

蒸気養生で製造するコンクリートの品質向上に関する早強剤の効果

オリエンタル白石(株) 技術研究所 正会員 ○中村 敏之
 オリエンタル白石(株) 関東工場 北澤 利春
 オリエンタル白石(株) 関東工場 並木 昌幸
 愛知工業大学 工学部土木工学科 正会員 吳 承寧

Abstract : The experiment on the pre-tensioned prestressed concrete members manufactured by steam curing was carried out. It is clear that there is a good relationship between Proctor penetration resistance at start of steam curing and surface quality of the concrete. And it was given in this paper that the quantitative setting situation of concrete at start of steam curing which doesn't make the quality fall. However, in the winter when the setting time is delayed, the setting time of concrete at start of steam curing becomes long to secure the quality. So, some Proctor penetration resistance tests on the concrete used a accelerator were carried out to reduce the setting time of concrete. As a result, the setting situation of concrete at start of steam curing was improved. The surface quality of the concrete didn't fall.

Key words : Pre-tensioned girder , Steam curing , Proctor penetration resistance, Surface quality

1. はじめに

プレテンション桁¹⁾などのPC工場製品は、蒸気養生で製造することで早期強度が高くなるため、翌日にプレストレス導入ができ、型枠から移動することができる。そのため、有効に型枠が転用できることで、効率的な製造方法を実現している。しかし、一方で、初期に高い温度を受けるため、十分な前置き時間を確保しないと硬化後の表層品質が低下し、さらに、仕上げ面に浮きや剥がれなどが生じる場合がある。これまでに筆者らは、コンクリートの練上りから蒸気養生を開始するまでの前置き時間に着目し、図-1に示すように、前置き終了時のプロクター貫入抵抗値で評価する凝結の程度と硬化後の仕上げ面における透気性・透水性などの表層品質が相関しており、前置き終了時のプロクター貫入抵抗値が大きいほど、透気性・透水性が向上することを示した。それにもとづいて、前置き時間を定量的に決定する指標として、剥がれが生じない最低限の品質を確保するためには前置き終了時の

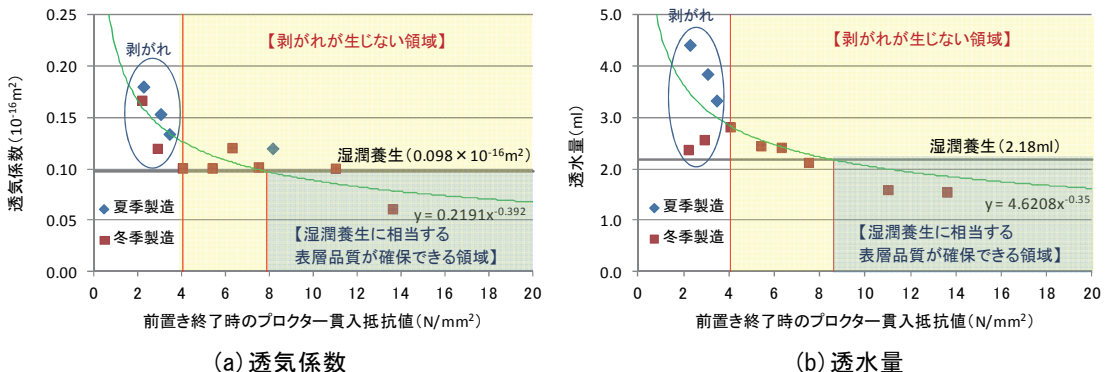


図-1 表層品質を満足するための凝結の程度

プロクター貫入抵抗値が 4.1N/mm^2 以上、蒸気養生によって透気性・透水性を低下させることなく湿潤養生と同等の品質を得るためには 8.5N/mm^2 以上、を目安にして蒸気養生を行えばよいことを提案した²⁾。しかしながら、凝結が遅延する冬季においては、品質を確保するための前置き時間が長くなり、製造効率が低下する可能性があった。そこで、品質と製造効率の両者を確保するための対策を検討し、その効果を実験的に確認することとした。

