

場所打ち高強度コンクリートの検討 — (仮称) 朝潮運河歩行者専用橋—

三井住友建設(株) 技術研究所 正会員 博士(工学) ○谷口 秀明
 三井住友建設(株) 東京土木支店 龍本 信春
 三井住友建設(株) 東京土木支店 正会員 古賀 友一郎
 三井住友建設(株) 土木設計部 正会員 修士(工学) 水田 武利

キーワード：PC歩道橋，高強度コンクリート，低熱ポルトランドセメント，自己充填性

1. はじめに

(仮称) 朝潮運河歩行者専用橋(発注者：東京都中央区)は、橋長87.8m、有効幅員4.5~5.5mのPC3径間連続ラーメン橋である¹⁾。取付け道路と中央径間下の航路制限高さから桁高を低くする必要があり、設計基準強度70N/mm²の高強度コンクリートを使用することになった。

しかし、橋梁上部工において、設計基準強度が60N/mm²を超える高強度コンクリートの場所打ち工法を適用した事例は極めて少ない。高粘性のコンクリートをコンクリートポンプで圧送する必要があること、橋体内部には全長にわたって密に送電管が配置され、円筒型枠が存在する区間があることなどから、使用する高強度コンクリートには高い流動性および充填性が求められる。その一方で、特に縦断方向にはこう配が最大5%近くになる区間があるため、コンクリートの流動抑制や表面仕上げなどの方法を

検討する必要がある。このように、本橋に設計基準強度70N/mm²の高強度コンクリートを適用するにあたっては、事前に検討すべき施工上のさまざまな課題があることが明らかになった。

本報は、使用する高強度コンクリートの特徴的な品質、温度応力解析によるセメントの種類を選定、実機試験によるコンクリートの品質安定性、経時および圧送による品質変化、模擬試験体を用いた流動抑制、橋面仕上りおよび充填状況の結果をまとめたものである。

2. コンクリートの条件

コンクリートの使用材料および配合を、それぞれ、表-1、表-2に示す。選定したレディーミクストコンクリート工場(以下、生コン工場と呼ぶ)のセメントサイロなどの条件より、セメントは、普通ポルトランドセメント(N配合)もしくは低熱ポルトランドセメント(L配合、ただし、首都圏の建築工事で使用される比較的初期強度が高いもの)の選択が可能であった。

N配合コンクリートは初期材齢における強度発現性に優れるが、高粘性による圧送性や充填性の低下、温度応力および自己収縮によるひび割れ、高温履歴に伴う構造体コンクリート強度の低下などが懸念された。そこで、机上での総合的な検討を行った結果、L配合を使用する方向で詳細検討を進めることになった。なお、本報では比較としてN配合コンクリートの結果を一部併記しているが、N配合は標準水中養生供試体の圧縮強度が材齢28日でL配合とほぼ一致するように水セメント比を定めたものである。

表-1 使用材料

材料名	種類	産地・銘柄	記号
水	工業用水		W
セメント	低熱ポルトランドセメント	密度3.22g/cm ³	L
	普通ポルトランドセメント	セメントLとの比較用、密度3.16g/cm ³	N
細骨材	山砂	千葉県富津市鶴岡産、表乾密度2.58g/cm ³ 、粗粒率2.00、混合比率60%	S1
	砕砂(石灰石)	青森県八戸市松館産、表乾密度2.69g/cm ³ 、粗粒率3.60、混合比率40%	S2
粗骨材	砕石2005(石灰石)	山口県美代市伊佐産、表乾密度2.69g/cm ³ 、実積率61.0%、混合比率70%	G1
	砕石2005(石灰石)	青森県八戸市松館産、表乾密度2.69g/cm ³ 、実積率61.0%、混合比率30%	G2
混和剤	高性能AE減水剤	標準形、ポリカルボン酸系	SP

表-2 コンクリートの配合

配合名	水セメント比 W/C(%)	細骨材率 s/a(%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	SP
L配合(選定)	28.1	47.2	170	605	757	869	10.29
N配合(比較)	29.2	46.6	175	600	739	869	9.60

いずれの配合も空気量は3%

3. 温度応力解析によるセメントの種類の設定

L配合とN配合に対して、コンクリートの非線形応力解析ソフト (ASTEAM-MACS) を使用し、応力解析を行った。解析モデルは、対称性を考慮して1/4モデルとした。橋脚部はクリープ・乾燥収縮が終了した既設構造物として計算し、解析ステップは、支保工施工部、台船架設部、間詰め部、目地部のコンクリート打設の順とした。解析に入力する諸値は、示方書²⁾に基づき算出したが、断熱温度上昇特性については実際に使用するセメントの製造会社が発行する技術資料の値を用いた。

