

速硬性コンクリートを活用した鉄道営業線における耐震補強工事事例

高橋 直希 江原 季映*
宮嶋 真澄*

概 要

小田急小田原線の玉川学園前駅～町田駅間に架かる水路及び里道架道橋の耐震補強において、既設盛土一体化橋梁工法を採用し、鉄道営業線の線路線閉間合いの短時間にコンクリートの打込みを行った。厳しい制約下において、営業線への影響なく、既存橋梁の常時および異常時における構造安定性を向上させ、耐震性に優れた構造物へ改築するため、各種の制約条件を満足する計画を立案・施工を実施した。これにより、線路閉鎖間合いの短い都市部においても、列車運行を妨げることなく、耐震化することができた。

Earthquake-resistant reinforcing work in operating railway lines using quick-hardening concrete

Abstract

This paper shows a record of concrete work over a short time period while closing the railroad service line, using a Nail-Reinforced Soil (NRS) integral bridge, in seismic reinforcement of waterways and village road bridges between Tamagawa Gakuenmae Station and Machida Station on the Odakyu Odawara Line.

It is important to build a structure with excellent earthquake resistance by improving the structural stability without interfering with train operations. In order to solve the above-mentioned problems, a plan to fulfill various constraints was drawn up and implemented.

As a result, seismic reinforcement work could be applied even in urban areas where track closure time was short without interfering with train operations.

キーワード: 鉄道構造物、耐震補強、既設盛土
一体化橋梁、速硬性コンクリート

* 交通事業部

§1. はじめに

小田急小田原線の玉川学園前駅～町田駅間に架かる水路及び里道架道橋(以下、本橋梁)は、橋長 14.3m の鋼桁橋で、下部工は直接基礎の無筋コンクリート重力式橋台である。1927年築造以降、顕著な変状は生じていないものの、現行の耐震基準を満たしておらず、耐震対策を講ずることとなった。耐震化の工法には、既設盛土一体化橋梁工法(以下、本工法)を採用した¹⁾²⁾。

本工法は、単純桁の鋼桁と橋台を鉄筋コンクリートで一体化することで、架け替えを行わずに、ラーメン構造へ改築するものである。図1に、本橋梁断面図、および一体化する範囲を網掛けで示す。一体化により、鋼桁中央に生ずる断面力が減少し、鋼桁の安全性が向上し、長寿命化も期待できる。さらに、支承が無くなることによる長期的な維持管理費の軽減にも寄与できる。

本橋梁は鉄道営業線であるため、工程の多くが終電から始発までの線路閉鎖間合いでの夜間工事となる。特に、コンクリートの打込みは騒音や振動を伴う作業となるため、周辺への配慮が必要となる。さらに、養生期間中に列車振動を受けた場合、圧縮強度には影響を及ぼさないものの、凝結前に振動が作用することにより、コンクリートと鉄筋の付着強度が低下することが懸念される³⁾。したがって、線路閉鎖間合いで打ち込んだコンクリートが、始発列車通過前における程度の強度を発現している必要がある。上記条件を満足するコンクリートとして、自己充填性を有し、早期に強度発現性を有するコンクリート(以下、速硬性コンクリート)を選定した。

本報では、本橋梁の状況を踏まえた耐震化工法の特徴と、施工における課題の整理および講じた対策について報告する。また、本工法による耐震化工事の効果の確認として実施した、鋼桁のたわみや列車通過時の騒音の計測結果についても合わせて報告する。

§2. 工法概要と課題点

2.1 工法概要

本工法は、単純桁の鋼桁と橋台を鉄筋コンクリートで一体化することで、架け替えを行わずに、ラーメン構造へ改築する工法である。主な施工順序は、まず、無筋橋台の耐力向上のため、橋台に鉛直鋼棒を挿入する。次に、背面盛土と橋台との一体化のため、橋台前面より補強材を打設する。最後に、鋼桁と橋台の隅角部を鉄筋コンクリートで一体化する。一体化後における隅角部の詳細図を、図2に示す。一体化部は鉄筋コンクリート構造であり、鋼桁のウェブを削孔して配筋するジベル鉄筋、橋台パラペット部に定着する

