

鋼製セグメントとSRC構造を異種接合した 地下構造物の設計と施工

THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF UNDERGROUND STRUCTURE COMBINED WITH STEEL SEGMENT AND SRC STRUCTURE

門石 崇^{1*}・佐藤 賢一郎²・上野 修彦²・日高 直俊³

The project for continuous underpass and quadruple track were carried out simultaneously in about 2.2km of the distances between Yoyogi-uehara Station and Umegaoaka Station. In the Shimo-Kitazawa station, the structural form is Two line two layer type that uses the shield tunneling with cut-and-open method. This construction process, taking into account the conditions and narrow roads, steel segments is adopted as part of a slab and side walls of the box culvert. In this thesis, the concept of the design of hybrid structure and joint area, the result of the model experiment with joint area, and the result of the construction is described.

Key Words : steel segment, joint area, hybrid structure, fast construction

1. はじめに

小田急電鉄では，輸送需要に対応するため列車を増発し，朝のラッシュピーク時には，およそ2分に1本の割合で列車を運行しており，従来の複線設備では輸送力に限界があることから，快適な輸送サービスを実現するための抜本的な輸送改善策として，東北沢～和泉多摩川間

の複々線化事業（10.4km）を進めている。

複々線化事業は，連続立体交差事業に合わせて順次進めており，現在，世田谷代田駅～和泉多摩川駅間（8.8 km）で複々線化による運転を行っている．これにより，朝のラッシュ時間帯の列車だけでなく，日中の各駅停車についても通過待ちが解消され，所要時間の短縮が図られた．

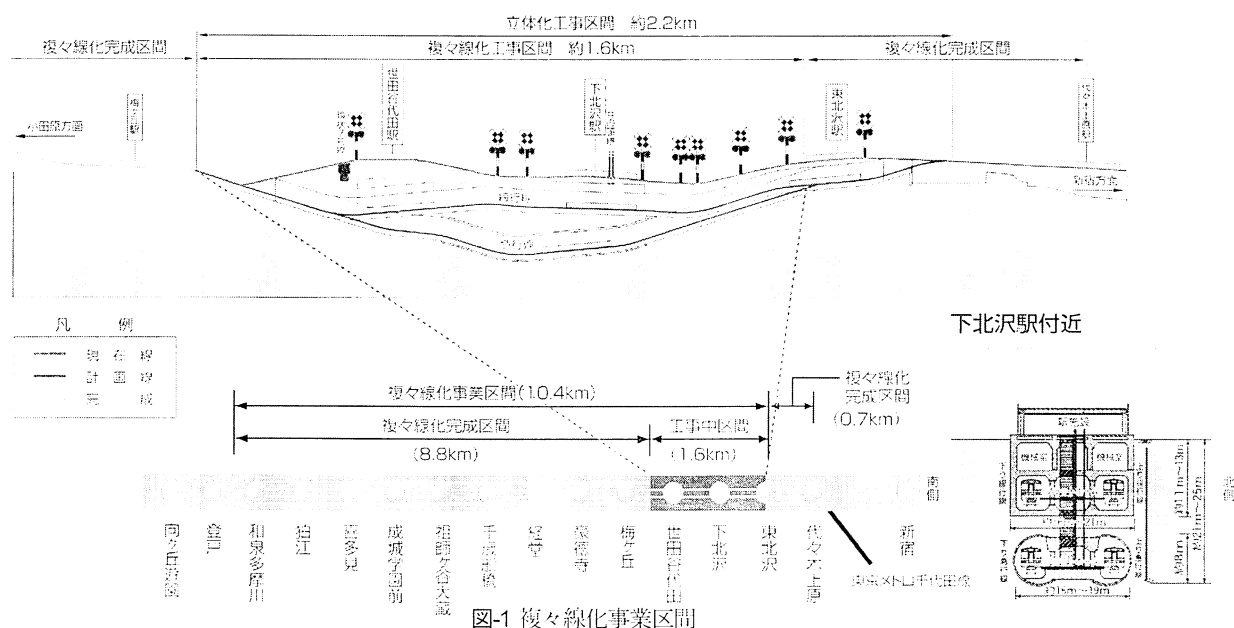


図-1 複々線化事業区間

キーワード：鋼製セグメント，鋼殻，接合構造，混合構造，高速施工

¹ 非会員 小田急電鉄株式会社複々線建設部 (〒160-8309 東京都新宿区西新宿1丁目8-3)，

E-mail: takashi.kadoishi@odakyu.dentetsu.co.jp

² 非会員 小田急電鉄株式会社複々線建設部 下北沢工事事務所 (〒155-0033 東京都世田谷区代田2丁目31-27)，

³ 正会員 大成建設株式会社東京支店 小田急下北沢作業所 (〒155-0031 東京都世田谷区北沢2丁目21-22)

残された東北沢～世田谷代田間（1.6km）の下北沢地区は、小田急線の最混雑区間で1日の平均輸送人員は約195万人、混雑率も187%と依然高い水準となっており、この地区の完成により朝のラッシュ時間帯にさらなる列車の増発が可能となり、抜本的な混雑緩和が図られる。

