

論文 列車振動が高流動コンクリートの品質に及ぼす影響

横井 謙二*¹・永尾 拓洋*²・渡辺 忠朋*³・渡辺 浩二*⁴

要旨：本論文は、コンクリート養生中に列車振動の影響を受ける部材に高流動コンクリートを適用した場合の硬化コンクリートの品質への影響を明らかにしたものである。本実験では、列車振動を模擬加振したコンクリート供試体の骨材の沈降、強度性状、鉄筋との付着性状について検討した。その結果、今回適用した高流動コンクリートでは、普通コンクリートと同様に、列車振動による圧縮強度ならびに曲げ強度への悪影響がないこと、締固め効果により鉄筋との付着強度が増加することを示した。

キーワード：高流動コンクリート、列車振動、塑性粘度、強度、鉄筋付着

1. はじめに

清正公架道橋は名古屋駅構内に位置する都市計画道路市道鷹羽町線上に架かる架道橋である。当該工事では、列車の運行に支障することなく、既設架道橋を取り壊しながら新設架道橋を構築していくため、架設工法上、新設架道橋の上部工（H形鋼埋込み桁）は、コンクリート打設後の養生中に列車振動の影響を受けることになるが、施工上の制約から高流動コンクリートを採用した。

養生中のコンクリートが断続振動を受けた場合、その硬化性状に及ぼす影響については、いくつかの研究報告^{1)・2)}がある。しかし、それらはスランプ8～18cm程度の普通コンクリートに関するものであり、高流動コンクリートに関する同様の検討は行なわれていない。

本研究は、列車振動を模擬加振した養生環境下での高流動コンクリートの硬化性状について検討を行なったものである。

2. 適用対象部材の概要

本架道橋改築工事では、在来7線の軌道の仮受けに、桁高を抑えることができるマクラギ抱

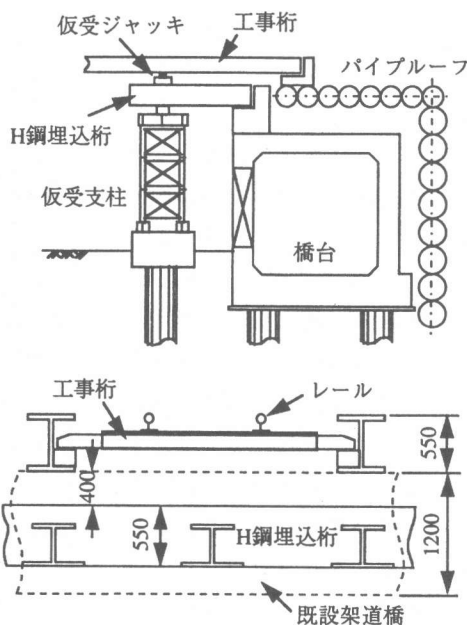


図-1 工事桁仮受構造

き込み式工事桁を用いる。工事桁と新設架道橋の上部工（H形鋼埋込み桁）の隙間は、図-1に示すように40cm程度しかなく、工事桁の横桁と横桁の間隔も狭い構造である。これに加えて、線路閉鎖間隔が90～115分と非常に短いという施工上の制約条件から、コンクリート打設

* 1 大成建設(株)技術研究所 材料研究部土木材工研究室 工修 (正会員)

* 2 東海旅客鉄道(株)建設工事部 土木工事課

* 3 北武コンサルタント(株) (正会員)

* 4 大成建設(株)名古屋支店 (正会員)

時、工事桁軌道上部からの入念な締め作業は困難と考えられた。このため、本上部工の施工には、自己充填性を有する高流動コンクリートを採用することとした。

その際、工事桁が支える列車荷重は、H形鋼埋込み桁の主桁であるH形鋼を介して仮受支柱に伝達される構造となっているため、打ち込まれたコンクリートは断続的に列車振動により加振されることとなり、その影響が懸念された。

