

論文 高温履歴を受ける超遅延コンクリートの物性

大庭光商*1・斉藤啓一*2・高橋秀樹*3・井上 卓*4

要旨:橋台・橋脚のアンダーピニングにおいて、添梁のプレストレスの導入時に受替函体との拘束を無くすために境界部に超遅延コンクリートを使用した。この超遅延コンクリートは、添梁の水和発熱により高温履歴を受けるため、事前に室内試験等を実施し、その性状を把握し実施工を行った。

試験ならびに実施工の結果、超遅延コンクリートは、練上がり温度、養生温度等により凝結遅延性に顕著な影響を受けることがわかり、その性状を定性的に示すとともに、実構造物中の圧縮強度の管理法を示した。

キーワード:超遅延剤、添加量、養生温度、温度制御養生

1. はじめに

地下ボックスラーメン函体の構築にあたり既設橋台・橋脚が支障するためアンダーピニングを計画した。施工は、橋台・橋脚の前後に先行して1層1径間のボックス函体を構築し、橋台・橋脚にPC鋼材配置用の削孔を行う。次に橋台・橋脚の両側に添梁を設け、この添梁と橋台・橋脚をプレストレスにより一体化し、先行構築したボックス函体に受替えアンダーピニングを完了する(図1)。その後、橋台・橋脚の支障部を切断撤去し後行函体を構築し完成する。

添梁とボックス函体を一体化した後に添梁にプレストレス力を導入すると、添梁は函体の拘束を受け、プレストレスがロスするとともに、函体にも局部的に大きな応力が発生する。そこで、添梁のプレストレス導入時は添梁とボックス函体とが一体化しないように、添梁とボックス函体の境界面に部分的(t=50cm)に超遅延剤を用いたコンクリート(以下、超遅延コンクリート)を使用することとした。

超遅延コンクリートは、プレストレス導入までに所定の

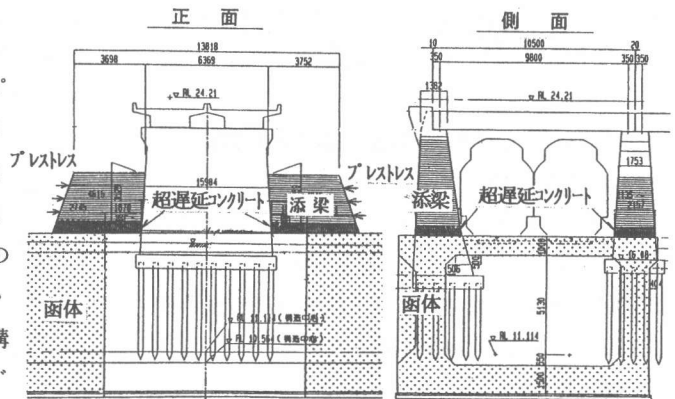


図1 アンダーピニング詳細

日数硬化を遅延させなければならないが、その後は速やかに硬化し、所要の強度を発現することが工事工程上重要となる。今回の目標硬化遅延日数は7日程度とした。

超遅延剤を多量に添加し、かつマップな添梁早強コンクリートの水和熱の影響を受ける超遅延コンクリートの性状は明確でない。

本報告では、超遅延コンクリートの使用に際しての室内試験、現場施工試験、および実施工の結果について述べる。

*1東日本旅客鉄道(株) 東北工事事務所 工事管理室係長(正会員)

*2東日本旅客鉄道(株) 東北工事事務所 工事管理室課長代理(正会員)

*3西松建設(株) 技術研究所 地質研究課副課長(正会員)

*4藤沢薬品工業(株) 特薬事業部主任

2. 超遅延コンクリートの試験

2.1 添梁部の温度解析

超遅延コンクリートを打設した後、添梁早強コンクリートを連続して層状に打設するため、マシブな添梁早強コンクリートの水和熱の影響を受ける。そこで、室内試験に先立ち、超遅延コンクリートが添梁から受ける水和熱の影響を把握するために、超遅延コンクリートを非発熱体と仮定し2次元FEM温度解析を実施した(表1)。解析の結果、早強コンクリートの水和熱が超遅延コンクリートに及ぼす影響は、境界部で27~42℃程度となった。

表1 温度解析結果

ケース	コンクリート打設温度	外気温	Q _{in}	γ	添梁コンクリート		緩衝部コンクリート		添梁 f _{ck} (N/mm ²)	
					最高温度(℃)	材齢(時)	最高温度(℃)	影響量(℃)		
1	15	10	52.5	1.18	63.5	60	37.0	48	27.0	30
			65.5	1.38	76.8	60	43.4	48	33.4	40
3	30	30	49.0	2.14	77.9	48	63.1	48	33.1	30
			62.0	2.28	90.8	48	72.3	48	42.3	40

