

超遅延コンクリート使用によるアンダーピニングの施工 Underpinning Using Super-Set-Retarded Concrete

那須 寛*
Hiroshi Nasu

名久井 裕*
Hiroshi Nakui

渡辺 綱禎*
Tsunayoshi Watanabe

高橋 秀樹**
Hideki Takahashi

富田 正浩***
Masahiro Tomita

坂本 隆一郎***
Ryuichiro Sakamoto

要 約

本工事はJR営業線直下における開削トンネル工事であり、その営業線部は貨物線が橋梁にてオーバーパスする形で立体交差している。この橋梁をアンダーピニング工法により支持した。その方法は添はり方式としているが、仮支持杭の代わりに先行構築した両側のボックスカルバートを支持構造物としていることに大きな特徴がある。施工時には剛性の高い本体構造物を支持構造物とすることで横締め時のプレストレスの損失が懸念された。対策はボックスカルバートと添はりとの接合部に超遅延剤を使用したコンクリートを採用することで有効なプレストレスを得ることとした。本工法の採用により、本体構造物の支持による安全性の向上、仮支持杭を省略することによるコストダウン等が図れた。本報告では、本工事の概要、施工管理、計測管理等について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 地質概要
- § 4. 施工概要
- § 5. アンダーピニング工法の計画と管理
- § 6. 計測管理
- § 7. おわりに

削工法により函体およびU型擁壁を構築するものである。営業線近接工事であることから、全線にわたり作業ヤードが確保できないため、踏切り部を出入口とする全面覆工方式にて施工した。

また、工区内には東北本線貨物線と立体交差する箇所があり、貨物線の既設橋台・橋脚を添はり方式のアンダーピニング工法で施工した。この工法に超遅延剤を用いたコンクリートを使用した。

§ 2. 工事概要

- (1)工 事 名 仙石地下苦竹工区1～4
- (2)企 業 先 事業主体 仙台市
発 注 先 東日本旅客鉄道株式会社 東北工事事務所
- (3)工事場所 宮城県仙台市宮城野区苦竹地区（JR東日本仙石線、陸原・苦竹間）
- (4)工 期 平成7年11月7日～平成10年2月25日
- (5)主要工事内容
 - ・仮土留工（柱列式地下連続壁） 延長700 m
 - ・U型擁壁延長 延長250 m
 - ・函体（ボックスカルバート） 延長125 m

§ 1. はじめに

本工事は仙台市が事業主体となる仙台駅東部地区の連続立体交差事業の一貫で、JR仙石線のうち仙台駅～苦竹間の約3.9kmを地下化するものである。当社は陸前原ノ町駅～地下化終点までの区間（延長375m）を担当した。

工事内容は柱列式地下連続壁工法を仮土留工とした開

*東北（支）仙石線（作）

**技術研究所地質研究課

***土木設計部設計課

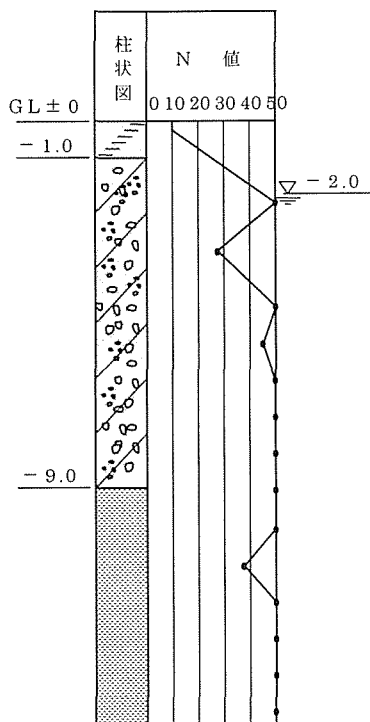
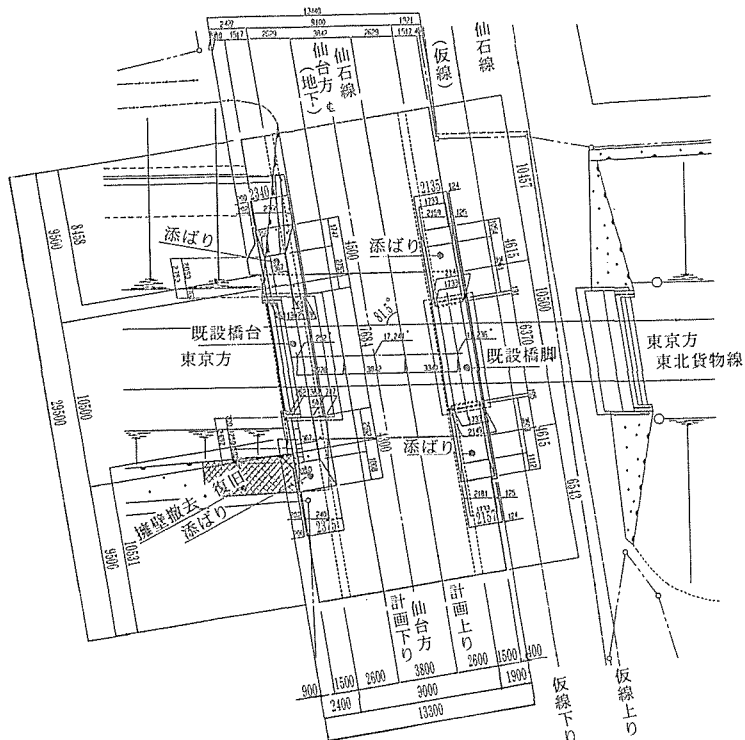
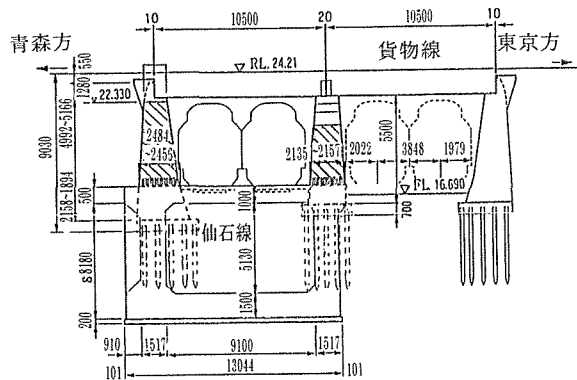