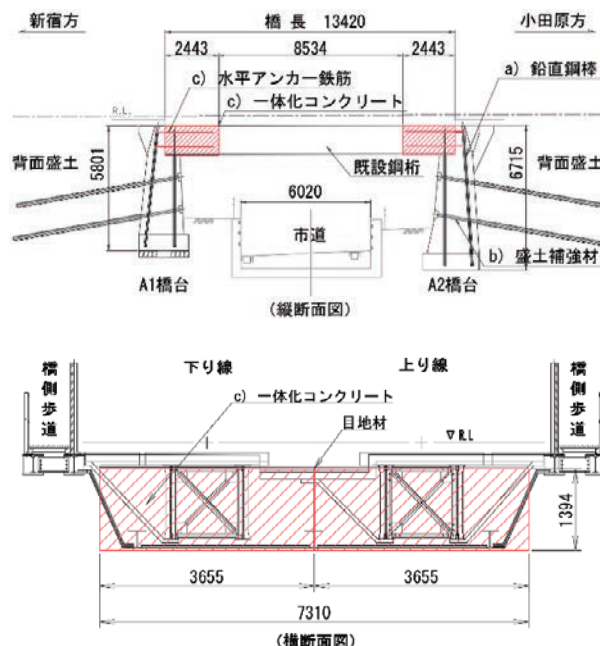


図1 橋梁断面図

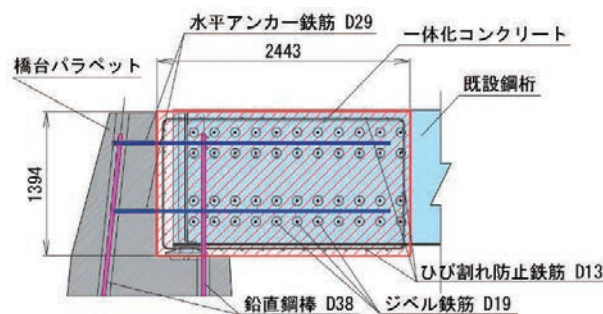


図2 隅角部詳細図

水平アンカー鉄筋、およびひび割れ防止鉄筋からなる。

本工法は、水平アンカー鉄筋により橋台パラペットを介して、橋台に力を伝達させる構造となっている。そのため、一体化部において、コンクリートと鉄筋との付着力を確保することが重要である。しかし、今回のように、始発列車通過までの時間が短い場合、所定の強度発現前にコンクリートへ列車振動が作用すると、付着強度が著しく低下する恐れがある³⁾。そこで、本工事では、始発列車通過前におけるコンクリートの圧縮強度の目標値を18N/mm²以上とすることで、コンクリートと鉄筋との付着力が十分確保できるように努めた。

2.2 施工条件とその課題点

実施の全体工期は約1年5か月であり、コンクリートの打込み時期は、11月下旬～12月下旬の冬期である。打込み箇所は、上下線の各固定支承部側および各可動支承部側の計4箇所である。コンクリートの打込み時期は冬期のため、寒中コンクリート対策が課題となる。

本施工区間における線路線閉間合いを、図3に示す。終電通過後から始発列車が通過するまでの約4時間で、コンクリートの打込みから養生を実施し、所定の強度を満足しなければならない。1回に打ち込むコンクリート量は12.3m³で、打込みに要する時間が1時間程度であるため、養生に確保できる時間は約3時間である。なお、本橋梁は住宅街に位置しており、深夜における騒音防止の観点から、自己充填性を有したコンクリートを使用することが望ましい。このように限られた施工時間内で所定の要求性能を満足するために、速硬性かつ自己充填性の高いコンクリートを使用しうえで、アジテータ車の配車遅延や輸送管の閉塞など、施工トラブルの防止が極めて重要である。

さらに、本橋梁と交差する市道は、緊急輸送道路に接続する幅員6mの2車線道路となっている。付近に鉄道を横断する施設がなく迂回路が確保しにくいこともあり、夜間においても通行止めにする事ができない。加えて、道路は橋梁下でカーブしているため、見通しが悪く、車線規制によりポンプ車を配置することができない。そのため、現場から直線距離で約70m離れた施工ヤードからコンクリートを圧送する計画とした。本橋梁と施工ヤードの配置図を、図4に示す。