ここに：Q_{in}：終局断熱温度上昇量，γ：温度上昇係数
影響量=緩衝部コンクリート最高温度-初期温度(ケース1, 2:10℃, 3, 4:30℃)

2.2 超遅延コンクリートの室内基本物性試験

(1) 試験概要

超遅延剤を用いたコンクリートの基本物性を確認するために、前述の2次元FEM温度解析による添梁の水和熱の影響を考慮した環境温度養生条件下において室内試験を実施した。

a) 使用材料

セメント：普通ポルトランドセメント(比重3.16)

細骨材：大和町・大郷産山砂(比重2.55)

粗骨材：高館山産砕石(最大寸法25mm, 比重2.60)

凝結遅延剤：オキシカルボン酸塩

b) 配合

コンクリートの配合を表2に示す。なお、超遅延剤およびAE減水剤は、単位水量の一部として計量し同時に添加した。

表2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	air (%)	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	4.5±1.5	159	338	694	1058	0.3	0.5~2.0

c) パラメータ

超遅延剤の添加率は、プラントにおける予備試験の結果から1.0~2.0%の範囲を基本とした。また、練上り温度は標準(20℃)と夏期施工

(30℃)を想定した2ケースとした。

養生温度は、標準養生20℃を比較基準用とし、事前のFEM温度解析による超遅延コンクリートの温度上昇量を35℃(平均値)と仮定し、これに練上り温度を加えた65℃、その中間の45℃とした。また、練上がり直後から高温の温度履歴を開始するまでの時間(以下、前置き養生期間)が及ぼす影響をみるために、20℃の養生期間を0~7日間に設定した。なお、供試体は乾燥を防ぐために封緘養生とし、20℃の場合は試験室内に、65℃の場合は恒温槽で2週間養生した後、試験室内にもどして20℃の養生を行った。

d) 試験ケース

試験ケースを表3に示す。

試験はシリーズ1により超遅延剤の添加率を決定した後、養生温度の影響、再現性の確認を行うためのシリーズ2、さらに前置き養生期間に着目したシリーズ3の追加試験を行った。

表3 試験ケース

シリーズ	ケース	練上り温度	養生温度	超遅延剤添加量 (C×%)			
				0.5	1.0	1.5	2.0
1	1	20℃	20℃		○	○	○
	2	30℃	65℃		○	○	○
2	3	30℃	45℃		○		
	4	30℃	20℃		○		
3	5	20℃	20℃		○		
	6	20℃	65℃	○	○	○	○

(2) 試験結果

a) 添加率・養生温度と圧縮強度の関係

図2は練上り温度を20℃とした時の超遅延剤の添加率・養生温度と圧縮強度の関係である。練上り温度20℃、養生温度20℃の標準養生時は、超遅延剤の添加率の増大にともないコンクリートの硬化遅延日数は顕著に長くなり、添加率1.0%で7日、1.5%で14日、添加率2.0%で21日以上遅延効果が認められる。

また、添加率の増大にともない圧縮強度の発現速度は遅く、添加率2.0%のものは材齢70日でも添加率1.0%の圧縮強度に追いついていない。

一方、練上り温度20℃、養生温度65℃の場合は、標準養生に比べると添加率による遅延効果の顕著な差はみられず、添加率1.5%と2.0%の強度発現が標準養生に比べると早まり、特に2.0%

では硬化の開始および圧縮強度の発現速度とも大幅に早まっている。逆に超遅延剤の添加率が1.0%の場合は、養生温度の高い方の強度発現が幾分遅くなっている。

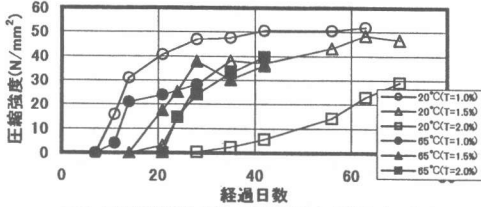


図2 添加率と養生温度の関係(練上がり温度20°C)

b) 添加率・練上がり温度と圧縮強度の関係

図3は養生温度65°C時の超遅延剤の添加率・練上がり温度(20, 30°C)と圧縮強度の関係である。練上がり温度が高くなると、添加率1.0, 1.5%では硬化の開始、および圧縮強度の発現速度とも遅くなるが、添加率2.0%では練上がり温度の影響はみられなくなる。また、練上がり温度が高い場合、圧縮強度の発現性状は、添加率の多少にかかわらず同様の傾向を示し、いずれも添加率2.0%の性状に近づいている。