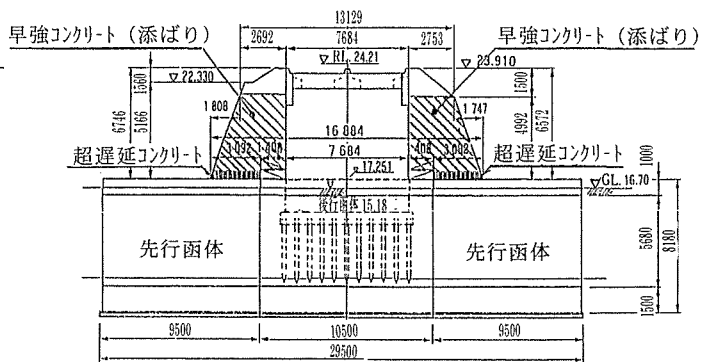
図-1 土質柱状図



平面図



側面図



正面図

図-2 貨物線路橋工事概要

・添はり工（アンダーピニング）1式

§ 3. 地質概要

図-1に工事地点の土質柱状図を示す。この付近は、宮城野原平野に位置し、広瀬川、梅田川、七北田川沿いに形成された標高2～15m程度の緩傾斜した平坦地を主としている。ボーリング調査によれば、表層部（～GL-1.0m）は、N値2～20の緩い砂質土であり、下層は、N値

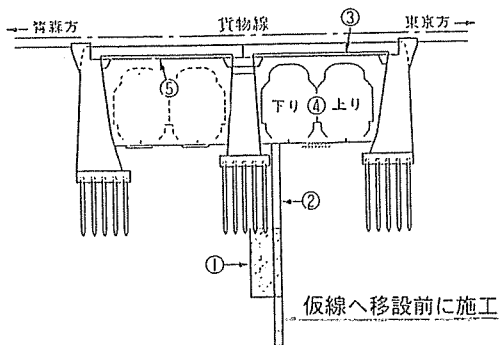
50以上の礫質土（～GL-9.0m）および風化砂岩（GL-9.0m～）で構成されている。また、地下水位も高い（GL-2.0m）。

§ 4. 施工概要

4-1 施工法

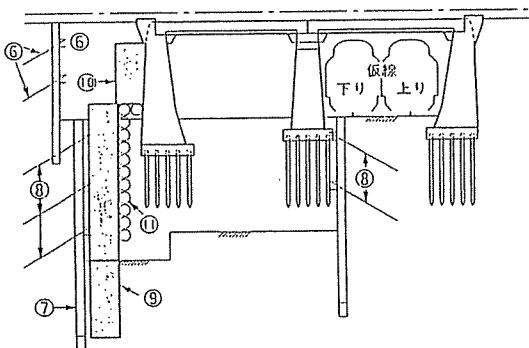
一般に営業線直下の工事では、軌道を工事桁によって仮受けする方法と軌道部の橋梁をアンダーピニングする

(1)