（図-1参照）

下北沢地区の主な構造形式は、開削工法による4線並列トンネルであるが、下北沢駅付近の一部では開削工法とシールド工法を用いた2線2層式トンネルとなる。

図-2に示すとおり下北沢駅部では、施工効率の向上および周辺住宅地への環境負荷低減を図るため、B2F側壁およびB2F中床版の一部にプレキャスト部材である鋼製セグメント（以下、鋼殻）による合理化構造を採用した。

その他の部分については、RCもしくはSRC構造を採用しており、全体の構造形式としては異種構造を接合した複合構造（混合構造）となっている。

鋼殻同士の接合や、鋼殻とSRC構造との接合部では、それぞれの制約条件に応じた接合形式を採用しており、その性能確認を縮小模型実験を行うことにより確認している。

また、実施工では、逆巻きスラブ下の超低空頭条件での重量物据付作業に対して、ハンドリングマシンによる高い施工性および安全性を実証することができた。

本稿ではこれら鋼殻および異種構造接合部の構造概要・設計手法・模型実験結果・施工について報告する。（関連特許9件出願中）

2. 構造概要

本工事で採用した鋼殻による構造には以下の特徴がある（図-2参照）。

- ・ ボルト締結により構造が成立するため、コンクリート構造で必要となる養生期間が不要となる。
- ・ ボルトに軸力を導入することにより主桁と同様の継手剛性を確保する。それによりイモ継ぎが可能となり、底部と側部の分割施工を可能とする。
- ・ 中央部に鋼梁H700を配置し、底部鋼殻が4段土留支保工としての機能を有する。
- ・ 鋼梁H700を本設利用したSRC構造を採用し、鉄筋量削減、支保工設置撤去ステップの省略を可能とする。
- ・ 止水構造は、外防水とセグメントに貼り付けた水膨潤シール材による2重構造とする。
- ・ 鋼殻が露出する箇所（側壁部）に関しては、重防食塗装を施し、耐久性を確保する。

また、各部位における鋼殻の接合方法についての特徴を表-1に示す。このうち、側壁接合部および中床版接合部の設計手法と模型実験結果による妥当性確認について次章以降に示す。

表-1 鋼殻の接合方法

部位	接合対象	接合形式
側壁接合部	鋼殻-RC	ずれ止め方式
鋼殻継手部	鋼殻-鋼殻	引張接合方式
中床版接合部	鋼殻-SRC	埋込み方式

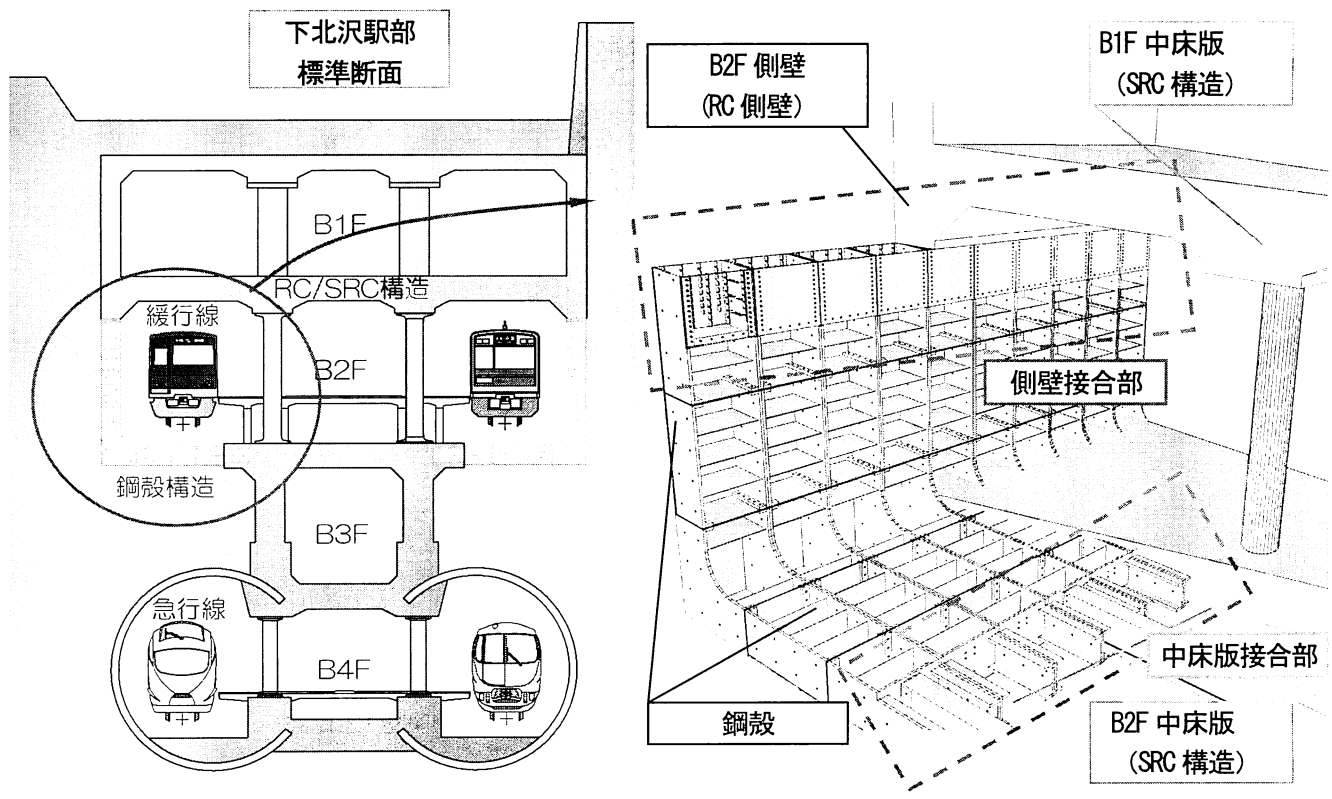


図-2 下北沢駅部構造概要

3. RC側壁-鋼殻接合部の構造

(1) 構造概要

RC側壁から鋼殻へと部材が変化する接合部は、逆巻き中床版構築後に鋼殻を設置する際の空頭制限に対応するため、設置後に内部RC構造を構築可能な接合構造を採用するものとし、孔あき鋼板ジベル（以下、PBL）を用いたずれ止め方式の接合構造とした。