2. 品質と製造効率を確保するための課題と対策の検討

2.1 課題

一般的なプレテンション桁の製造サイクルでは、鉄筋組立、P C鋼材配置・緊張、型枠組立、打込みの作業のうち、夜間に蒸気養生を行い、翌日の朝に脱型、プレストレス導入、型枠から桁部材の移動を行う。これらを効率的な24時間サイクルで行うためには、鉄筋組立や緊張などの作業時間を差し引くと、養生期間（コンクリートの練上りから脱型まで）を18時間程度以内とする必要がある。このうち、脱型時に必要な強度を得るための蒸気による養生促進時間を考慮すると、前置き時間を6時間以内とすることが望ましい。しかしながら、冬季製造においては凝結が遅延するため、前置き終了時のプロクター貫入抵抗値が 4.1N/mm^2 以上となるには8~9時間程度要する場合があり、大幅に凝結時間を短縮する必要があった。

2.2 対策方法

近年、コンクリートの凝結・硬化を促進する早強剤（材）の使用が注目されている。既往の研究³⁾では、カルシウムシリケート化合物（C-S-H）の種結晶を液相中に導入することで硬化を促進させる早強剤（ACX）を使用することで、エーライトの反応を促進し、凝結が著しく促進したと報告されている。そこで、従来のプレテンション桁のコンクリートにACXを使用し、その添加率と凝結特性および強度発現性の関係性を確認することとした。また、ACXの使用が製造効率へ与える効果と硬化後のコンクリートの品質に与える影響を確認することとした。

3. 早強剤を使用したコンクリートの性能確認実験

3.1 実験概要

実験は室内実験と実物大試験体による実験を行った。表-1に実験で用いたコンクリートの使用材料を、表-2に基本配合（ACXを添加しない従来の配合）を示す。室内試験ではACXの使用による基礎物性を確認することを目的とし、ACXの添加率を要因として、プロクター貫入抵抗値および練上りから18時間後（一般的な脱型時の材齢を想定）の圧縮強度を測定した。その結果を比較し、製造効率が確保できるACXの添加率を決定した。実物大実験では、ACXを使用しない従来の配合と室内実験で決定した添加率のACXを使用したコンクリートをそれぞれ実機ミキサで練り混ぜ、実物大のプレテンション桁用の型枠を用いて、実物レベルでの諸性能を確認した。

表-1 コンクリートの使用材料

材料	記号	種類
水	W	上水道水
セメント	C	早強ポルトランドセメント (密度: 3.14g/cm^3)
細骨材	S	桜川市飯渕産硬質砂岩 砕砂 (表乾密度: 2.62g/cm^3 , FM: 2.71)
粗骨材	G	桜川市飯渕産硬質砂岩 砕石 (表乾密度: 2.65g/cm^3 , FM: 6.76)
混和剤	SP	ポリカルボン酸系 高性能AE減水剤

表-2 コンクリートの基本配合

設計基準強度 (N/mm^2)	粗骨材 最大寸法 (mm)	スラブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m^3)				
						W	C	S	G	SP
50	20	12.0	4.5	38.0	42.0	150	395	748	1041	3.16

3.2 室内試験

(1) 実験方法

実験は冬季製造を再現する目的で、室温 5°C の一定環境の中で行った。ACX の添加率はセメント質量に対し、0%、0.5%、1%、1.5% を練混ぜ水の内割りとした。なお、事前に添加率 2% で凝結特性を測定した結果、プロクター貫入抵抗値が 4.1N/mm^2 に達する時間が 3.3 時間と製造効率を十分に満足するものであったことから、実験における添加率の範囲を決定した。それぞれで 0.045m^3 のコンクリートを練り混ぜ、フレッシュ性状を確認後、JIS A 1147 に準じて、プロクター貫入抵抗値を測定した。また、円柱供試体を作製し、材齢 18 時間、3 日、7 日の圧縮強度を測定した。なお、円柱供試体は図-2 に示す養生条件で蒸気養生を行った。前置き時間はプロクター貫入抵抗値が 4.1N/mm^2 となった時点とし、材齢 18 時間で脱型後、所定の試験材齢まで外気温 5°C で気中養生した。