既往の研究²⁾によれば、列車通過時の実測振動レベルである最大加速度200~600Gal、変位片振幅0.05~1.0mmの振動条件下においては、コンクリートと鋼材との付着やコンクリートの圧縮強度に及ぼす悪影響は認められなかったとされている。しかし、高流動コンクリートは使用するセメントや高性能AE減水剤の影響で普通コンクリートに比べて凝結時間が長くなる傾向にあるため、振動の影響を長時間受けること、粗骨材の相対間隔を広げ、流動性と間隙通過性を高めているため、普通コンクリートよりも粗骨材量が少なく、モルタルが多い配合構成であることから、振動が高流動コンクリートの硬化性状に及ぼす影響については明確ではない。

そこで、本研究では列車による断続振動が養生中の高流動コンクリートの硬化性状に及ぼす影響を検討することとした。

3. コンクリートの配合

検討対象は、多糖類ポリマーの分離低減剤を添加した併用系高流動コンクリートであり、ひび割れ抑制の観点から、膨張材の使用を前提として配合選定を

行なった。高流動コンクリートの目標性能は、施工性の観点からスランプフロー65±5cm、スランプフロー保持時間を90分とした。

表-1に選定したコンクリート配合・仕様と使用材料を示す。表-2にコンクリートの基本性状を示す。当初、凝結始発時間については、列車振動の影響時間を低減する観点から元設計の普通コンクリート相当(7時間)と考えていた。しかし、膨張材を使用した配合(Case2)では、スランプフローの保持時間を確保するために、高性能AE減水剤の使用量が膨張材無混入(Case1)のものより大幅に増加し、凝結始

表-1 コンクリートの配合・仕様と使用材料

配合 Case	仕様		単 位 量 (kg/m ³)					
	ワカ [®] リテー	凝結	水 W	結合材 P	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 AD	
1	スランプ [®] フロー 65±5cm	始発 7時間	165	MC 500	824	791	SP 0.90%	BP 0.5
2	スランプ [®] フロー 65±5cm	始発 14時間	165	MC 470 EX 30	824	791	SP 1.85%	BP 0.5
3	スランプ 12±2.5cm	始発 7時間	162	NP 306	799	1031	AE 0.25%	—

種類	名称	記号	密度 (g/cm ³)	特性・主成分
結合材 P	普通ポ [®] ルランド [®] セメント	NP	3.16	比表面積:3270cm ² /g, 凝結2:23-3:44 (hr:min)
	3成分系低熱セメント (中庸熱ベース)	MC	2.85	比表面積:3720cm ² /g, 凝結4:39-6:57 (hr:min) (混合比率=MP40:BS40:FA20)
混和材	膨張材 (膨張性CaO系)	EX	3.14	比表面積:3450cm ² /g, 凝結2:32-3:34 (hr:min)
細骨材	長良川細砂(20%) 揖斐川粗砂(80%)	S	2.58	吸水率:2.11%, 粗粒率:2.02 吸水率:2.63%, 粗粒率:3.14
粗骨材	南濃町碎石	G	2.68	吸水率:0.90%, 粗粒率:6.77, Gmax=20mm, 実積率:60.2%
混和剤 AD	AE減水剤	AE	1.25	リグニンスルホン酸化合物
	高性能AE減水剤	SP	1.05	ポリカルボン酸エーテル系
	分離低減剤	BP	—	多糖類 [®] リマー (β-1,3-グルカン)

表-2 コンクリートの基本性状

配合 Case	練上がり後の経時変化 スランプフロー (cm)			ブリーディング 率(%)	凝結時間 (hr:min)		圧縮強度 (N/mm ²)		
	30分後	60分後	90分後		始発	終結	σ ₃	σ ₇	σ ₂₈
1	69.0	68.5	62.5	1.0	7:36	11:43	16.5	27.7	51.8
2	67.0	64.0	62.0	3.0	14:35	18:50	16.8	26.5	51.1
3	スランプ13.0cm			5.5	6:57	8:55	19.6	30.9	43.4

発時間は14時間半と目標値の2倍となった。この現象は、他の結合材や混和剤の組み合わせでも同様に認められたため、膨張材を使用した場合、普通コンクリート相当の凝結時間とすることは不可能と考えられた。そこで、膨張材を優先するか、凝結時間を優先するかを加振実験により判断することとした。このため、加振実験は、高流動コンクリートで膨張材の有無を考慮した2ケースと、元設計の普通コンクリート (Case3) の計3ケースについて実施した。