図-3に示すように、RC側壁-鋼殻接合部は、主桁にPBLを取付けた鋼殻内にRC側壁の主鉄筋を配置した構造である。図-5に示すように、PBLを介してRC側壁から鋼殻へと曲げモーメント・軸力・せん断力を伝達する。

この接合構造に対する設計の妥当性を確認するため、縮小模型実験を実施し、設計上必要な接合部の部材耐力および曲げ剛性が確保されることを確認する。

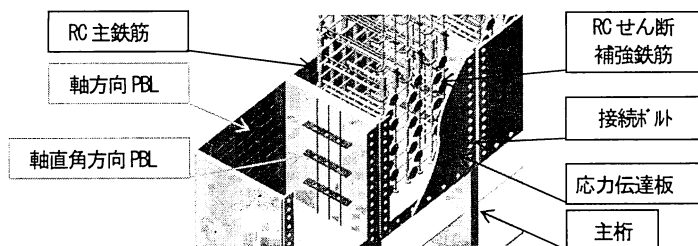


图-3 接合部構造概要

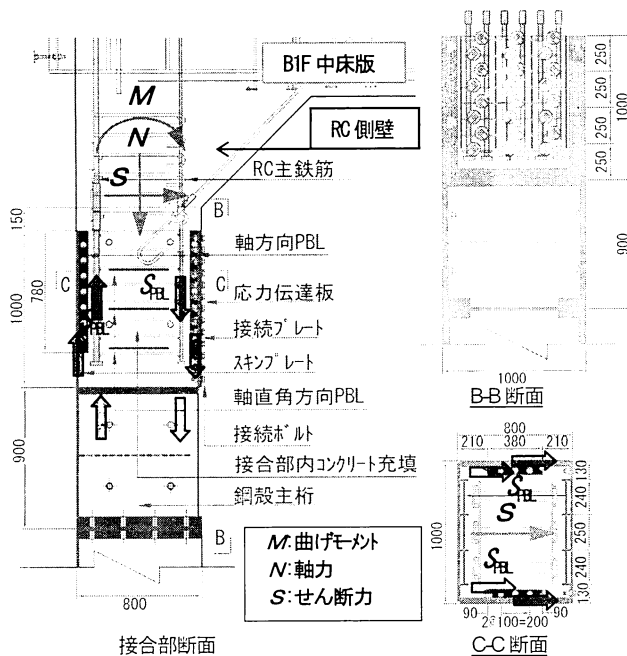


図4 接合構造詳細図

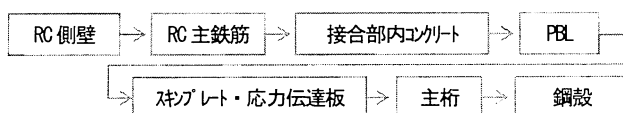


図-5 応力伝達概念

(2) RC側壁—鋼殻接合部（ずれ止め方式）の設計手法

設計では、ＲＣ側壁-鋼殻接合部を一体構造として評価する。鋼殻に取付けられたＰＢＬに生じるせん断力（図４ S_{PBL} 参照）に対して、せん断耐力照査を行い、照査が満足されれば、ＰＢＬを介してＲＣ側壁から鋼殻へ確実に応力が伝達される一体構造として評価できるものとする。

接合部は、RC側壁と鋼殻の遷移区間であることから、合成構造として評価せず、RC側壁・鋼殻が各々単独で作用外力に抵抗する構造として評価する。

(3) RC側壁-鋼殻接合部（ずれ止め方式）の実験

(2)で示したRC側壁-鋼殻接合部の設計手法の妥当性を確認するため、以下の項目を目的として実験を行った。

- ① 部材耐力の確認：設計における接合部部材耐力が確保されていることを確認する。
- ② 曲げ剛性の確認：設計における接合部の曲げ剛性が確保されていることを確認する。

a) 接合部実験概要

図-6に、本実験で用いる供試体概要図を示す。供試体寸法は実スケールの2/3縮小スケールとし、ハンチ下端～鋼殻下端までの範囲を実験モデル範囲とした。実構造に対して180°回転させた配置で、RC部下端を固定部とし、鋼殻側に载荷を行った。表-2に使用材料を示す。