一般に、コンクリートのポンプ圧送では、ポンプ車にアジテータ車を2台配置するなどして、連続して圧送することが望ましい。しかし、本施工ヤードでは、ポンプ車にアジテータ車を2台配置することができず、アジテータ車の入れ替え時に圧送を中断せざるを得ないため、圧送性の低下や閉塞が懸念される。

上記の問題点をあらかじめ整理しうえで、より確実な施工を実施するため、施工当日と同じ手順、同等の配管条件にて、試験施工を実施することとした。

§3. コンクリートの概要

3.1 使用材料およびコンクリートの配合

今回使用するコンクリートには、始発列車通過前に18N/mm²以上の圧縮強度が要求されている。この要求性能を満足するため、練上がり後のコンクリート(以下、ベースコンクリート)に混和して使用する、粉体の速硬性混和材を使用したコンクリート(以下、速硬性コンクリート)を選定した。使用した材料を、表1に示す。速硬性混和材は、セメント・アルミナ・セッコウ複合系速硬基材(以下、速硬材)、およびスランプフローの保持時間を調整するクエン酸系調整剤(以下、調整剤)で構成されている。これらをベースコンクリートに適量混和し、短時間での強度発現を可能とする。

ベースコンクリートの配合および速硬材の混和量を、表2

	1時	2時	3時	4時	5時
列車	● 終電	線路閉鎖間合い約3時間			● 始発
コンクリート打込み	← 約1時間				
養生			← 約3時間		

図3 線路線閉間合い

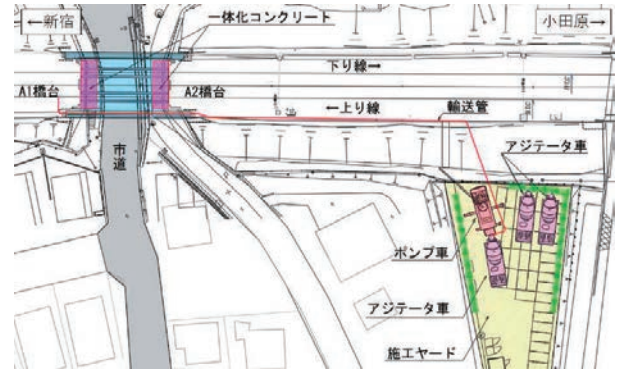


図4 本橋梁と施工ヤードの配置図

表1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 密度: 3.16 (g/cm ³)
細骨材	富津産・仁淀川町産・南伊勢町産(混合砂) 表乾密度: 2.64 (g/cm ³)、粗粒率: 2.60
粗骨材	仁淀川町産 砕石2005 (Gmax: 20mm) 表乾密度: 2.70 (g/cm ³)、実積率: 64.0 (%)
混和剤	高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸系)
速硬性混和材	速硬材 (密度: 2.93 (g/cm ³)) (セメント・アルミナ・セッコウ複合系) 調整剤 (クエン酸系)

表2 配合および速硬材混和量

ベースコンクリート		速硬性混和材					
W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				外割混和(kg)	
		W	C	S	G	速硬材	調整剤溶解水
42.9	53.2	150	350	996	896	150	10

表3 強度発現性

練上がり温度 (°C)	スランプフロー 目標保持時間 (時間)	練り混ぜから3時間後の圧縮強度 (N/mm ²)		
		試験室8°C		試験室20°C
		封かん養生	保温養生*	封かん養生
5	1	3.9	5.2	—
10	1	10.7	22.7	33.4
15	1	—	—	32.0
21	1	—	—	32.6

※厚さ24mmの発泡スチロール製養生箱

に示す。速硬化材の標準混和量は、セメント質量の内割りで30%とし、現場にてアジテータ車に混和する。調整剤は、コンクリート1m³に対して10kgの水に適量溶解し、速硬化材投入の直前に混和する。調整剤の添加量は、スランプフローの保持時間および速硬化性コンクリートの練上がり温度に応じて調整する。今回は、練混ぜから1時間経過後のスランプフローの変化が10cm以内となるよう設定した。

