板（ケース 0）で，実際と同じ条件で漏水の発生状況を確認した．次に，複雑な継手形状への追従性や，推進時の偏心およびローリングに対する追従性という上半施工時の課題に対し，厚いゴム（以下，止水ゴム）に，薄いゴム（以下，補助ゴム）を重ねるケースを考案した．その理由は，止水ゴムには従来の水圧に耐えることを期待し，補助ゴムには継手の複雑な形状への追従を期待したものである．

補助ゴムの厚さを決定するため，事前に試験装置に試験体を挿入し，ゴムが密着していない隙間を測定した（**写真-3**）．その結果，隙間が最小となる補助ゴムの厚さは 5mm であった．止水ゴムについては，上半で実績のある硬度 60 度と柔らかい硬度 45 度を用意し，厚さとかかり，そして硬度をパラメーターとして，ケース 1～4 を比較検討した．

(4) 試験 1：止水試験結果

表-4 に試験結果一覧を示す．ケース 0（上半での再現）では，水圧が 0.3MPa を超えるとゴム板と継手の隙間の

表-4 試験ケース一覧

No.	配置			硬度 (°)	厚さ (mm)	かかり長 (mm)	配置図 1段目 / 2段目
ケース0	1段目	①	止水ゴム	60	35	8	
	2段目	①	止水ゴム	60	35	20	
ケース1	1段目	①	補助ゴム	45	5	30	
		②	止水ゴム	45	15	10	
	2段目			1段目と同じ			
ケース2	1段目	①	補助ゴム	45	5	30	
		②	止水ゴム	45	20	10	
	2段目			1段目と同じ			
ケース3	1段目	①	補助ゴム	45	5	30	
		②	止水ゴム	45	20	20	
	2段目			1段目と同じ			
ケース4	1段目	①	補助ゴム	45	5	30	
		②	止水ゴム	60	25	8	
	2段目	①	補助ゴム	45	5	30	
		②	止水ゴム	60	25	20	

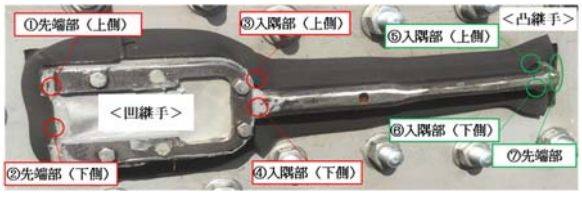


写真-3 隙間確認状況

表-4　止水試験結果

	水圧	漏水量	判定
ケース0	0.45MPa（隙間をウエスで抑え、グリス追加充填）	7.5L/min	×
ケース1	0.2MPaで補助ゴムのめくれ発生	—	×
ケース2	0.23MPaで補助ゴムのめくれ発生	—	×
ケース3	0.3MPaで補助ゴムのめくれ発生	—	×
ケース4	0.45MPa（補助ゴムの膨れ発生）	6L/min	×

大きい凹継手入隅部から漏水が生じた．グリスの追加充填や隙間を抑えることで 0.45MPa まで水圧をかけることができたが，7.5L/min 程度の漏水が生じ，3.（2）施工前試験時のような止水効果の確認ができなかった．前回の試験では，水圧を 0.1MPa ずつ載荷したのに対し，今回は一度に 0.45MPa を載荷して，より実施工に近い状況とした．この結果から，このゴム板構造（ケース 0）では止水性能の保持は困難と判断した．

ケース 2，3 を比較すると，止水ゴムのかかりを 10mm から 20mm とすると止水性能が低下した．これは，かかりを長くしても試験体とゴム板の隙間が埋まらず，むしろわずかに大きくなっていることによるものと考えられる．したがって，止水ゴムのかかりを 10mm から 20mm と長くしても補助ゴムを抑える力は変わらないと考えられる．

一方，ケース 1，3 を比較すると，止水ゴムの厚さを 20mm から 15mm とすると止水性能が低下した．これは，補助ゴムのめくれを抑える力が弱まり，ゴム板と試験体の隙間が拡大したことによるものと考えられる．