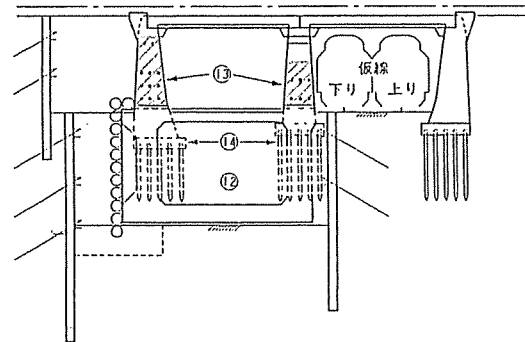
- ①橋脚基礎防護のための薬液注入工（先行函体部）
- ②橋脚側の仮土留工（柱列式地下連続壁）
- ③橋脚変位抑制のための仮線側上部ストラット補強工
- ④仙石線の仮線側への切替え工
- ⑤本線側上部ストラット補強工

(2)



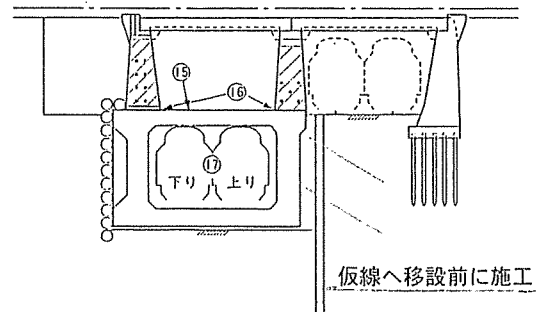
- ⑥橋台背面の盛土部の仮土留工（グランドアンカー工、タイロッド工）
- ⑦橋台側仮土留工（柱列式地下連続壁）（先行函体部）
- ⑧先行函体部の掘削工（グランドアンカー工、タイロッド工）
- ⑨止水および緩み防止のための橋台背面部への薬液注入工
- ⑩橋台防護のための橋台背面部への薬液注入工
- ⑪貨物線直下部施工のための土留工となるサドパイプ工（φ812.8, φ711.2, t=22 mm）

(3)



- ⑫先行函体の構築工
- ⑬橋台・橋脚側面の添ばり工（PC緊張により一体化させ橋台・橋脚の荷重を先行函体へ受替える）
- ⑭ワイヤーによる橋台・橋脚の下部工切断および撤去工

(4)



- ⑮アンダーピニング部直下の後行函体部の掘削（グランドアンカー工）、構築工
- ⑯埋戻し工
- ⑰仙石線の函体への切替え工

図-3 施工順序図

方法がある。本工事では、貨物線の間合い（通過間隔）が最大2時間程度であるため、線路内作業が主体となる工事術による仮受工法では時間的に非常に困難な作業となる。そこで、貨物線を支持する橋梁の両側の函体を先行構築し、これに添ばりを介して貨物線橋脚を受替えるアンダーピニング工法を採用することとした（図-2参照）。

4-2 施工順序

図-3に施工順序図を示す。

§5. アンダーピニング工法の計画と管理

5-1 超遅延コンクリートの採用

橋台・橋脚の側面に設ける添ばりは、先行して構築された函体に支持させる。また、添ばりは既設橋台・橋脚と一体化するためのPC緊張を行う。したがって、添ばりに普通コンクリートを使用した場合、プレストレスを導入すると、添ばりは前後の函体の拘束等の抵抗を受け、有効なプレストレスが得られない可能性が高くなる（図-4参照）。

そこで添ばりの上部（PC鋼線定着部）は早強コンクリートを使用し、早期に硬化させ、添ばり下部（函体頂版より50cm上まで）は、添ばりと函体が一体化しないように超遅延剤を用いたコンクリートを使用し強度発現を遅らせ、プレストレス導入後に硬化させることとした（図-5参照）。アンダーピニング工法概念図を図-6に示す。

5-2 超遅延コンクリートの配合

超遅延剤を混入したコンクリートの硬化遅延時間は、7日を目標とした。これまで、数時間単位でコンクリートの硬化開始時期の制御は可能であったが、今回のように、7日間という日単位での長期間制御は今までに例のない試みである。本工事では、事前に以下の検討を行った。

(1) 温度による影響の把握

超遅延剤を添加した添ばり下部のコンクリート（以下、接合部コンクリート）は添ばり上部から水和発熱の影響を受ける。そこで、FEM解析により温度影響解析を行った。

解析の結果、接合部コンクリートは、添ばり上部のコンクリートの水和熱により、27～42℃程度の温度上昇分を受けることが判明した。その後の試験においてはこの解析によって得られた温度上昇を考慮し、超遅延コンクリートの配合の検討を行った。

(2) 室内試験

超遅延剤の添加率と遅延効果の関係を把握するために、配合および基本的な物性（添加率、練り上がり温度、養生温度、再現性）に着目し、表-1に示す室内試験を行った。なお、接合部コンクリートの設計基準強度は30N/mm²を目標とした。具体的な配合を表-2に示す。試験の結果は図-7～8に示すとおりである。超遅延コンクリートの特性について得られた知見を以下に示す。