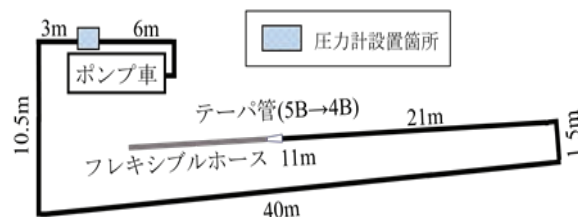


図3 配管図

3.2 強度発現性

速硬化性コンクリートの練上がり温度と練混ぜから3時間後の圧縮強度を、表3に示す。速硬化性コンクリートは、調整剤の混和量を適切に調節することで、速硬化材の混和から打込み完了までの約1時間の間、スランプフローの低下が生じず、さらに、混和から3時間後の圧縮強度が18N/mm²以上の要求性能を満足することができた。ただし、養生中にコンクリート温度が低下する場合や、練上がり温度が5℃の場合は、圧縮強度の要求性能を満足することができない。したがって、速硬化性コンクリートの練上がり温度を10℃以上に管理するとともに、圧送中や打込み後にコンクリート温度が低下しないように管理する必要がある。本工事は、冬期かつ深夜の施工であり、外気温が5℃以下になることが想定されることから、入念な寒中コンクリート対策が不可欠である。

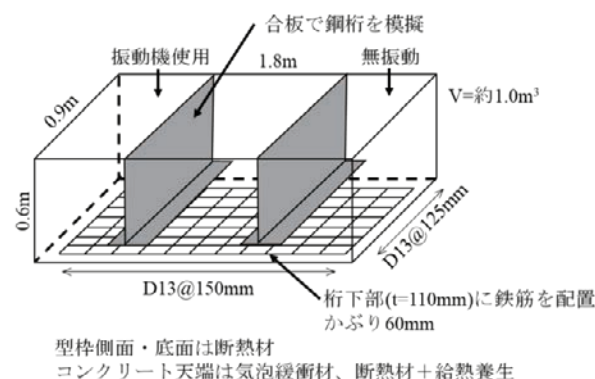


図4 模擬試験体概要

§4. 試験施工

4.1 試験施工概要

試験施工時における配管図を、図5に示す。水平換算距離および圧送速度は、実施工と同等の約155mおよび18m³/hであり、実施工におけるアジテータ車の入れ替えによる圧送中断を想定し、約6分間の圧送停止と再圧送も実施した。

フレッシュ性状については、練上がり直後、圧送後および再圧送後のコンクリートに対し、スランプフローと充填高さを確認した。充填高さについては、JSCE-F511 2010に従い、計測を実施した。

コンクリートの圧送性については、筒先から吐出されるコンクリートの目視確認に加え、圧力計を用いて管内圧力を計測・評価した。

また、速硬化性コンクリートの充填性を確認するため、模擬試験体に速硬化性コンクリートを打込み、脱型後の表面性状を確認した。模擬試験体の概要を、図6および写真1に示す。模擬試験体型枠には、ロックウールに微量の樹脂をバインダーとして加え、フェルト状に加工したもので、片面にアルミクラフトペーパーを貼った断熱材(以下、断熱材)を張り付けた。断熱材の標準密度は40kg/m³以上、厚さは

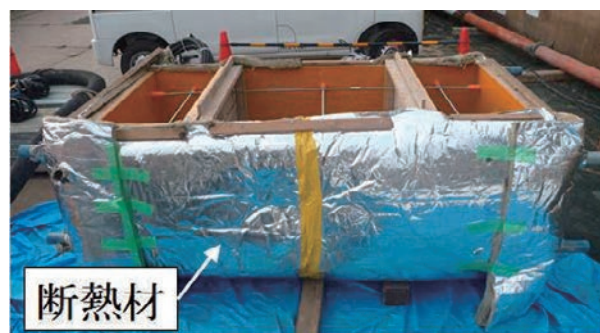


写真1 模擬試験体と断熱材

50mm、熱伝導率は0.049W/(m・K)以下である。充填不良が懸念された鋼桁下部については、合板で模擬し、鉄筋も配置した。打込み箇所は中央1箇所とし、内部振動機の有無による充填状況も確認した。