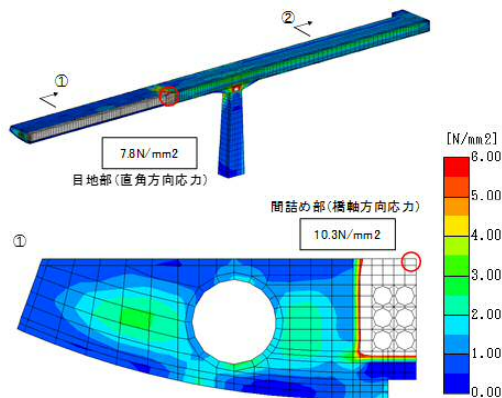


図-1 解析結果の例 (N 配合)

図-1および表-3は、温度応力解析結果の一例である。後打ちとなる間詰め部および目地部にN配合コンクリートを用いると、セメントの水和に伴う体積変化 (主に自己収縮) の外部拘束により過大な応力が発生した。膨張材の使用についても検討を行った結果、引張応力が1N/mm²程度低下する程度であった。一方、L配合を用いると、発生する引張応力は3N/mm²程度になる。これらの結果をもとに、L配合 (低熱ポルトランドセメント) を使用する方針とした。なお、L配合を実際の工事に適用するにあたっては、実橋模擬試験体の温度変化、施工時の環境温度や施工方法などを考慮した解析を再度実施した。

表-3 配合の違いによる発生引張応力の比較 (一例)

検討 CASE	コンクリートの配合の組合せ						引張応力 (N/mm ²)	
	支保工部・台船架設部		間詰め部・目地部				間詰め部 (橋軸)	目地部 (直角)
	N配合	L配合	膨張材なし	膨張材あり	N配合	L配合		
1	○						10.3	7.8
2	○					○	9.0	6.9
3		○		○			2.8	2.6
4		○				○	1.9	2.3

4. 室内試験による硬化コンクリートの品質の確認

本橋への適用にあたり、高強度コンクリートのさまざまな品質を確認しているが、ここでは、その中で特徴的なものとして圧縮強度と体積変化の試験結果を紹介する。

コンクリートの材齢と圧縮強度の関係を、図-2を示す。

圧縮強度試験は、JIS A1108に準じ、Φ100×200mmの円柱供試体を用いて、所定の材齢 (L配合 : 3, 7, 14, 28, 56, 91日, N配合 : 3, 7, 28日) まで標準水中養生を行った供試体を用いた。両配合の圧縮強度は、計画 (2.に前述) どおり、材齢28日においてほぼ一致する結果となった。一方、初期強度は、N配合では材齢7日で設計基準強度70N/mm²を超えるのに対し、L配合では材齢14日で設計基準強度70N/mm²相当に達した。このように、L配合を用いる場合には、初期の強度発現が緩やかであるため、N配合よりも長い期間、適切に養生を行う必要がある。ただし、実橋はマスコンクリート部材であるため、初期材齢から円柱供試体よりも水和が急激に進行する。たとえば、実橋への初回打設時 (12月) に熱電対を埋め込んで測定したコンクリート温度の結果では、部材中心部で約4日、表面から深さ10cm程度の位置で約5日で、標準水中養生供試体の材齢7日に相当する積算温度 (210° D・D) に達した。実橋の養生期間はこれらの結果を踏まえて決定した。

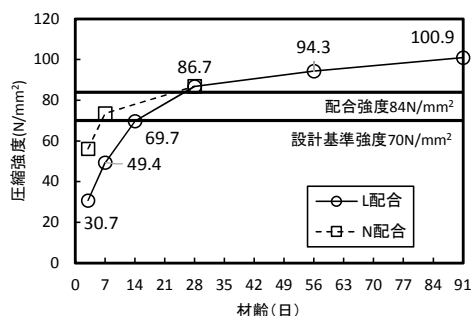


図-2 材齢と圧縮強度の関係

自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみの時刻歴変化を、図-3に示す。自己収縮は、(公社)日本コンクリート工学会「高流動コンクリートの自己収縮試験方法」を参考に埋込みひずみ計で測定した。乾燥収縮は、JIS A 1129-2 (コンタクトゲージ法) に準じて測定を行った。L 配合の自己収縮ひずみは、N 配合に比べて相当に小さいことが明らかである。自己収縮ひずみの試験値は、示方書²⁾による