4. 列車振動の推定

列車によりH形鋼埋込桁に生じる振動波形そのものの測定は施工時までできないため、スパンがほぼ等しいいくつかの既設架橋について、新幹線の鉄桁疲労調査で実績のあるBMC橋梁診断システムを用い、支承部付近の桁下フランジ上面にひずみゲージ式加速度計を、また橋台上面にサーボ型加速度計を設置し、振動波形を測定した。代表的な振動波形を図-2に示す。

各橋梁の振動波形はほぼ同等であり、図-3に示すフーリエスペクトルをみても、明確な固有振動数のようなものは認められなかった。

次に、計測した振動波形をH形鋼埋込桁を模擬した図-4に示すバネ-マスモデルに入力して応答波形を解析した。この応答波形による振動数ならびに最大変位片振幅から、振動条件は振動数20Hz、変位片振幅1/3mmとした。なお、

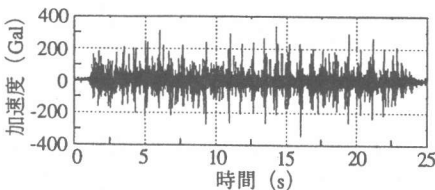


図-2 実測した橋梁振動波形の一例

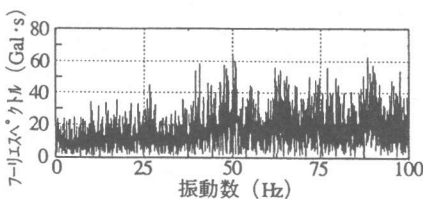


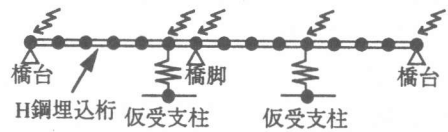
図-3 フーリエスペクトルの一例

本振動条件は、既往の実測レベル²⁾と同等であり、実際の振動に近いものと考えられる。

しかし、既設架橋について実測した振動波形をH形鋼埋込桁に対して適用した場合の安全性は明確ではないため、図-5に示す梁モデルを用いて設計荷重を工事桁上に載荷した場合にH形鋼埋込桁に生じる最大たわみ量を解析により算出した。この最大たわみ量から、振動条件は、振動数20Hz、変位片振幅1mmとした。なお、本解析法では振動数を求めることができないため、バネ-マスモデルと同一とした。

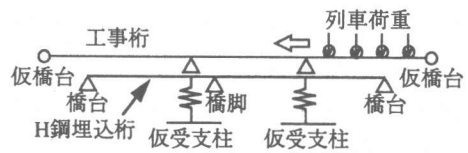
5. 列車振動を模擬した加振実験

実験は、小型テーブル式振動台を用いて行なった。振動条件は前項の結果を踏まえて、振動数20Hz、変位片振幅1mmを想定される最大レベルとし、本実験ではこの条件を基本とした。また、振動数20Hz、変位片振幅1/3mmを既往の研究に相当する値として標準レベルと位置付けた。さらに、振動数と振幅の影響を比較するため、最大レベルと加速度が同等となる振動数35Hz、変位片振幅1/3mmについても合わせて検討した。表-3に検討項目をまとめて示す。



加振条件	振動数	変位片振幅	加速度
最大予測値	17Hz	0.46mm	525Gal
試験値	20Hz	0.33mm	521Gal

図-4 バネ-マスモデルと解析結果



加振条件	振動数	変位片振幅	加速度
最大予測値	(17Hz)	1.28mm	—
試験値	20Hz	1.00mm	1579Gal

図-5 梁モデルと解析結果

表-3 加振実験における検討項目と条件

検討項目	振動条件		振動時間	
	振動数	変位片振幅	継続期間	時間間隔
コンクリート配合	20Hz	1 mm	3日	40秒/5分
振動期間	20Hz	1 mm	3日	
			7日	
振動条件	20Hz	1/3mm	3日	
	35Hz	1/3mm		
長期強度	20Hz	1 mm	3日	