目標水圧 0.45MPa まで加圧ができたのは，ケース 4 の硬度 60 度を用いたケースだけであった．ただし，漏水量は管理基準値以内に収まらなかった．また，補助ゴムを抑える役割は，硬いゴム板の方が有効であることが伺えた．

⑸　課題

試験では，ケース 1～4 のいずれのケースにおいても，止水ゴムと補助ゴムの隙間に水が入り込み，補助ゴムがふくれる現象が発生した（**写真-4**）．ケース 1～3 では，この現象が増大し最終的に補助ゴムが完全にめくれた．その結果，隙間が拡大し多量の漏水が発生し，水圧を上げることが不可能となった．この補助ゴムのめくれは，**図-15** のように，止水ゴムと試験体とのわずかな隙間から水が浸入したために生じたものと考えられる．

また，試験後に止水ゴム，補助ゴムの状態を確認したところ，補助ゴムの一部に切れが生じた（**写真-5**）．

写真-4　補助ゴムの膨れ，めくれ状況

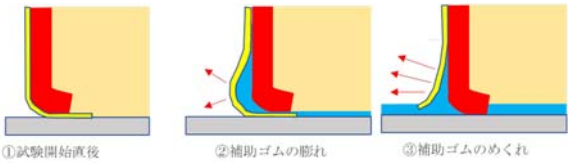
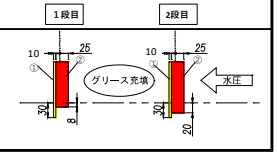


図-15　補助ゴムの膨れ，めくれ概要図

写真-5　補助ゴムの切れ状況

表-5　追加試験ケース（ケース 5）

No.	配置			硬度（°）	厚さ（mm）	かかり長（mm）	配置図
ケース5	1段目	①	補助ゴム	65	10	30	
		②	止水ゴム	60	25	8	
	2段目	①	補助ゴム	65	10	30	
		②	止水ゴム	60	25	20	