(2) 実験結果

表-3 にスランブ、空気量およびコンクリート温度の測定値を示す。スランブは目標スランブに対し $\pm 1.0\text{cm}$ 以内、空気量は目標空気量に対し $\pm 0.5\%$ 以内となるようにした。コンクリート温度は $12.7 \sim 13.8^\circ\text{C}$ の範囲でほぼ同等であった。図-3 にプロクター貫入抵抗の測定値を示す。添加率 0% に対し、添加率の増加とともに凝結が促進され、とくに添加率 1% と添加率 1.5% は著しく凝結が促進した。図-4 にプロクター貫入抵抗値 4.1N/mm^2 に達する時間を示す。添加率 0% では前置き時間が 8.1 時間であったことに対し、ACX を添加することでいずれも前置き時間が短縮され、添加率 1% では 5.1 時間、添加率 1.5% では 4.6 時間となり、製造効率が十分に確保できる前置き時間を満足した。図-5 に圧縮強度の結果を示す。凝結の促進と同様に、いずれの材齢においても ACX の添加率の増加とともに圧縮強度が大きくなった。図-6 に材齢 18 時間における ACX の添加率 0% に対する各添加率の圧縮強度の比を示す。ACX の添加率に対し、圧縮強度は直線的に増加する傾向が見られ、添加率が多いほど強度発現性が高く、添加率 0% と比較し、添加率 1.5% では圧縮強度が 10% 増加した。

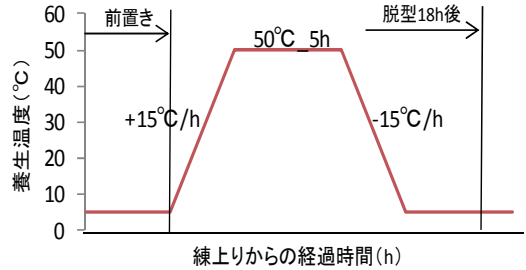


図-2 室内試験の養生条件

表-3 フレッシュ性状

ACX添加率 (C×mass%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
0	12.0	4.2	13.8
0.5	13.0	4.5	13.6
1	12.5	4.4	12.7
1.5	13.0	4.7	12.7