4.2 フレッシュ性状

スランプフローは、練上がり直後、圧送後および再圧送後でそれぞれ、475mm、625mmおよび545mmであった。充填高さは、練上がり直後、圧送後および再圧送後でそれぞれ、302mm、332mmおよび328mmであった。

圧送後のコンクリートのスランプフローは増加傾向を示したが、再圧送後のスランプフローは低下した。充填高さは、スランプフローと同様の傾向を示している。しかし、いずれにおいても、充填高さは300mm以上となっており、圧送による性状変化が施工上問題となる可能性が低いことを確認した。なお、試験時の外気温およびコンクリート温度

はそれぞれ、18℃および24℃であった。

4.3 ポンプ圧送性

輸送管内の平均管内圧力は、通常圧送時で約1.8MPa、再圧送時で約2.0MPaであった。粉体量が多いコンクリートのため、圧送中断による圧力変動が大きくなることが予想されたが、圧送中断の時間が短かったこともあり、圧力の変動は小さく、筒先から常に一定の状態でコンクリートが連続的に吐出される順調圧送状態であった。

4.4 リバウンドハンマーによる強度確認

本工事では、一体化コンクリートの強度確認をリバウンドハンマーにより実施することとし、試験施工においてもリバウンドハンマーによる強度確認を実施した。事前に確認した速硬性コンクリートにおけるリバウンドハンマーの反発度と圧縮強度の関係を、図7に示す。ここで、本工事における管理基準は、95%予測区間の下限値とした。

試験施工時における打込み時のコンクリート温度および外気温は、それぞれ24℃および17℃であり、実施工時に予想される温度よりも高くなっているものの、速硬材の混和から3時間後における、リバウンドハンマーによる圧縮強度推定値は39.0N/mm²であり、本工事における要求性能を満足した。

4.5 充填性

脱型後の模擬試験体表面を、写真2に示す。振動の有無によらず、充填不良箇所は一切無かったことから、実施工における内部振動機の使用は最小限に止める計画とした。

§5. 寒中コンクリート対策

5.1 運搬中の対策

ベースコンクリートを施工現場へ運搬中、コンクリート温度の低下を防ぐため、写真3のように、アジテータ車に保温カバーを装着する。外気温を0℃、運搬時間45分の条件下における、出荷時と荷卸し時のコンクリート温度はそれぞれ、13℃および12℃であった。