計算値と比べ、N配合の約50日以前の変化がやや緩やかであるが、おおよそ、一致している。L配合の試験値が計算値よりも若干大きいのは、低熱ポルトランドセメントが通常よりも初期強度発現性を改善したものを使用したことも起因している。一方、JIS法で測定された乾燥収縮ひずみは、L配合とN配合で大幅な相違が認められず、乾燥期間6ヶ月の乾燥収縮ひずみは 550×10^{-6} 程度である。ただし、N配合では乾燥開始材齢7日以降の自己収縮の増大量が大きいため、JIS法で測定された試験値から自己収縮ひずみを除いた真の乾燥収縮ひずみは、L配合がN配合よりも大きくなる。

5. 製造・運搬試験によるコンクリートの品質の確認

5.1 実機ミキサを用いた製造およびトラックアジテータを用いた場外運搬の影響

生コン工場の実機ミキサ（公称容積：3.25m³、形式：強制二軸ミキサ）を用いて、1バッチ当たり2.0m³のコンクリートを製造し、2バッチ分を大型アジテータトラックに積載した。生コン工場から現場までの運搬試験（台数：7台、全実施時間：約3.5時間）を実施した。なお、4台目と6台目は荷卸し試験を、7台目は圧縮強度供試体の採取を行っていない。

フレッシュコンクリートの品質は、スランプフロー（JIS A 1150による、ただし、結果は2方向測定値の平均値で表す）および50cmフロー到達時間（JSCE-F 516-2012による）、U型充填高さ（JSCE-F 511-2012による、自己充填性ランク2相当）、V漏斗流下時間（JSCE-F 512-2012による）および空気量（JSCE-F 513-2013による）で評価した。圧縮強度供試体は、現場で採取し、生コン工場まで運搬後に材齢28日まで標準水中養生を行った。表-4に示すとおり、L配合は、U型充填高さが300mm以上であり、自己充填性ランク2相当の高流動コンクリートとして扱うこととした。ただし、V漏斗流下時間は20秒前後になるため、一般の高流動コンクリート（試練り時の目標値：7~20秒）に比べると粘性が高い。荷卸し時のコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度の双方とも安定しており、また、圧縮強度は図-2に示す室内試験の結果とほぼ同等の結果が得られている。

5.2 コンクリートポンプによる圧送（場内運搬）の影響

大型コンクリートポンプ（理論最大吐出量160m³/h、理論最大吐出圧8.5MPa）と輸送管5Bを用いて、水平換算距離で50m程度の圧送試験を実施した。水平換算距離が50m程度であっても、吐出量を大きくすると、コンクリートの管内圧力が著しく増加し、コンクリートの品質変化が大きくなる³⁾可能性があるため、ポンプ車の吐出量は20m³/h程度に設定した。コンクリートの品質の評価方法は4.1と同様である。圧送試験には、1台目および2台目のアジテータトラックに積載したコンクリートを用いた。

表-5に示すとおり、表-4に示す荷卸し時の試験値と比べると、スランプフローは圧送により5cm程度小さくなる（流動性が低下する）傾向がある。ただし、図-4に示すアジテータトラック2台目のスランプフローの経時変化を確認した結果に圧送後の試験値を重ねると、圧送によるスランプフロー

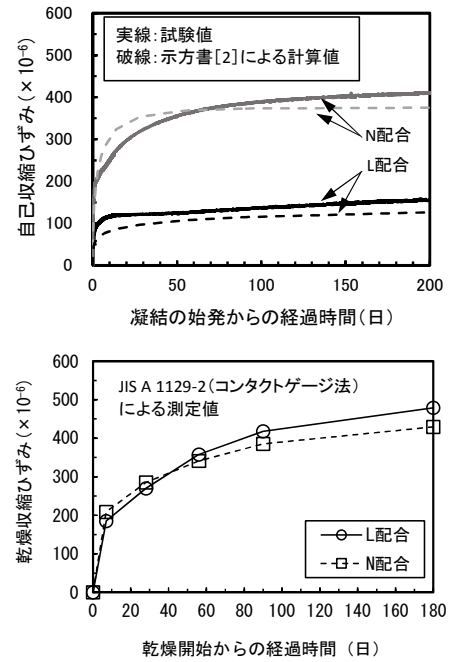


図-3 自己および乾燥収縮ひずみの時刻歴変化

表-4 荷卸し試験の結果

トラックアジテータ(台目)	スランプフロー(cm)	50cmフロー到達時間(s)	U型充填高さ(mm)	V漏斗流下時間(s)	空気量(%)	圧縮強度(N/mm ²)
1	68.2	5.0	347	23.0	1.3	88.9
2	66.4	5.6	350	22.2	1.3	90.1
3	64.3	5.8	339	27.2	1.4	89.8
5	68.8	4.0	353	17.1	1.6	86.7
7	68.9	4.7	352	18.1	1.6	-