- ・養生温度が高くなると、硬化開始時期が遅くなる。
- ・硬化開始時期は、添加率1.0%で7日程度、1.5%で10日程度であり、目標遅延日数を満足する。
- ・添加率1.0%、1.5%であれば、設計基準強度を満足する。

(3) 現場試験

室内試験結果より、超遅延剤の添加率は1.0%から1.5%程度と判断された。添加率を、1.0%、1.5%、2.0%としたコンクリートを実施工で使用するプラントにより製造し、硬化状況を確認した。実施工において、超遅延コンクリートの硬化開始と圧縮強度発現性状の管理が重要となる。そこで、圧縮強度の管理方法は、標準養生供試体と試験体内部に熱電対を埋め込み内部温度に追従可能な温度管理装置を使用した供試体との圧縮強度を比較することにより行うこととした。試験体および温度管理

- 一体化によって、添ばりがボックスカルバートに拘束される
- 有効なプレストレスが得られない

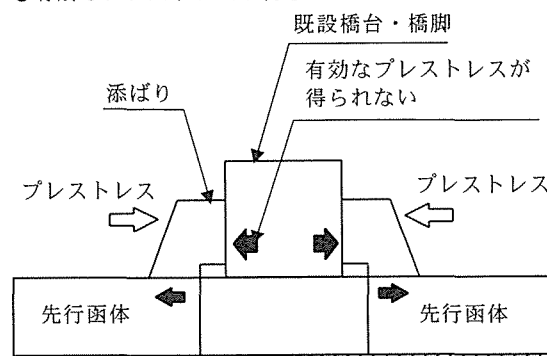


図-4 超遅延コンクリートを使用しない場合

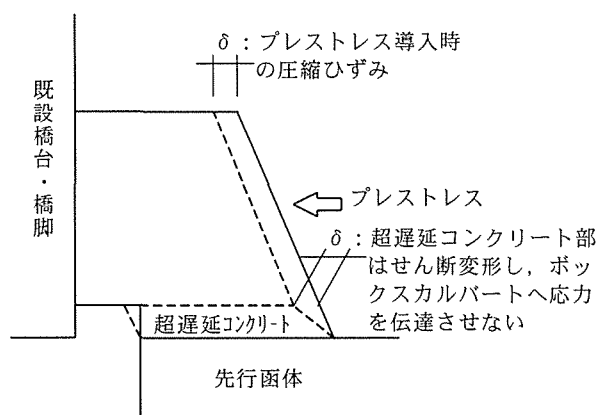


図-5 超遅延コンクリートを使用した場合

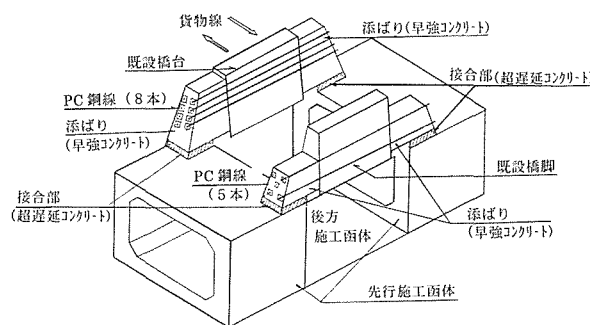


図-6 アンダーピニング工法概念図

養生装置図を図-9に示す。その内、上部1.0mを早強コンクリート、下部0.5mを超遅延コンクリートとした。試験結果は図-10に示すとおりであり、これより、超遅延の添加率を1.5%と決定した。

(4) 実施工

添ばりコンクリートの打込みは、超遅延コンクリートを打込んだ後、早強コンクリート（ $f'_{ck}=40\text{N/mm}^2$ ）を連続的に打設を行った。添ばりのプレストレストの導入は、

表-1 試験項目

超遅延剤の添加率	C× (1.0, 1.5, 2.0, 2.5) %
練上がり温度	20℃, 30℃
養生温度	20℃, 45℃, 65℃
再現性	練上がり, 養生温度=20℃ 添加率 1.0%

表-2 配合

W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (C×%)	
		W	C	S	G	AE 減水剤	超遅延剤
47.1	40.1	159	338	694	1058	C×0.3%	C×%