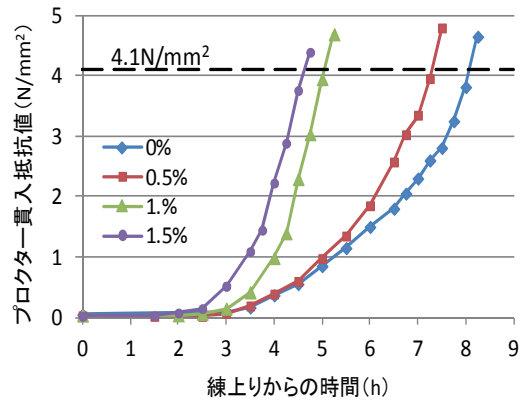


図-3 プロクター貫入抵抗値

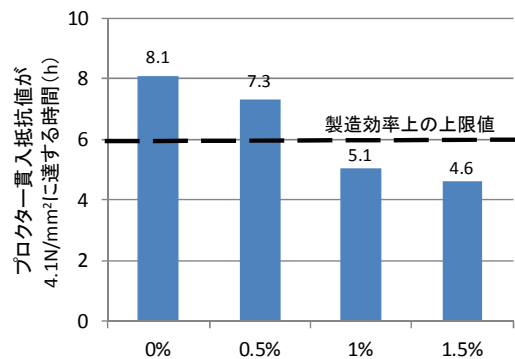


図-4 前置き時間

(3) 考察

蒸気養生において凝結が遅延し、最低限の品質を確保するための前置き時間が長くなることにより製造効率が低下するような場合には、ACXの添加率を1%あるいは1.5%とすれば、凝結が大幅に促進され、十分に製造効率が確保することができるとわかった。また、同じ養生条件では、ACXの添加率が増加するほど脱型時強度が大きくなることわかった。強度発現性の向上は、脱型時に必要な強度を得るための養生温度が低減できる可能性を示唆している。これまでに筆者らは、蒸気養生でコンクリートを製造する場合でも、初期強度は積算温度に比例することを示した⁴⁾。ここで、積算温度を試算すると、本実験の室内試験で設定した養生温度から材齢18時間までおよそ540℃・hとなる。圧縮強度と積算温度の比例関係から、圧縮強度が10%増加した分の積算温度を低減するとおよそ490℃・hとなり、養生条件における最高温度を50℃から44℃に低減できることとなる。蒸気による養生温度の低減は、A重油の使用量を減らすことができるため、環境負荷低減や経済性に貢献し、また、硬化後のコンクリートに与える悪影響も低減される。そのため、よりその効果を得るためには、仕上げなどの作業が可能な範囲で、ACXの添加率を大きくすることが望ましいと考えられる。したがって、実物大実験では、ACXの添加率1.5%について諸性能を確認することとした。

3.3 実物大試験体による実験

(1) 実験方法

実験は練混ぜ時の外気温が12℃の冬季に行った。ACXの添加率は0%と1.5%の2種類とし、それぞれを添加したコンクリートを実機ミキサで1.2m³練り混ぜ、写真-1に示すJIS A 5373のプレテンション方式スラブ橋げた用の型枠を組み立てた実物大試験体に打込むものとした。実物大試験体は高さ650mm、長さ2,400mmとし、鉄筋やPC鋼材は配置しないものとした。練り混ぜ後、実物大試験体にコンクリートを打込むと同時に、練混ぜバッチからJIS A 1147に準じた試料を採取し、プロクター貫入抵抗値を終結まで測定した。また、実物レベルの水和発熱性を比較するため、実物大試験体の中心部のコンクリート温度の経時変化を測定した。それぞれの実物大試験体は同じ手順で製造することとし、打