ここで、断続振動1回当たりの時間は、実際に走行するコンテナ貨物の最大編成長26両に対応して40秒(50km/hr.徐行)、振動間隔はピーク時の列車運転間隔から5分間とした。

コンクリートは容量100ℓのパン型ミキサで2分間の混練とした。高流動コンクリートは、練上がり30分後にフレッシュ性状が目標値を満足することを確認した後、1層の流込み打設により型枠内に充填し、金コテで表面を均し整形した。一方、普通コンクリートは、練上がり直後にフレッシュ性状を確認した後、JIS A 1132に従って、突き棒による締固めにより打込み、金コテで表面を均し整形した。加振は、いずれも練上がりから1時間後に開始した。加振の継続期間は3日を標準とし、期間を延長したケース(7日)についても検討した。加振終了後の強度試験は、基本的に即日実施した。なお、長期強度発現性を確認するケースのみ、材齢7日、28日、91日に試験を行なった。

ここで、供試体は、圧縮強度試験用(φ10×20cm)、曲げ強度試験用(10×10×40cm)、鉄筋附着強度試験用(10×10×10cm、D16横筋)の3種類としたが、配合や材齢ごとに強度発現性状が異なることを考慮して、各ケースごとに加振供試体と合わせて静置供試体を作製し、静置に対する加振の強度変化により比較した。

6. コンクリート配合の影響

(1) 普通コンクリート

コンクリートの圧縮強度、曲げ強度に及ぼす

振動の影響は、骨材の沈降にともなう供試体の不均一性に依存するものと考えられる。加振されたCase3の供試体上面には、白色の析出物が泡状に発生しており、明らかなレイタンスが認められた。これは、静置養生下でも5.5%のブリーディングが発生するため、振動養生下ではブリーディングがより顕著となったものと考えられる。また、圧縮強度試験用供試体の断面をカットして観察したところ、上部10mm程度が完全なモルタル層となっており、さらに、鉄筋引抜き試験体の試験終了後の断面を観察すると、鉄筋下面にブリーディングによる水膜痕が認められた。しかし、静置と加振の両供試体の試験結果を比較すると、図-6に示すように、Case3の圧縮強度、曲げ強度、ならびに鉄筋附着強度は、それぞれ増加傾向にあった。これらの強度増加の原因は、主に振動により空気が抜けたことと、振動による締固め効果で鉄筋周りが密実になったことによるものと考えられる。

(2) 高流動コンクリート

高流動コンクリートCase1とCase2は、Case3

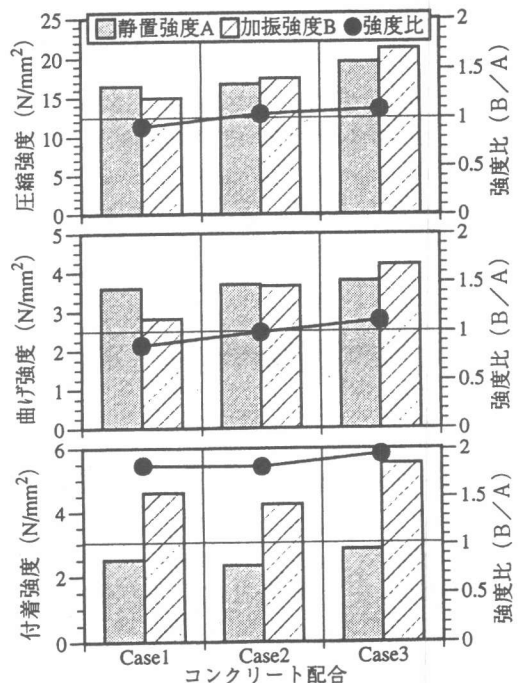


図-6 配合種別による強度特性への影響

のようなレイタンスの発生や鉄筋下面の水膜痕は認められなかった。これは、高流動コンクリートが普通コンクリートに比べてブリーディングが少ないこと、粘性が大きく分離抵抗性が高いこと等が原因と考えられる。