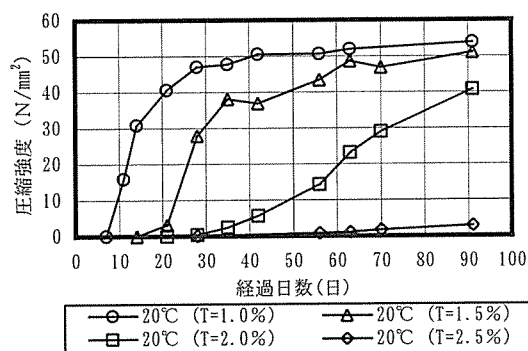


図-7 遅延剤添加率の違いによる影響

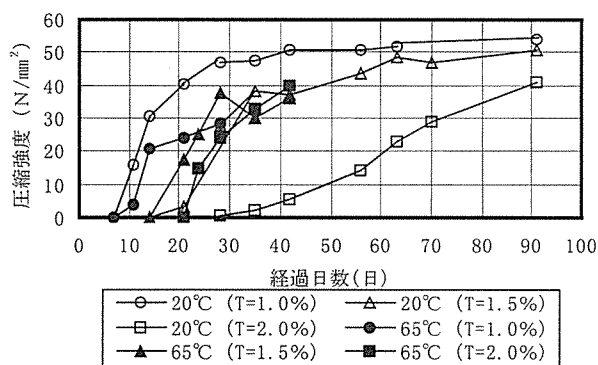


図-8 超遅延剤添加量と養生温度別の圧縮強度の関係

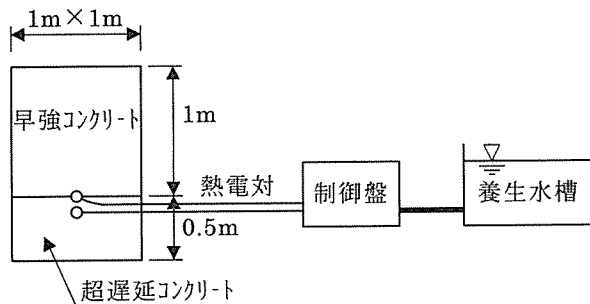


図-9 試験体および温度管理養生装置

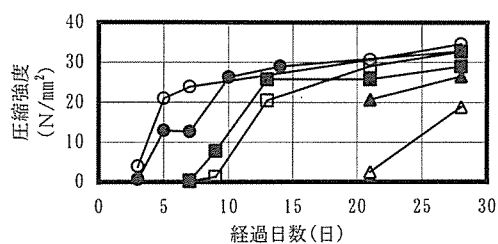


図-10 超遅延コンクリートの強度発現状況

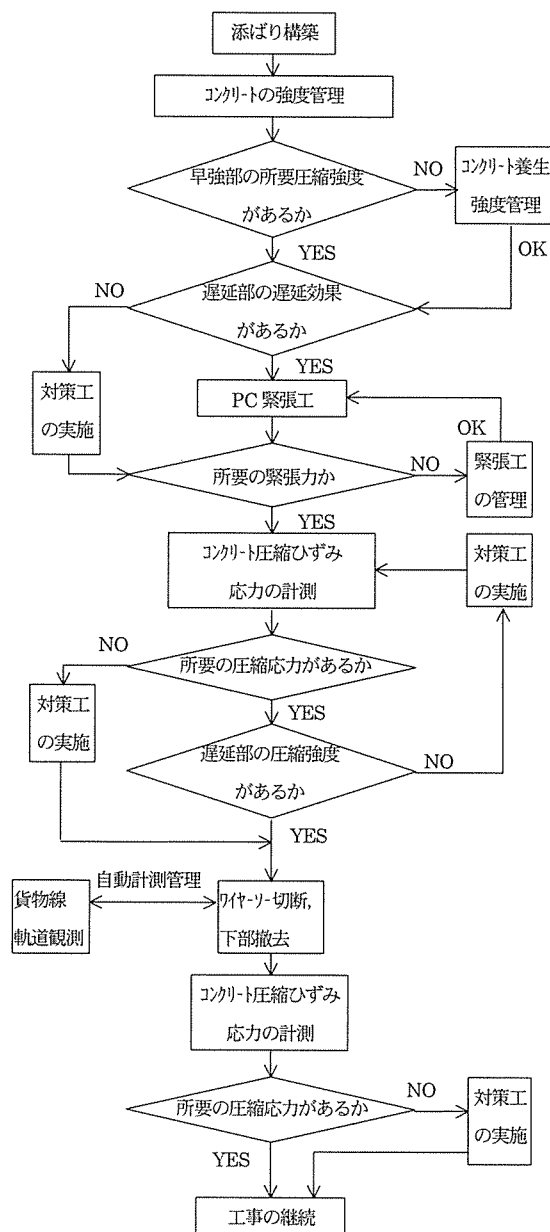


図-11 アンダーピニング部の施工管理フロー

表－3 PC鋼材と定着工法の選定表

工 法	FKK フレシネー工法 (モノグループシステム) 19S15.2B	SEEE 工法 (斜材用ケーブル) 19×φ15.2B	VSL 工法 (E 型) 19S15.2
断面積 (mm ²)	2635	2635.3	2636
単位重量 (N/m)	209.2	209.6	209.2
引張荷重 (kN)	4952.9	4952.9	4952.9
降伏点荷重 (kN)	4208.1	4208.1	4208.1
引張能力の表示	505TON 型	F500PH	510TON 型
シースの寸法 (外径)	φ102	φ96	φ102
シースジョイント (外径)	φ107	—	φ107
セット量 (mm)	7	0	6
定着方式	クサビ方式	ねじ式	クサビ方式
ジャッキの種類	K-500	400TON 型	ZPE-400
ボンブの種類	LLEP 型	MTE-2.2	VEP-3.7
施 工	①PC 鋼材は、あらかじめ工場で切断しコイル状にしたものを搬入する。 ②PC 鋼材は、コンクリート打設前に手動により押し込む。 ③プレストレスを与えてよい定着部付近のコンクリートの圧縮強度 27N/mm ² ④引張装置のキャリブレーションは、双針ゲージを使用し最初の緊張作業の直前に行う。 ⑤緊張作業は、片引きによる交互の側で行う。 ⑥ジャッキ背後および定着具の前面には必ず防護板を設置する。	①F-PH 型は、ポリチレンコーティングにより完全防錆された SEEE ケーブルと、F 型定着体 (ネジ式定着) により構成されたものである。 ②ケーブルは、防錆材を塗布し、ポリエチレン被覆を十分な厚さをもち、またカーボンブラックを添加したもので耐候性、耐薬品性に優れている。 ③プレストレスを与えてよい定着部付近のコンクリートの圧縮強度 27N/mm ² ④緊張作業は、片引きにより交互の側で行う。 ⑤ジャッキ背後および定着具の前面には必ず防護板を設置する。	①PC 鋼材は、あらかじめ工場で切断しコイル状にしたものを搬入する。 ②PC 鋼材は、コンクリート打設前に手動により押し込む。 ③プレストレスを与えてよい定着部付近のコンクリートの圧縮強度 27N/mm ² ④引張装置のキャリブレーションは、双針ゲージを使用し最初の緊張作業の直前に行う。 ⑤緊急作業は、片引きにより交互の側で行う。 ⑥ジャッキ背後および定着具の前面には必ず防護板を設置する。