5.2 圧送中の対策

輸送管内のコンクリートの温度低下を防ぐため、輸送管に断熱材を巻き付けた。写真4は、輸送管に断熱材を巻き付け、雨養生のため、さらにブルーシートを巻いた状態である。

室温2℃における輸送管内のコンクリート温度の計測結果を、図8に示す。断熱材を巻いた輸送管内のコンクリート

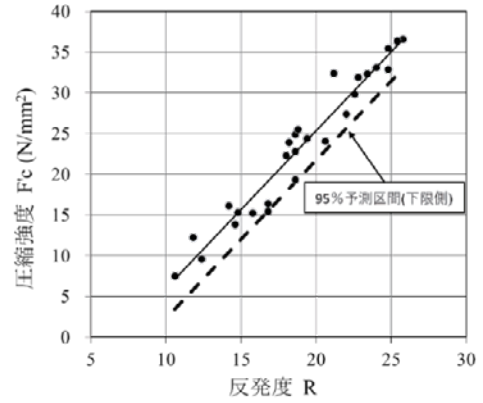


図5 反発度と圧縮強度

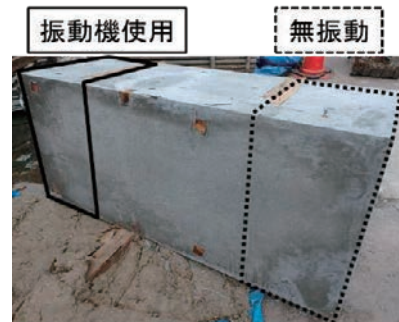


写真2 模擬試験体出来形

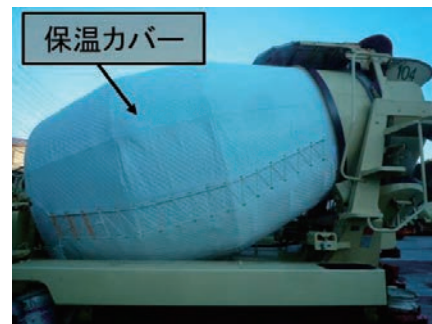


写真3 運搬中の対策例

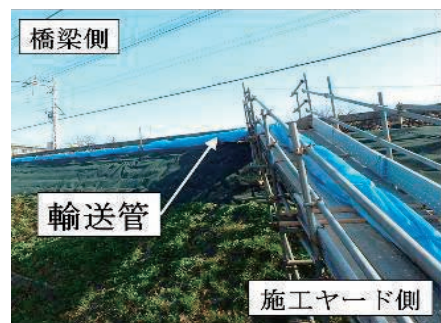


写真4 圧送中の対策例

温度は、コンクリート充填時に輸送管および断熱材が室温相当であったため、計測開始20分程度でおよそ2℃低下したが、その後は輸送管および断熱材が温まったこともあり、少なくとも60分間は温度を保持した。

5.3 打込み箇所の対策

打込み箇所は、写真5のように、線路閉鎖後に軌道上に単管骨組みとブルーシートによる簡易テントを設置し、ジェットヒーターを2台稼働させ給熱した。テント設置に要する時間は約15分、ジェットヒーター点火後のテント内温度は平均17℃程度であった。また、給熱によるコンクリート天端の急激な乾燥を防ぐこと、およびテント撤去直後の急激な冷却を緩和するため、打込み完了後速やかにコンクリート天端を気泡緩衝材および断熱材により被覆した。

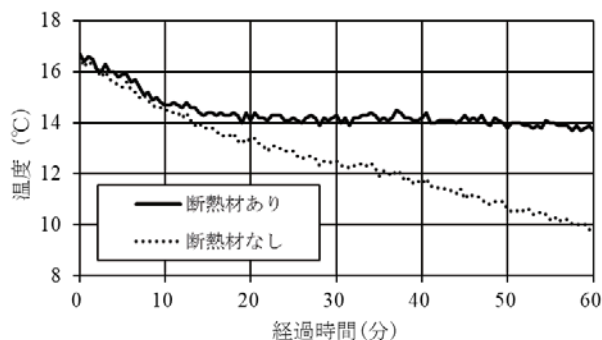


図6 断熱材の有無による輸送管内のコンクリート温度

§6. 実施工

6.1 サイクルタイムによる施工管理

施工管理の観点から、線路閉鎖間合いの短時間ですべての工程を確実に完了しなければ、翌朝の列車運行に影響を及ぼす。さらに、本工事では始発列車通過前におけるコンクリートの圧縮強度の目標値を18N/mm²以上としており、そのためには十分な給熱養生の時間が必要である。このような条件下において、確実に施工かつ、要求性能を満足するためには、綿密な時間管理が必要となる。そこで、速硬性コンクリートの製造、受入れ、圧送、筒先・養生および片付け作業毎に人員を配置し、アジテータ車毎の入れ替え時刻や、圧送・養生作業に分単位のサイクルタイムを設定し、管理した。

前述した通り、1回の打込みに要するコンクリート量は12.3 m³であり、3時間の給熱養生時間を確保するためには約1時間で打込みを完了する必要がある。本工事では、ベースコンクリートに混和する速硬材および調整剤を均一に練り混ぜるため、大型のアジテータ車1台につき、速硬性コンクリートを2m³のみ製造するため、合計7台のアジテータ車が必要となる。施工ヤードに一度に配置できるアジテータ車は全3台で、2台を速硬性コンクリートの製造スペースに、1台をポンプ車に配置する。速硬性コンクリートの製造に要する時間は、1台当たり15分、アジテータ車の入れ替えを3分以内で行うと、約1時間15分で打込みが完了する。