一方、Case 1とCase2を比較すると、Case1の圧縮強度試験用加振供試体の上部にできたモルタル層厚が10～20mm程度あったのに対して、Case2では5～10mm程度と約半分であった。そこで、各配合のフレッシュコンクリートを5mmふるいによりウエットスクリーニングしたモルタル試料のレオロジー特性を、外筒回転式回転粘度計を用いて調べた。その結果、Case2の塑性粘度は11Pa・sであり、Case1(7Pa・s)の約1.6倍であることが分かった。このことから、Case2はCase1よりも振動に対する材料分離抵抗性が高いものと考えられる。

図-6に示すように、Case2における圧縮強度と曲げ強度が加振と静置で同等であるにも関わらず、Case1では加振の方が1～2割低下しているのは、この材料分離抵抗性の差によるものと考えられる。なお、鉄筋の付着強度は両ケースともほぼ同様に加振の方が増加しているが、これは骨材の沈降度に差はあるものの、振動による締固め効果により、鉄筋の周囲が密実な状態になったためと考えられる。

以上のことから、Case2は断続振動養生下でも、高い材料分離抵抗性を有し、静置養生下と比べて同等の硬化性状を確保できることが明らかとなった。そこで、以下の検討では、全てCase2の配合について実施することとした。

7. 振動条件の影響

(1) 振動継続期間

最大レベルで振動の継続期間を変化させて行った実験結果を図-7に示す。加振期間を7日とした場合、静置に対する加振の強度比は、圧縮強度、曲げ強度ともに約1.0、付着強度は約2.0であり、3日間の加振結果と同等であった。また、圧縮強度試験用加振供試体の上部にできたモルタル層厚も5～10mm程度と同等であった。このことから、振動の影響は3日よりも前の時点で終了しているものと考えられる。

そこで、以下の検討では加振期間を全て3日とした。

(2) 振動数・変位振幅

振動条件(振動数、変位片振幅)を変化させて行った実験結果を図-8に示す。各ケースを比較すると、静置に対する加振の強度比は、圧縮強度、曲げ強度ともにほぼ同等であり、明確な差は認められなかった。

圧縮強度試験用加振供試体の上部にできたモルタル層厚を3ケースで比較すると、標準レベル(20Hz-1/3mm)が5mm以下と少なく、最大レベル(20Hz-1mmと35Hz-1/3mm)の場合が5～10mmと多かった。また、鉄筋付着強度の静置に対する加振の強度比をみると、標準レベルではほぼ1.0であったのに対して、他の2ケースでは1.8～1.9倍であった。これは、振動レベルの低い条件では、骨材の沈降が生じにくいため、鉄筋周りの密度増加が他に比べて少なかったことによるものと考えられる。

このことは、図-9に示す付着応力とすべり

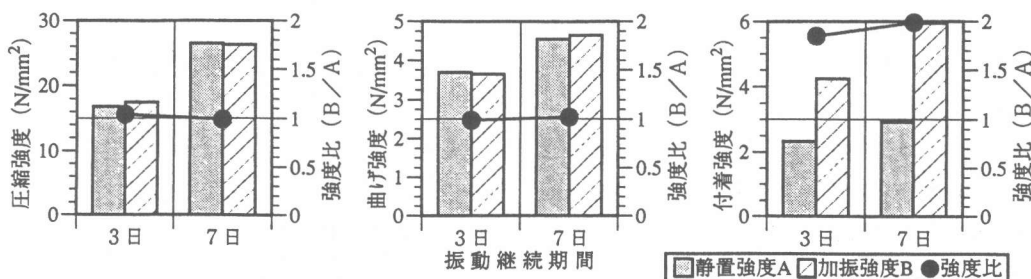


図-7 振動期間による強度特性への影響

量の曲線で、最大応力時のすべり量が振動レベルの大きいものほど減少することに対応しているといえる。

以上のことから、標準レベルでは、すべての強度特性が静置養生下と同等で、骨材の沈降も生じにくいことが明らかとなった。一方、最大レベルでは、空気の抜き出し等は生じないため、コンクリート強度は静置養生下と同等となるが、若干の骨材沈降が生じるため、付着強度は増加することが明らかとなった。また、最大レベルの2ケースに差異は認められず、振動の影響は加速度の大小に関係するといえる。