特 性	①くさび式定着方法であるため定着時の PC 鋼材のセットが避けられない。プレストレスング時にセット量を仮定し緊張力を決定する。 ②再緊張も可能ではあるが、くさび式定着法なので PC 鋼材に多少の傷が残る。 ③経済的である。	①定着具は、圧着型マシオン (F 型) を用いており、セット量 0 であり、比較的短いケーブルには特に有効である。 ②マシオンは外周にネジ加工を施し、ナット定着するので、緊張力の調整が自由に行える。 ③斜張橋用斜材ケーブルなので、高価である。	①くさび式定着方法であるため定着時の PC 鋼材のセットが避けられない。プレストレスング時にセット量を仮定し緊張力を決定する。 ②再緊張も可能ではあるが、くさび式定着法なので PC 鋼材に多少の傷が残る。 ③ジャッキ・ボンブの重量が FKK 型より軽いので施工性が良い。 ④経済的である。
判 定	○	△	◎

コンクリート打設後 3 日目に行ったが、標準養生の供試体および温度管理養生の供試体ともに圧縮強度が発現していないことを確認した。その後材齢 8～12 日目まで超遅延コンクリート中心部において 5℃程度の温度の上昇が認められた。また、標準養生供試体および温度管理養生の供試体ともに材齢 7～8 日目に圧縮強度の発現が認められ、超遅延コンクリート中心部の温度の再上昇時期とほぼ対応した。また、温度管理養生装置により高温履歴を与えた供試体は、標準養生供試体よりも圧縮強度の発現が早く、添加率 1.5% の室内試験および現場試験と同様な結果が得られた。

5-3 施工管理フロー

アンダーピニング部の施工管理フローを図-11に示す。

5-4 PC鋼材と定着工法の選定

プレストレスを既設橋台・橋脚と添ばりに与える時には、基礎杭の抵抗や橋台背面土の摩擦抵抗等の様々な損失が生じる。本工事では、これらの損失量を定量的に推測しプレストレス量を増やした。そのために 1 本当たり約 3200kN の設計張力が必要となった。PC 鋼材とその定着工法の選定表を表-3 に示す。

§ 6. 計測管理

6-1 貨物線および仙石線に対する計測

営業線近接工事であるため、表-4、図-12に示すように、土留工変位、タイロッド軸力、橋台・橋脚の沈下、橋台・橋脚の傾斜、ストラット応力、橋台・橋脚応力、橋台打継目開きについて計測管理を行った。計測は1次管理値(2次管理値の70%)、2次管理値(計算から得られる最大変位の値)を設定し、自動計測により常時管理を行った。また、軌道監視員の配置による軌道計測も併せて実施した。計測値は2次管理値を超えることはなかった。