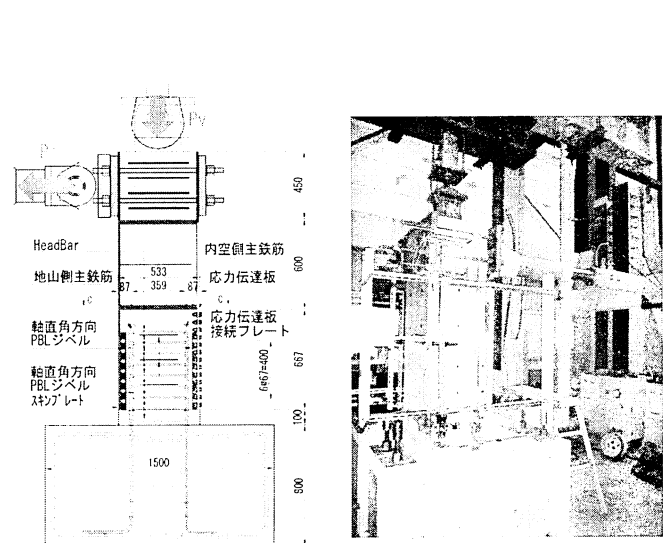


図-6 供試体概要

表-2 使用材料

材料	材料試験平均値 (N/mm ²)		
コンクリート ($f'_{ck}=40\text{N/mm}^2$)	圧縮強度	外引張時 内引張時	51.0 54.7
主鉄筋 (SD345)	降伏強度	外引張側主鉄筋 内引張側主鉄筋	397 389
鋼殻 (SM490)	降伏強度	主桁	351

b) 載荷ケース

表-3に示すとおり、載荷ケースは地山側が引張となる外引張状態と、内空側が引張となる内引張状態の2ケース（2供試体）とした。この両ケースとも長期・地震時の設計断面力に加えて、設計耐力相当荷重までを最終荷重とした。

表-3 載荷ケース

載荷荷重段階	CASE1 外引張		CASE2 内引張	
	水平荷重 P_H (kN)	鉛直荷重 P_V (kN)	水平荷重 P_H (kN)	鉛直荷重 P_V (kN)
1. 長期設計断面力相当	79	279	38	108
2. 長期設計耐力相当	218		92	
3. 長期設計耐力相当	229	393	86	112
4. 地震時設計耐力相当	264		107	

c) 実験結果

図-7に、外引張・内引張ケースの水平荷重-相対変位関係を示す。縦軸は荷重、横軸は供試体のフーチング上端を固定端とした相対変位である。実験供試体と同様の寸法・載荷重の梁モデルに対して、部材非線形性を考慮して算定した非線形梁モデルの荷重-変位関係も合わせて示す。

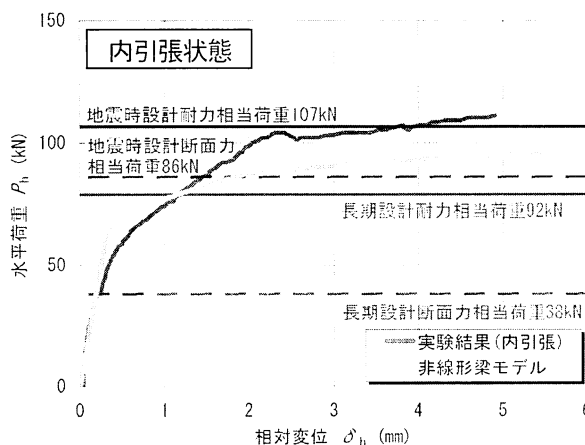
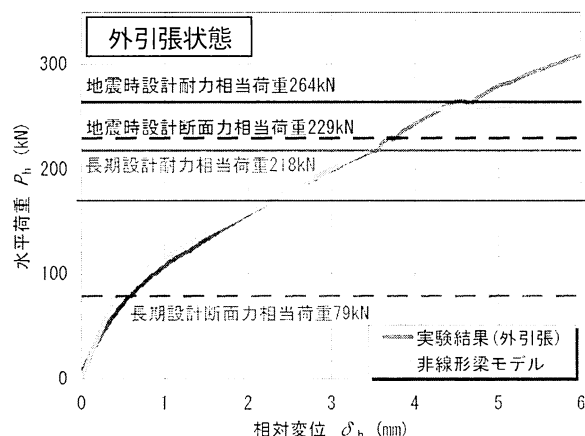


図-7 水平荷重-相対変位関係

d) まとめ

①部材耐力の確認結果

外引張状態・内引張状態ともに地震時設計耐力相当荷重（外引張状態：264 kN，内引張状態：107 kN）において、部材の破壊は確認されなかった。接合部は設計で想定した部材耐力を上回ることが確認された。

②曲げ剛性の確認結果

部材の曲げ剛性は、初期剛性を除き、外引張状態・内引張状態ともに、非線形梁モデルの曲げ剛性と同等以上となることから、変形の制限値には十分収まっており、設計上の必要剛性を確保することが確認された。

4. SRC中床版-鋼殻接合部の構造

(1) 構造概要

SRC中床から鋼殻へと部材が変化する接合部は、鋼殻設置後にSRC部の構築を行うことが可能なため、鋼殻主桁をSRC中床に埋込ませた埋込み主桁方式の接合構造とした。

図-8,9に示すように、SRC中床-鋼殻接合部は、せん断補強鉄筋で囲われた鋼殻の主桁をSRC中床に埋込ませた構造である。図-9に示すように、埋込み主桁を介してSRC中床から鋼殻へと曲げモーメント・軸力・せん断力を伝達する。