8. 長期強度発現性

図-10に最大レベルで3日加振した場合の材齢7日、28日、91日における圧縮強度試験結果を示す。なお供試体は、加振終了後、各試験材齢まで封緘養生とした。

各材齢の強度をみると、材齢に関わらず静置と加振の両供試体の圧縮強度は同等であった。このことから、断続振動養生下においても長期強度発現性への悪影響はないと考えられる。

9. まとめ

本研究で得られた知見を、以下にまとめる。

- (1) 膨張材の有無により、高流動コンクリートは粘性に差を生じる。膨張材を使用することにより、凝結時間は遅くなるが、粘性が増大するため、振動下での骨材の沈降度は小さくなる。
- (2) 振動の影響は、材齢3日以前に終了する。
- (3) 振動加速度レベルの大小により、骨材の沈降度に差異が生じる。
- (4) 断続振動の養生下でも、コンクリートの圧縮強度、曲げ強度には基本的に悪影響を及ぼさない。
- (5) 振動レベルが高くなると、鉄筋周りの密度増加と締固め効果により、鉄筋とコンクリートの付着強度は増加する。
- (6) 断続振動下でも、高流動コンクリートの長期強度発現性に悪影響を及ぼすことはない。

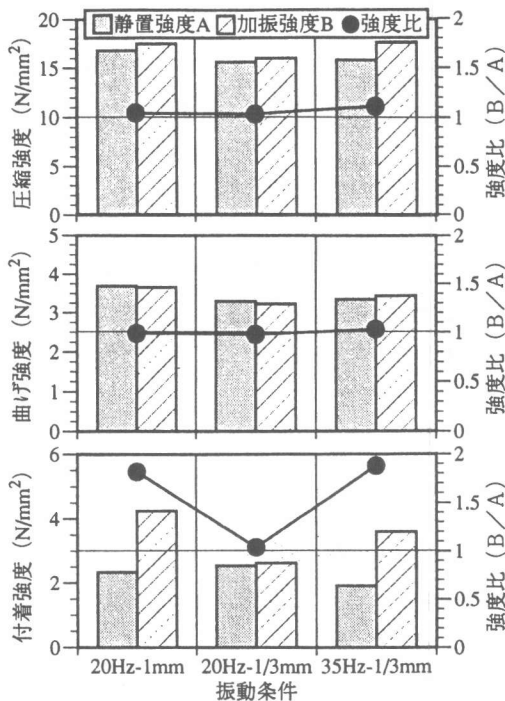


図-8 振動条件による強度特性への影響

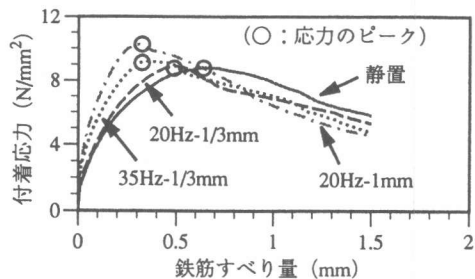


図-9 付着応力とすべり量の関係 (振動条件)

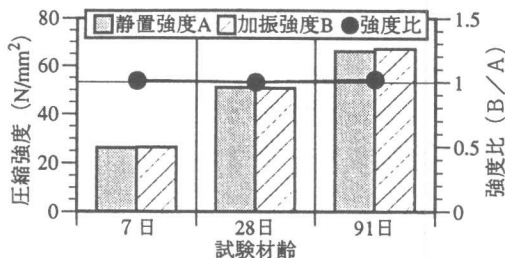


図-10 振動による長期強度発現性への影響

参考文献

- 1) 山本宣博ほか：養生中に断続振動をうけるコンクリートの諸性質について、セメント・コンクリート, No.287, pp.30-38, 1971
- 2) 波田野勇ほか：橋梁嵩上工事に伴う養生中のコンクリートに及ぼす列車振動の影響に関する実験, 銭高組技報, No.8, pp.60-69, 1984