6-2 プレストレス量の確認と応力予測解析

プレストレスを与える際、基礎杭や背面土等へ応力が流れ、プレストレスの損失が発生する。一般にはPC構造(桁等)の場合、損失量は定量的に把握され、計測による確認は特に実施されていない。本工事では、定量的な予測は可能なもののその信頼性が低いと考え、コンクリートのひずみを計測し所要のプレストレス量の確認を行った。また、既設橋台・橋脚(18N/mm²)は劣化が激しく打継目の存在が確認されている。そこで、打継目を考慮したFEM解析を行い計測値と比較した。解析はプレストレス直後と既設橋台・橋脚の下部撤去時の施工ステップを考慮した。

なお、計測方法は添ばりと既設構造物間には応力計、既設構造物中央部はひずみゲージ(橋脚)、ひずみ計(橋台)である。計測結果を図-13に示す。

この計測結果から得た知見を以下に示す。

- ①解析値と計測値は、良い相関が見られた。特に橋台部は撤去による圧縮力の再配分による応力分布の変化の過程が説明できる。
- ②橋脚部はひずみゲージにて計測したが、降雨時に接着したため(プレストレッシングの日程は変更できないため延期は不可能)計測時に剥がれてしまった。この点を反省し、後施工の橋台部はひずみ計による計測とした。
- ③図中破線で示している箇所はコンクリートの打継目であるが、この影響は特に大きくない。
- ④得られた圧縮応力を積分するとほぼ全プレストレス量となっている。

§ 7. おわりに

超遅延コンクリートを用いたアンダーピニング工法を採用した結果、東北貨物線および仙石線の運行に影響を与えず、安全に工事を行うことができた。

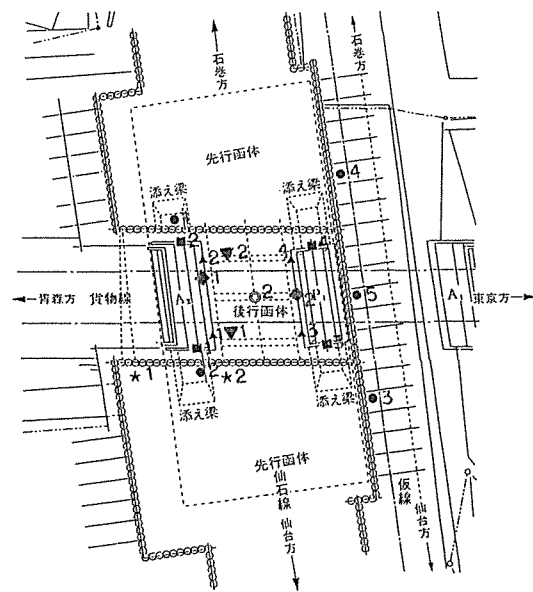


図-12 計測計器設置位置

表-4 自動計測内容および管理値

名称 内容	例	計 器	側点	1 次 管理値	2 次 管理値	管 理 値 根 拠
土留め工 変	●	設 置 型 傾 斜 計	5	7mm	10mm	壁体変位 計測
タイロッド 軸 力	★	センタ-ホ-ル 型 荷 重 計	6	設計値 ×0.7	設計値 ×1.0	設 引 張 力 計測
橋台・橋脚 沈	■	電子レベル	4	7mm	12mm	軌道整備 基 準
橋台・橋脚 傾 斜	▲	設 置 型 傾 斜 計	6	7mm	10mm	軌道整備 基 準
ストラット 応 力	◎	ひ ず み 計	2	25 N/mm ²	52 N/mm ²	応力計算
橋台・橋脚 応 力	◆	ひ ず み 計	2	0.2 N/mm ²	0.3 N/mm ²	応力計算
橋台打継目 開	▼	ダ イ ア ル ゲ - ジ	2	0.5mm	0.7mm	応力計算

本工事の技術的な成果を以下に示す。

- ①これまでアンダーピニング工法は、鉛直力を受ける部材にのみ用いられてきたが、水平力をも受ける抗土圧構造物である橋台へも適用拡大可能としたこと。
- ②既設橋台・橋脚に添ばりを増設し、PC鋼材により添ばりを一体化しているが、その一部に超遅延コンクリートを用いて、プレストレス力の減少を防ぐなど、新しい技術に取り組みこれを可能としたこと。
- ③コンクリートの硬化時期を超遅延剤の多量添加により、従来の時間単位から日単位へ制御することを可能としたこと。