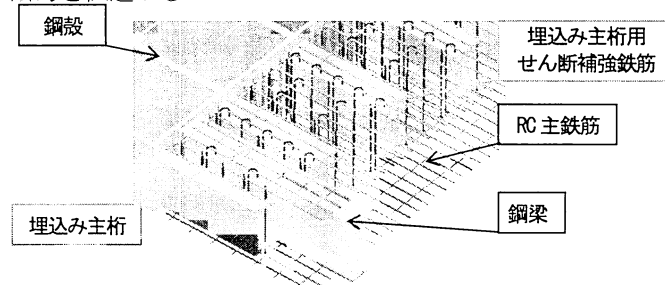


図-8 接合部構造概要

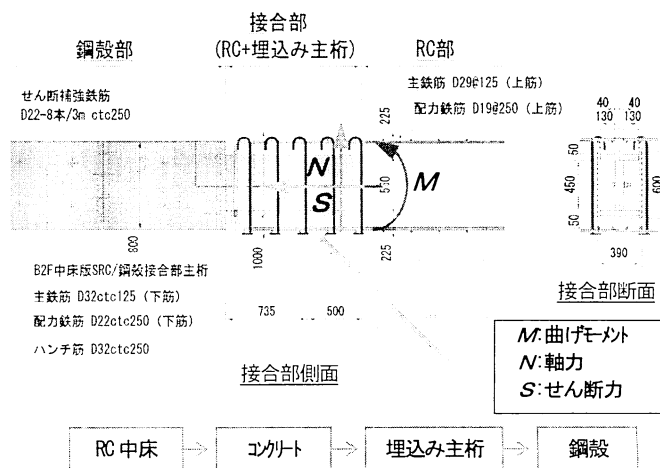


図-9 接合構造詳細図（上）と応力伝達概念（下）

(2) 接合部設計手法

設計では、SRC中床-鋼殻接合部を一体構造として評価する。図-10に示すように、埋込み主桁周りのコンクリートの支圧および押抜きせん断に対する照査を行い、照査が満足されれば、埋込み主桁を介してSRC中床から鋼殻へ確実に応力が伝達される一体構造として評価できる。

接合部は、SRC中床と鋼殻の遷移区間であることから、合成構造として評価せず、SRC中床・鋼殻が各々単独で作用外力に抵抗する構造として評価する。

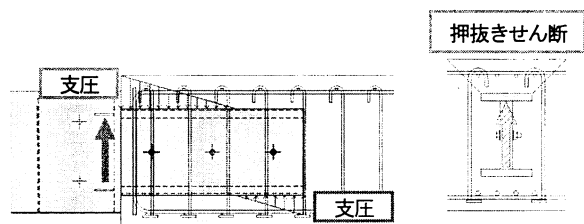


図-10 埋込み主桁照査概念図

(3) RC-鋼殻接合部実験

(2)で示したSRC中床-鋼殻接合部の設計手法の妥当性を確認するため、以下の項目を目的として実験を行った。

- ① 部材耐力の確認：設計における接合部部材耐力が確保されていることを確認する。
- ② 曲げ剛性の確認：設計における接合部の曲げ剛性が確保されていることを確認する。

a) 接合部実験概要

図-11に、本実験で用いる供試体概要図を示す。供試体寸法は、実スケールの2/3縮小スケールとした。実構造を90°回転させた配置で、RC部下端を固定部とし、鋼殻側に载荷を行った。表-4に使用材料を示す。

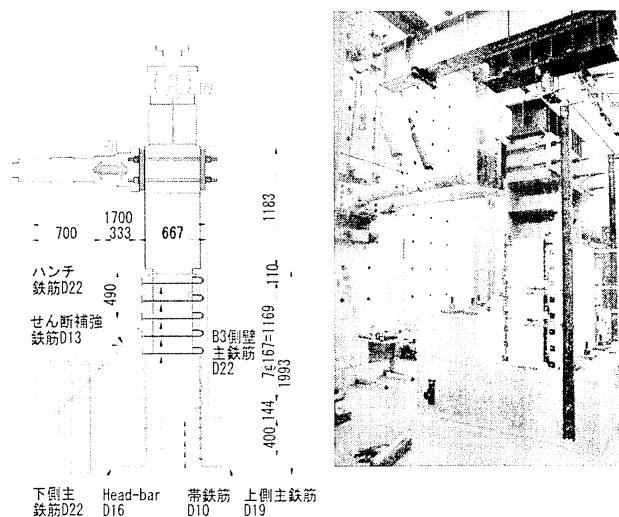


図-11 供試体概要

表-4 使用材料

材料	材料試験平均値 (N/mm ²)		
コンクリート ($f'_{ck}=40\text{N/mm}^2$)	圧縮強度	内・外引張時	46.4
主鉄筋 (SD345)	降伏強度	外引張側主鉄筋	404
		内引張側主鉄筋	370
鋼殻 (SM490)	降伏強度	主桁	350

b) 載荷ケース

表-5に示すとおり、内空側が引張となる内引張状態を経て、地山側が引張となる外引張状態となるよう1体の供試体に対して载荷を行った。それぞれの引張状態に対して長期設計耐力相当まで载荷し、外引張状態については地震時設計耐力相当を最終载荷荷重とした。