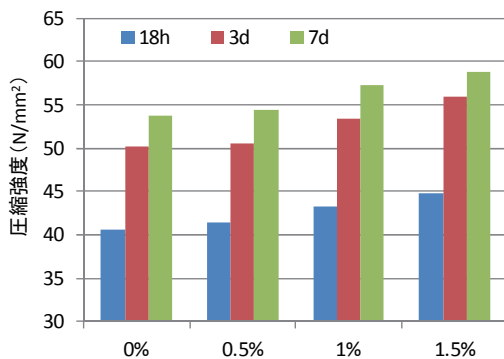


図-5 圧縮強度

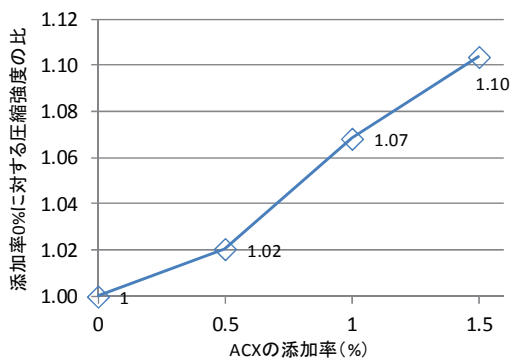


図-6 添加率0%に対する圧縮強度の比



写真-1 実物大試験体

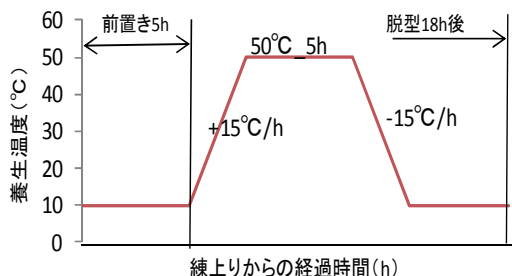


図-7 実物大実験の養生条件

込み性, 締固め性, 仕上げ性を目視で比較検証した。養生条件は図-7に示すものとし, 室内試験において ACX の添加率 1.5% の場合の最低限の品質を確保する前置きが 4.6 時間であったことから, 前置き時間は 5 時間とした。実物大試験体は練上りから 18 時間後に脱型し, 同一養生とした円柱供試体で圧縮強度を測定した。脱型後は, 仕上げ面の浮きや剥がれの有無を目視で確認し, 透気係数と透水量を測定した。透気係数はトレント法で材齢 7 日に測定し, 透水量は JSCE-K 571-2010 表面含浸材の試験方法 (案)⁵⁾ にもとづいて, 材齢 7 日に透水を開始し, 28 日間の透水量を測定した。表-4 に測定項目および評価・試験方法を示す。

(2) 実験結果

図-8 にプロクター貫入抵抗の測定値を示す。練上り温度が 19°C であったことから, 室内試験時よりも若干, 凝結の進行が早かった。前置き終了時のプロクター貫入抵抗値は, ACX の添加率 0% で 2.1N/mm², 添加率 1.5% で 17.3N/mm² であり, ACX を添加することで, 製造サイクルが確保できる前置き時間内でプロクター貫入抵抗値 4.1N/mm² 以上とすることができた。図-9 に実物大試験体中心のコンクリート温度の経時変化を示す。ACX の添加率 0% に対し, 添加率 1.5% は温度上昇が早く, 一方で, 最高温度が 3.2°C 低減した。また, それにともない温度降下が早まることから, 脱型時の温度ひび割れの発生に対して有利となると考えられる。写真-2 にコンクリートの打込み状況を示す。打込み, 締固め, 仕上げのいずれにおいても, 従来の作業性との相違はなく, 課題となる点はみられなかった。図-10 に圧縮強度の結果を示す。脱型時 (材齢 18 時間) における ACX の添加率 1.5% の圧縮強度は, 添加率 0% に対して, 18% 増加した。室内試験よりも増加率が大きい, 強度発現性の向上の傾向はみられた。写真-3 に硬化後の仕上げ面の状態を示す。前置き終了時のプロクター貫入抵抗値が 4.1N/mm² 以下であった添加率 0% では浮き・剥がれが生じた。一方, プロクター貫入抵抗値が 4.1N/mm² 以上であった添加率 1.5% では浮き・剥がれが生じなかった。図-11 に硬化後の仕上げ面の透気係数および透水量を示す。いずれも添加率 1.5% が小さな値となり, 透気性, 透水性ともに良好となることを示した。これ

表-4 測定項目, 評価・試験方法

測定項目	評価・試験方法
凝結特性	プロクター貫入抵抗値 (JIS A 1147)
水和発熱性	コンクリート温度の経時変化
製造性	打込み性, 締固め性, 仕上げ性 (目視)
強度発現性	材齢 18 時間の圧縮強度 (JIS A 108)
透気性	硬化後の透気係数 (トレント法)
透水性	硬化後の透水量 (JSCE-K 571)
仕上げ面の状態	浮き・剥がれの有無 (目視)