これまで添ばりと支持構造物の接合部を固定とする場合は、接合部を空隙とした状態でプレストレスを与え、その後充填するのが通例であったが、非常に労力を必要

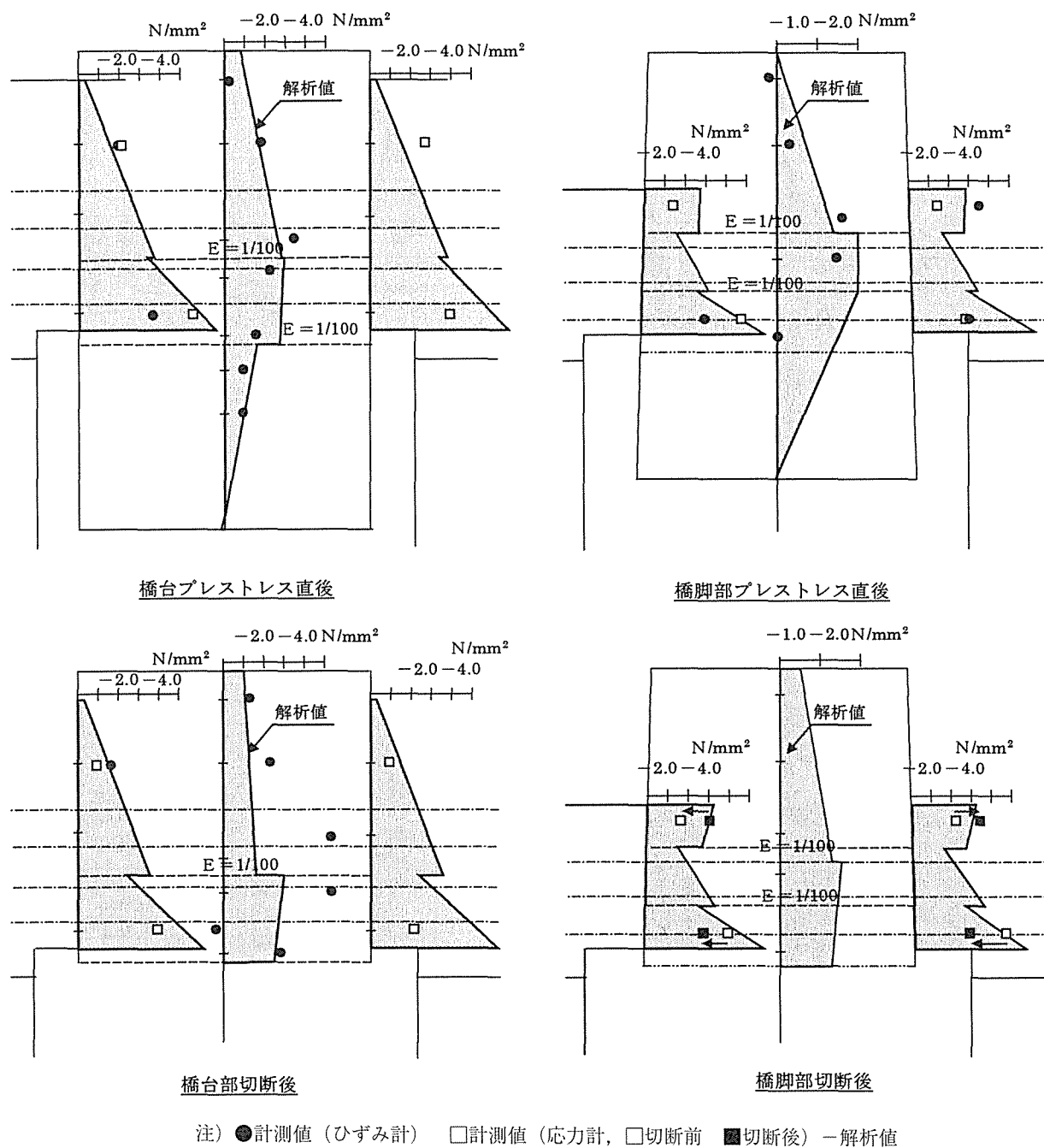


図-13 応力分布と解析値

とし、また、品質も不十分となりがちであった。本技術開発はこれらの問題を全て解消するものであり、かつ、コンクリート工事の全ての分野に適用できるもので、その経済効果は非常に大きい。

また、本工事は土木学会東北支部より総合技術賞を受賞した。

最後に、超遅延コンクリートを施工するに当たり東日本旅客鉄道東北工事事務所殿には、多大なる御協力御指導をいただきここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1)大庭光商・斎藤啓一・高橋秀樹・井上卓：高温履歴を受ける超遅延コンクリートの物性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20, No.2, pp.217～222, 1998.7
- 2)高浜文義・斎藤啓一・三浦慎也・瀧内義男：線路橋のアンダーピニングによる地下鉄函体の施工—J R 仙石線 仙台～苦竹間—，土木施工，Vol.39, No.5, pp.24～29, 1998.5