各作業の遅れが累積した場合、始発列車通過までの給熱養生時間が減少することとなり、大きな遅れは許容できない。そこで、サイクルタイム時刻表を作成し、各作業場所付近に掲示する。各班には時間管理者を配置し、無線機により相互の進捗状況を確認し、調整を行った。

6.2 実施工状況

実施工では、施工開始の90分前に確認車を配車し、施工日当日の運搬時間、荷卸し温度を事前に確認した。実施工におけるコンクリートの品質管理は、ベースコンクリー



写真5 打込み箇所の対策例



写真6 コンクリートの製造および圧送状況

表4 実施工の品質管理基準

	ベースコンクリート	速硬性コンクリート
スランプフロー	500±100mm	600±100mm
空気量	3.0±1.5%	3.0±1.5%
塩化物量	0.30kg/m ³ 以下	0.30kg/m ³ 以下
練上がり温度	—	10℃以上

表5 現場試験結果の一例

	ベースコンクリート	速硬性コンクリート
スランプフロー	510mm	524mm
コンクリート温度	16℃	18℃
空気量	3.9%	1.9%
塩化物量	0.04kg/m ³	0.04kg/m ³
外気温	8℃	8℃

トと速硬性コンクリートについて行った。品質管理基準および現場試験結果の一例を、表4および表5に示す。

速硬性コンクリートを用いた鉄道営業線における耐震補強工事

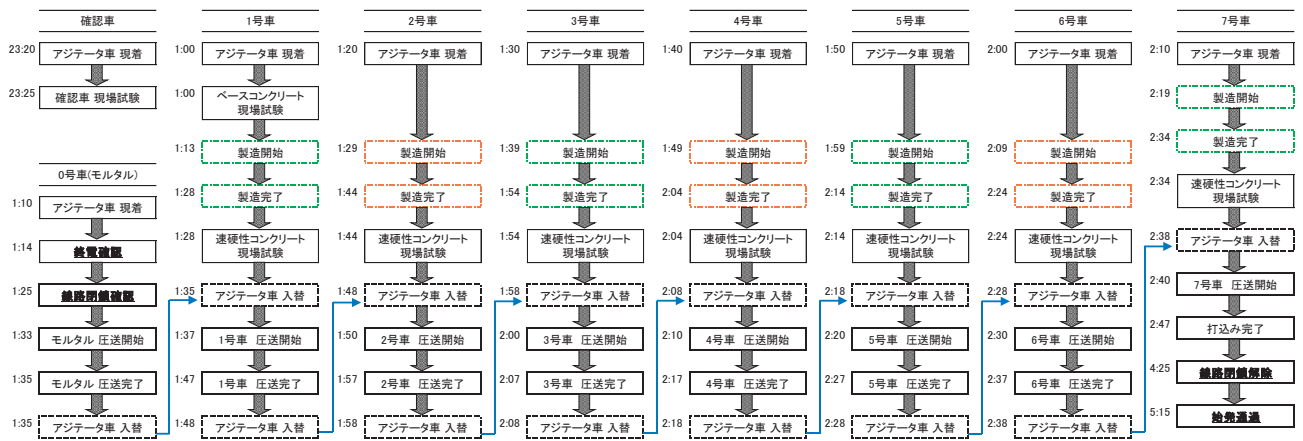


図7 サイクルタイムの一例

表6 実施工における圧縮強度の一例

外気温	確認時刻	打込み完了からの経過時間	圧縮強度推定値
0℃	4:20	1時間44分	23.5 N/mm ²
10℃	4:38	1時間45分	24.6 N/mm ²



写真4 コンクリートの出来形

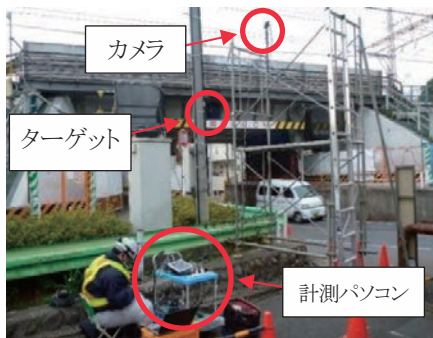
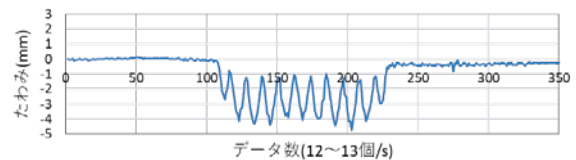