表-5 載荷ケース

載荷荷重段階		水平荷重 P_H (kN)	鉛直荷重 P_V (kN)
内引張	1. 長期設計断面力相当	381	462
	2. 長期設計耐力相当	566	
外引張	3. 長期設計断面力相当	-398	487
	4. 長期設計耐力相当	-527	
	5. 地震時設計耐力相当	-533	

c) 実験結果

図-12に、外引張・内引張ケースの水平荷重-相対変位関係を示す。縦軸は荷重、横軸は供試体のフーチング上端を固定端とした相対変位である。実験供試体と同様の寸法・载荷重の梁モデルに対して、部材非線形性を考慮して算定した非線形梁モデルの荷重-変位関係も合わせて示す。

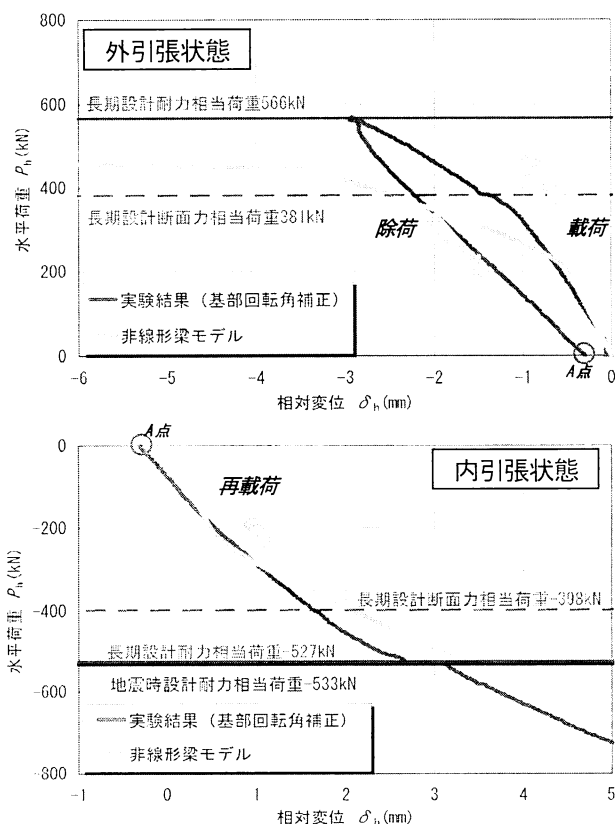


図-12 水平荷重-相対変位関係

d) まとめ

①部材耐力の確認結果

外引張状態・内引張状態ともに設計耐力相当荷重（外引張状態：566 kN，内引張状態：-398 kN）において、部材の破壊は確認されなかった。接合部は設計で想定した部材耐力を上回ることが確認された。

②曲げ剛性の確認結果

部材の曲げ剛性は、初期剛性を除き、外引張状態・内引張状態ともに、非線形梁モデルの曲げ剛性と同等以上となることから、変形の制限値には十分収まっており、設計上の必要剛性を確保することが確認された。

a) 底部鋼殻組立

フォークリフトで1ピースずつ運搬し、クローラークレーンにて所定の位置に据付け、ボルトの締結を行う（写真1、2）。壁側のコーナーピースから内側へ組み立て、中間部鋼梁（H700、3分割）にて施工誤差および製品の製作誤差を吸収する。

接続ボルトは1次締付後所定のトルクにて本締めを行い、必要な軸力を導入するとともにシーリング材を圧縮させる。予め基礎コンクリート内に定規材を埋込み、据付時の高さ調整作業を省略することにより、組立時間の短縮を図る。