⑹　対策

ゴム板の止水性能や耐久性について，上記の課題が見つかったことから，下記の 3 点を実施したケース 5 を適用した（**表-5**）．

① ゴム板のめくれを防止するため止水ゴムと補助ゴムを接着させた．

② 補助ゴムの損傷があったことから，ゴム板の耐久性向上のため，補助ゴムの硬度を 65 度とし，厚さを 10mm とした．

③ 試験体とゴムの隙間を少なくするため，試験体挿入時にゴム板の端部が試験体端部となるようにゴム板端部の加工を変更した（**図-16**）．

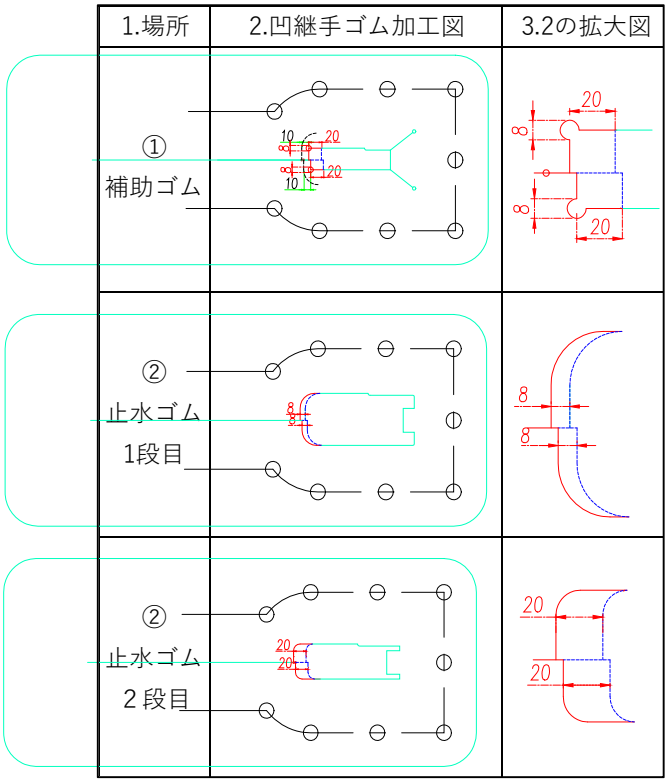


図-16　ゴムの追加加工

(1)補助ゴム

(2)止水ゴム

写真-6　耐久性能試験後のゴム状態

表-6　ケース 5 止水試験結果

	水圧	漏水量	判定	備考
ケース5	0.45MPa 60分後	0.02L/min	○	管理基準：5L/min

(6)　試験 2：耐久試験結果

ケース 5 については，接着の有効性を確認するため，止水性能試験の後に，耐久性試験を実施した．止水性試験では，水圧 0.45MPa 以上で，漏水量 5L/min 以下の管理基準値を満たしたことを確認した．その後，耐久性能試験を実施し，ゴム板の状態（**写真-6**）を確認した．複数個所に擦れが確認できるが，明確な損傷は見られなかったため，再度止水性能試験を実施することとした．

(7)　試験 3：止水試験結果

ケース 5 における止水試験結果を**表-6** に示す．他ケースで漏水が発生した凹継手の入隅部からは，上下ともに漏水・グリスの漏出はほとんど見られなかった．ケース 5 では，耐久試験後においても止水性能を十分満足する結果であった．

本試験の結果，坑口止水装置の構造を以下のように変更した．

① 止水ゴムを 1 枚から止水ゴム 1 枚と補助ゴム 1 枚との 2 枚組へ構造の変更
② 補助ゴムの耐久性向上のため，補助ゴムの硬度を 65 度とし，厚さを 10mm とした．
③ ゴム板の加工形状を試験体挿入時にゴム板の端部が試験体端部となるように変更

6.　まとめ

本試験の結果，ケース 5 の角形エレメント坑口止水装置構造は，0.45MPa 以上の高水圧下において，止水性能・耐久性能ともに目標とする管理値を満足することがわかった．

今後は下半の施工において，坑口の漏水状況を確認するとともに，これまでと同様に角形エレメントの掘進精度を確保し，計画通りの完成を目指す．

そして，当該工事の実績を踏まえた，坑口部の止水対策及び推進時における各種精度向上策等により，角形エレメント推進工法の長大化を図り，本工法の適用範囲の拡大を進めていく．

参考文献

1)　江戸清・半田卓・斉藤道真：角形鋼管推進工法で大口径下水管を貫く，つくばエクスプレス六町駅，トンネルと地下，vol34，No11，pp.23-30，2003.11

2)　藤川博樹・長谷川利晴・大野友和・田中孝：駅非開削部の大断面馬蹄形トンネルを角形エレメント推進工法により施工，相鉄・東急直通線　綱島トンネル，トンネルと地下，vol50，No7，pp.47-55，2019.7

(2020. 8. 7 受付)

WATER STOP FOR LARGE HORSSHOE-SHAPED TUNNEL IN STATION BUILT WITH RECTANGULAR ELEMENTJACKING

Yuta CHANOKI,Hiroki FUJIKAWA, Kazuhide TATEISHI and Hirofumi TANAKA

Shin Tsunashima Station (tentative name) is located at the 7k800m from staring point of the Sotetsu-Tokyu Through Railway Hazawa Station (tentative name),and is a four story underground railway station that contains an island-type platform with a width of approximately 14-25m at depth of about 35 meters.Both ends of station are planned to be used as the staring and arrival shaft for the shield TBMs. Of the 240m total length of the station, a trenchless tunneling was selected for the 34.5m section along tha Hiyoshi side. Also,the trenchless section requires a large cross section that carries a 224m^2 inner space (H=14m,B=19m) in order to install the platform.The geological condition of the site consists of hard Kazusa Formation with an N value over 50, but it has alterating of strata with sand and mudstone,and distribution of sand which contains abundand groundwater is unclear. Based on the fact that the above-ground site is built-up with robrust buildings such as hospitals and commercial buildings,restrictions on the use of the avobeground site and the geological conditions,rectangular element jacking method as the trenchless technique that doesn't require the installation of an arrival shaft was adopted. In this document, we report the measures for securing the waterproofing to minimize the influence of the ground surface.