コンクリート温度23~24°C

表-5 圧送後の試験結果

トラックアジテータ(台目)	出荷からの経過時間(分)	スランプフロー(cm)	50cmフロー到達時間(s)	U型充填高さ(mm)	V漏斗流下時間(s)	空気量(%)	圧縮強度(N/mm ²)
1	50	61.7	4.2	343	13.3	1.6	88.9
2	33	62.1	4.8	351	13.7	1.6	89.5
	123	58.7	6.5	-	-	1.7	-

コンクリート温度23~24°C

の変化には経時変化の影響も含まれることがわかる。また、V漏斗
 流下時間は圧送後に13~14秒になっており、圧送による粘性の低下
 が確認された。ただし、U型充填高さは圧送前とほぼ同値であり、
 自己充填性の低下は認められない。なお、空気量が圧送後に微増して
 いるが、圧縮強度に影響するほどの増加ではない。

6. 模擬試験体による高強度コンクリートの施工性の検討

場所打ちの径間はこちら配が最大で約5%となるため、流動性が高い
 高強度コンクリートの流動抑制とこれを適用した場合の橋面仕上
 り（表面気泡の程度など）が課題となった。そこで、写真-1に示
 す実橋の模擬試験体（寸法：高さ1m×幅2m×長さ12m、縦断こう配：
 5%）により、流動抑制方法として合板製伏せ型枠を用いた施工性試験
 を実施した。内側に透水性シートを貼り付け、表面気泡の抑制効果
 を確認した。伏せ型枠は、あらかじめ全上面に設置すると、コンク
 リートの充填状況を確認できず、部分的に低い箇所を発生する可能
 性があるため、コンクリートの流動状況を確認しながら設置してい
 った。各伏せ型枠の順序やタイミングをよく考えて設置する必要が
 あるが、実際の工事で十分に対応できるものと判断された。また、
 写真-2に示すとおり、透水性シートを使用することで、気泡の発
 生によるくぼみが大幅に低減できることが判明した。以上の結果より、実
 施工では、透水性シートを張り付けた伏せ型枠を使用することとした。

模擬試験体を切断し、コンクリートの充填状況を確認した結果、写真-
 2に示すように切断面に未充填箇所は存在しなかった。すなわち、自己充
 填性ランク2の設定は妥当で、U型充填高さの確認で充填性を担保できる。

7. おわりに

PC 歩道橋への適用に向けて、低熱ポルトランドセメントを用いた設計基
 準強度 70N/mm² の高強度コンクリートの品質を確認し、実施工に向けた検討
 を行った。検討の結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 実機ミキサを使用して、自己充填性ランク 2 相当の高強度・高流動コ
 ンクリートを安定した品質で製造できる。
- (2) 圧送により流動性が低下するとともに、粘性も低下する傾向がある。
 ただし、それらの変化が生じて、本実験の範囲では自己充填性を確保
 できる。
- (3) こう配を有する橋面に対する、透水性シートを内側に貼り付けた伏
 せ型枠の使用は、コンクリートの流動抑制と橋面の仕上り向上の効
 果が期待できる。

参考文献

1) 野田誠ほか：高強度コンクリートを用いた PC 橋の建設（仮称）朝潮運河歩行者専用橋一、プレ
 ストレストコンクリート工学会第 25 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文
 集（投稿中）
 2) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，2013. 3
 3) 谷口秀明ほか：高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，
 Vol. 22, No. 2, pp. 1015-1020, 2000. 7

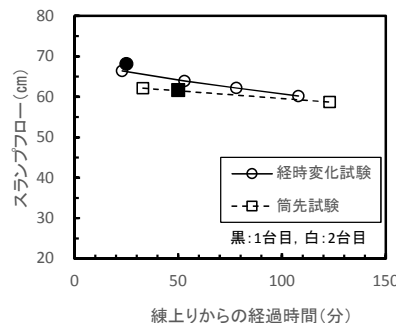


図-4 スランプフローの経時・圧送変化



写真-1 模擬試験体の外観



写真-2 橋面の仕上り状態



写真-3 模擬試験体の切断面における充填状況