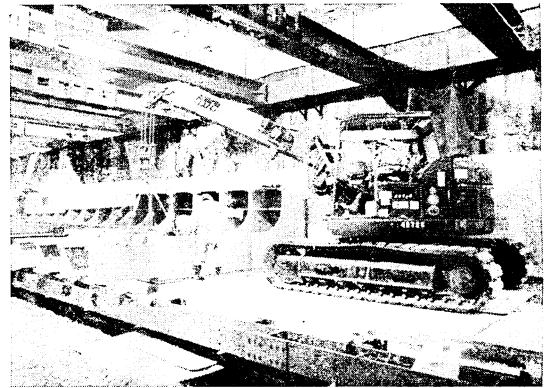


写真-1 底部 鋼殻組立

5. 鋼殻の施工

(1) 施工概要

図-13に示すように、B2F側壁およびB2F中床版の一部にプレキャスト部材である鋼製セグメント（以下、鋼殻）による構造を採用した。

B2Fの施工フローを図-14に示す。

特徴的な施工ステップである底部鋼殻組立、側部鋼殻組立、側壁接続工について詳細を述べるものとする。

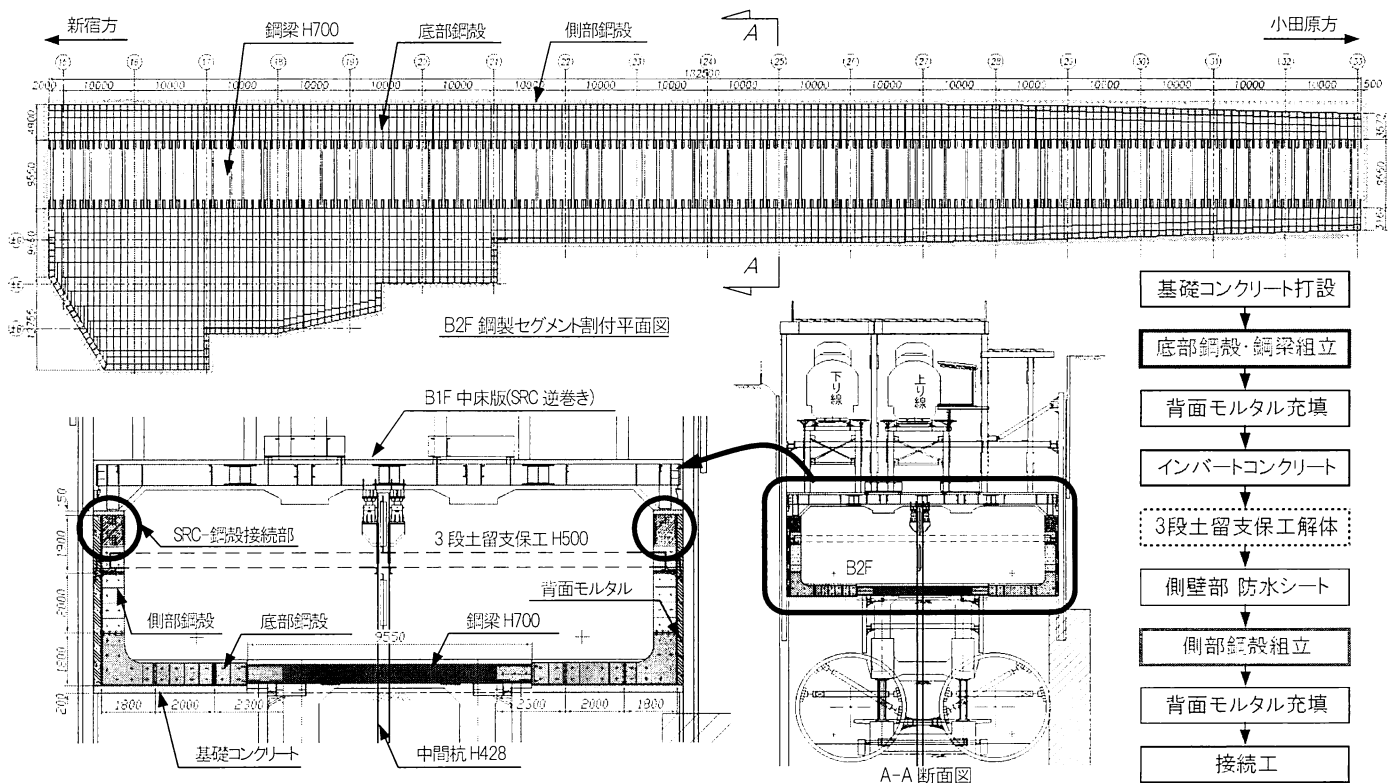


図-13 小田急下北沢駅（第3工区）躯体概要図

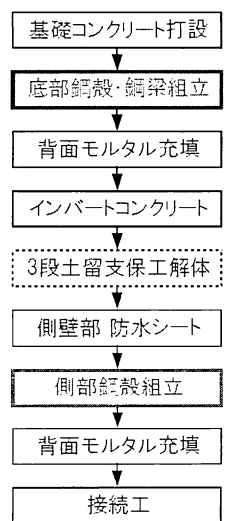


図-14 施工フロー

b) 側部鋼殻組立

把持能力2.2 tのハンドリングマシンにて、把持～据付までの作業を行い、高所作業車を使用して底部と同様にボルトの締結を行う（写真-4）。

鋼殻の縦リブに設けた上下2ヶ所ずつの孔に把持ピンを挿入し、縦リブ間に把持アームを押し広げる形で鋼殻を把持する（写真-3）。安全対策として、把持圧力センサーおよび表示灯の取付、操作スイッチの二重ロック機構を備えた。