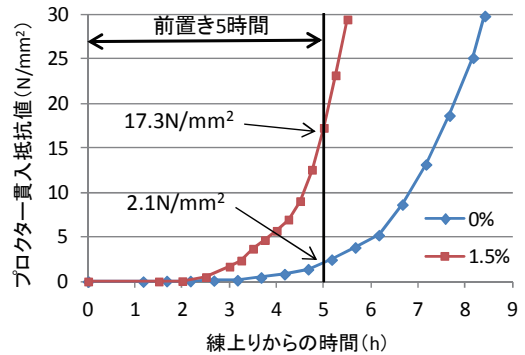


図-8 プロクター貫入抵抗値

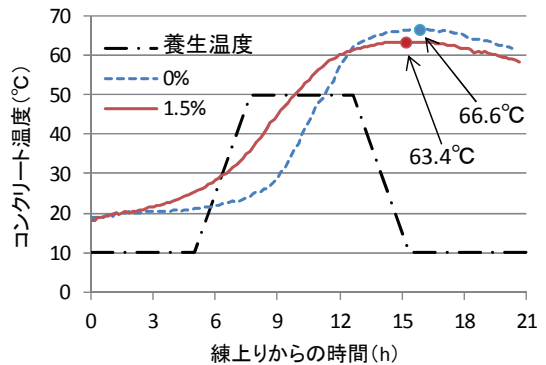


図-9 コンクリート温度の経時変化



写真-2 コンクリートの打込み状況



(a) ACX の添加率 0%



(b) ACX の添加率 1.5%

写真-3 硬化後の仕上げ面の状態

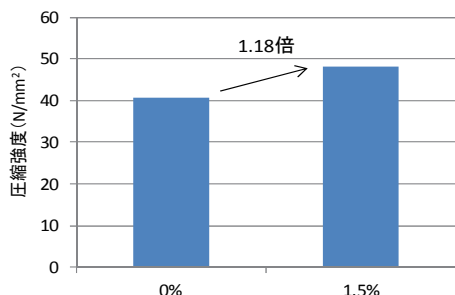


図-10 圧縮強度

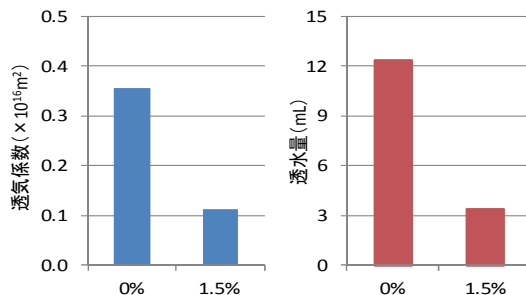


図-11 透気係数および透水量

らは、実物大レベルにおいても、前置き終了時の凝結の程度と硬化後の仕上げ面の品質に関係性があることを示しており、実製造において早強剤を使用することで品質を確保するとともに、製造効率を向上させることができることを示している。

4. まとめ

- 1) 室内実験では、早強剤をセメント質量に対し1.5%添加することで、品質を確保するために必要な前置き時間が3.5時間短縮し、材齢18時間後の圧縮強度が10%増加した。
- 2) 実物大試験体による実験では、早強剤をセメント質量に対し1.5%添加することで、製造効率を確保するために必要な前置き時間の終了時におけるプロクター貫入抵抗値が17.3N/mm²に達し、硬化後の仕上げ面の剥がれ・浮きが防止できた。また、仕上げ面の透気性および透水性が向上した。
- 3) このことから、早強剤を使用することで凝結が促進するため、凝結が遅延する冬季においても、製造サイクルに影響する前置き時間を短縮することができ、品質を確保するとともに製造効率を向上させることができることがわかった。
- 4) 同じ養生条件では、早強剤を使用することで脱型時強度が高くなるため、目標強度を得るために必要な養生温度を低減することができ、環境負荷低減や経済性に貢献できる可能性を示した。

参考文献

- 1) プレストレスト・コンクリート建設業協会：道路橋用橋げた 設計・製造便覧，2004.6
- 2) 中村，北澤，佐々木，呉：蒸気養生で製造されるコンクリートの表層品質，プレストレストコンクリート工学会第23回シンポジウム論文集，pp77-80，2014.10
- 3) 井元，小山，大野，佐藤：C-S-H系早強剤の早強ポルトランドセメントを使用したコンクリートへの効果，土木学会第69回年次学術講演会講演概要集，V-008，pp15-16，2014.9
- 4) 中村，北澤，前田，東：蒸気養生で製造されるコンクリートの温度上昇特性，プレストレストコンクリート工学会第22回シンポジウム論文集，pp183-188，2013.10
- 5) 土木学会：2013制定コンクリート標準示方書[規準編]，2013.11