写真5 たわみ計測状況

製造中の施工ヤードの様子、およびサイクルタイム時刻表の一例を、写真6に示す。実施工における分単位での施工の必要性は既に述べたとおりであり、当日の作業関係者に対し、図9に示す、実施工のサイクルタイムを明示した資料を配布した。これらの管理により、現場全体での時間意識の向上と共有が図られ、作業は概ねサイクルタイム通りに進捗し、一体化コンクリートの施工を完了した。

一体化前 (10:53:43～ 特急 EXE-α 0304)



一体化後 (10:53:46～ 特急 EXE 0304)

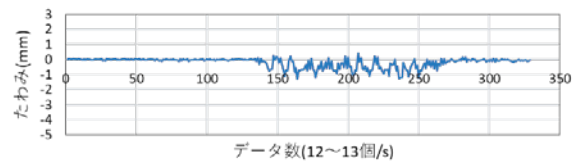


図8 一体化前後におけるたわみ量の変化の一例

速硬性コンクリートの始発通過前における圧縮強度は、一例を表6に示す通り、要求性能を満足した。また、施工箇所におけるコンクリートの出来形は、写真7に示すように、充填不良もなく良好な出来栄となった。なお、打重ね品質を高めるため、内部振動機を打重ねの際に限定的に使用した。

6.3 鋼桁のたわみの計測結果

一体化前後において、列車通過時の桁中央のたわみ量を計測した結果の一例を、図10に示す。計測手法は、鋼桁に設置したターゲットの移動量を、遠隔カメラにより計測可能な画像解析システムを採用した(写真8)。設置位置は、上下線側それぞれの桁中央2か所とした。

鋼桁と橋台の一体化により、支承部が鉄筋およびコンクリートにより剛結され、支承による単純支持構造からラーメン構造となる。これにより、鋼桁中央に発生する断面力およびたわみが減少する。

計測結果から、一体化前に比べて、たわみ量が約1/2～1/3に低減しており、ラーメン構造化による鋼桁への負担軽減効果を確認した。

6.4 騒音の計測結果

軌道中心より12.5mの位置における列車通過時の騒音ピークレベルは、一体化前の74～79dbから、68～74dbに低減した。ラーメン構造化により、支承部が無くなることで、列車通過時の騒音についても低減できることが確認できた。

§7. おわりに

鉄道営業線の線路閉鎖間合いという短時間において、既設盛土一体化橋梁工法による単純桁の鋼桁と橋台の一体化を無事完了することができた。線路閉鎖間合いの短い都市部においても、翌日の列車運行を妨げることなく、単純梁の鋼桁橋を耐震化できた意義は大きい。

現在、コンクリートのひび割れや橋台変位の定期的な経過観察を実施しているが、現在までに有害となる変状は生じていない。今後も引き続き経過観察することとしたい。

参 考 文 献

- 1) 神田政幸ら: 鋼桁・橋台・盛土一体化による旧式橋梁の耐震補強、鉄道総研報告、Vol.26、No.4、2012.4
- 2) 岸田敦朗ら: 小田急小田原線 旧恩田川橋梁における耐震補強工事の施工計画－補強盛土一体化橋梁(インテグラル橋梁)工法の採用－、土木学会第 73 回年次学術講演会、6-760、2018.8
- 3) 横山知昭ら: 鋼桁・橋台・盛土の一体化補強工法における養生期間中の列車振動がコンクリートの硬化性状に及ぼす影響、土木学会第 67 回年次学術講演会、6-81、2012.9

ひとこと

今後、同様な耐震補強のニーズは益々増えていくものと考えられる。実施工事例の報告が今後の同種工事の参考になれば幸いである。



高橋 直希