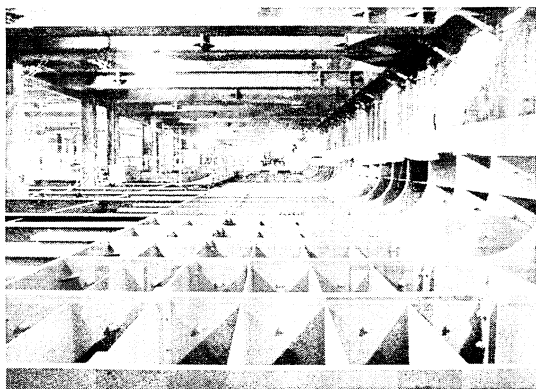


写真-2 底部 鋼殻組立完了

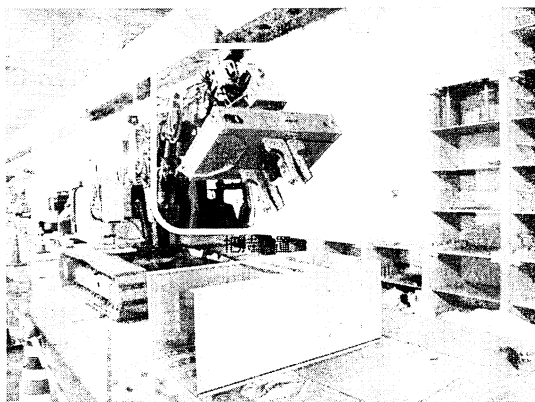


写真-3 把持装置

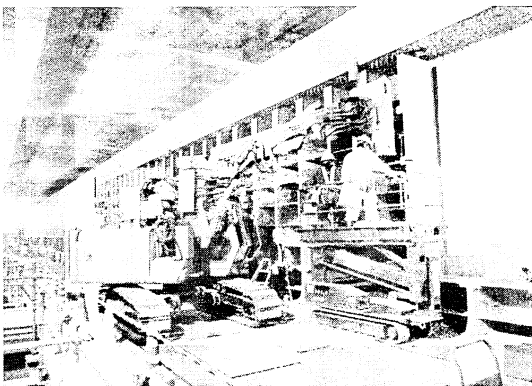


写真-4 側部 鋼殻組立

c) 側壁上部接続工

側部鋼殻上部の鋼殻内部に、逆巻き中床版下面に配置した機械式継手を用いて鉄筋を組み立て（写真-5）、応力伝達板にて表面を塞ぎ（写真-6）、BIF中床版に設けた打設用スリーブより高流動コンクリートを打設し一体化を図る。

構築完了時の全景を写真-7に示す。

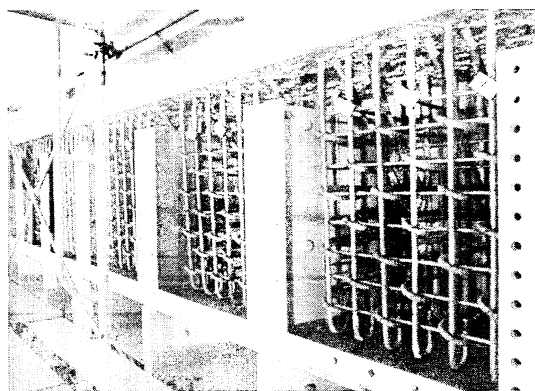


写真-5 接続部 鉄筋組立

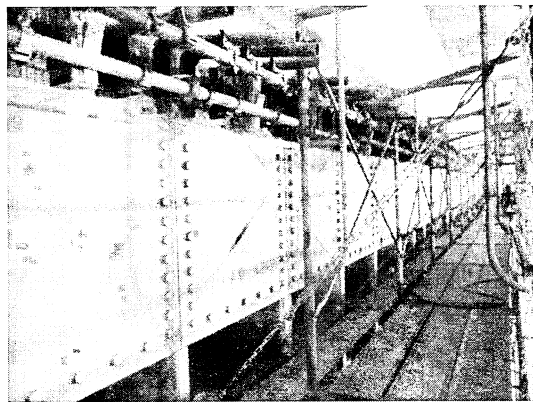


写真-6 応力伝達板設置・高流動コン打設状況

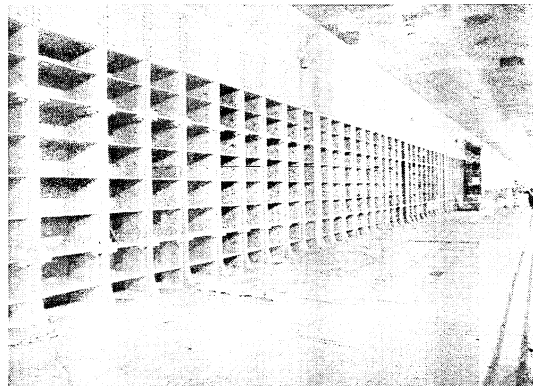


写真-7 構築完了

表-6 施工体制・施工数量

区分	施工体制		施工数量	全数量	備考
底部	投入	昼1班	24～45(P/日) 鋼梁含む	鋼殻: 1,527ピース 2,517 ton 鋼梁: 249ピース 206 ton	背面・目地モルタル打設、鋼梁の位置調整・本締は別班にて施工
	組立	昼2班			
側部	投入	昼1班	30～35(P/日)	鋼殻: 800ピース 1,334 ton	投入・組立 2日 検査・棲枠 1日 背面モルタル 1日
	組立	昼2班			

H22.10	H22.11	H22.12	H23.1	H23.2	H23.3	H23.4	H23.5
10/29	定規材設置・基礎コン打設(3.0ヶ月)			2/1			
	11/30	底盤セグメント・鋼梁組立(3.0ヶ月)			3/2		
		12/15	インハートコンクリート打設(3.0ヶ月)			3/14	
				2/7	側壁セグメント組立(2.0ヶ月)		4/22
				2/11	B1F中床版接続工(2.0ヶ月)		5/初
10/29	B2F構築工(6.0ヶ月)						5/初

図-15 躯体構築実績

(2) 施工実績

表-6に施工体制および施工数量を、図-15に躯体構築実績工程を示す。

今回、側壁の組立にハンドリングマシンを採用したが、把持・建起し・位置合せ・据付までオペレーター操作のみで取扱可能であり、超低空頭下での重量物据付作業において高い施工性および安全性を実証することができた。

B2F構築工は約6か月で完了し、RC構造と比較して約2ヶ月の工期短縮を達成することができた。

6. まとめ

当工事で採用した鋼殻によるプレキャスト構造は、従来のRC構造と比較して、生コン搬入・打設時間および養生期間の制約を受けず、また、構造および施工が非常にシンプルであり、品質管理も比較的容易であることから、工期短縮が可能な工法である。本施工結果を基に更なる検討を重ねることによって、都市部における地下構造物の設計・施工技術の向上に貢献できるものとする。