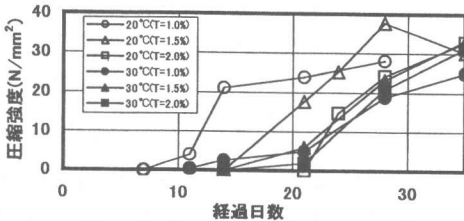


図3 添加率と練上がり温度の関係(65°C養生)

c) 養生温度の影響

図4に超遅延剤添加率1.0%時の養生温度別の圧縮強度発現性状を示す。なお、図には比較基準用に練上り温度20°C、養生温度20°Cのデータも示す。

練上り温度30°C、添加率が1.0%の場合は、養生温度が高くなる程、硬化の開始、および圧縮強度の発現速度は遅く、養生温度65°Cの場合は

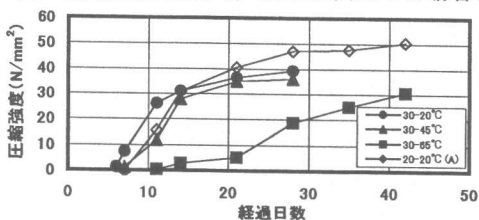


図4 養生温度と圧縮強度の発現性状(添加率:T=1.0%)

他に比べて特に顕著である。この原因としては、高温による水和の阻害や気泡の膨張等が影響しているものと思われる。

d) 再現性の確認

今回の室内試験から実施工への対応を考慮した場合、試験データの信頼性が重要となる。つまり、同一の材料を用いて、同一の条件下で試験を行っても同一の結果が得られなければならない。そこで、練上り温度20°C、養生温度20°Cの同一配合について日を改めて2回の試験を行い、再現性の確認を行った。試験結果を図5に示す。

硬化遅延日数は4日と7日程度で3日程度、圧縮強度の発現性についても幾分差は認められるものの、概ね同様の傾向にあると思われる。

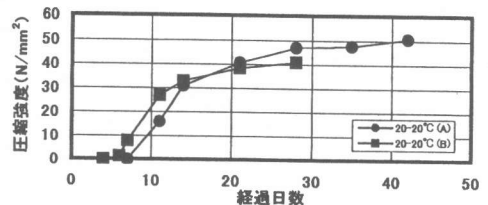


図5 再現性の確認試験(添加率:T=1.0%)

e) 前置き養生期間の影響

練上り温度が20°Cの場合について、養生温度20°Cの前置き期間を経た後に65°Cの保温養生を行った場合と、前置き期間を設けなくて練上り直後に65°Cの保温養生を行った場合とについて、異なる超遅延剤の添加率(T=0.5, 1.0, 1.5%)に着目して圧縮強度の発現性状を比較した。なお、図中の経過日数は、前置き養生の有無にかかわらず練上がり直後からを示す。

試験の結果、前置き養生期間は、圧縮強度の発現に大きく影響し、添加率0.5%の場合は、前置き養生1日、添加率1.0%の場合は、最も長く前置き養生を行った7日のケースのみ圧縮強度の伸びが顕著である(図6, 7)。しかしながら、圧縮強度の伸びが大きい前置き養生期間のもの程遅延効果は小さく、硬化の開始が早まる結果となっている。

添加率1.5%の場合は、前置き養生期間が長い程硬化の開始は遅くなるが、圧縮強度の大きさ

に顕著な違いは認められない(図8)。

一般に、超遅延剤を用いたコンクリートの硬化開始材齢は、添加率0.5%の場合15時間、添加率1.0%の場合6日、添加率1.5%の場合15日程度といわれており、今回の試験でも同様の傾向が確認された。添加率0.5、1.0%の場合は、硬化開始材齢よりも前置き養生期間を長く設定したことになり、逆に添加率1.5%の場合は、前置き養生期間が硬化開始材齢よりも短いことになる。このように、硬化開始材齢と前置き養生期間とは強度発現に密接に関係しており、硬化開始材齢以前に高温履歴を与えないことが圧縮強度の伸びを確保する上では望ましいことがわかった。

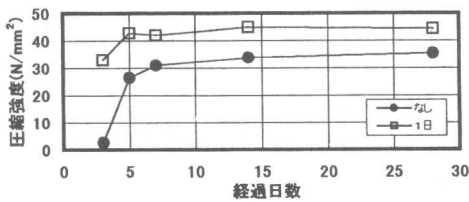


図6 前置き養生期間の影響(T=0.5% 65°C養生)

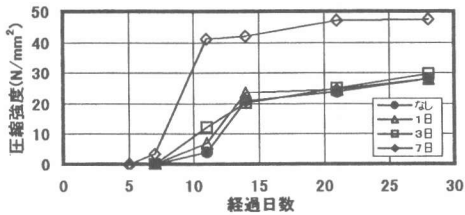


図7 前置き養生期間の影響(T=1.0% 65°C養生)

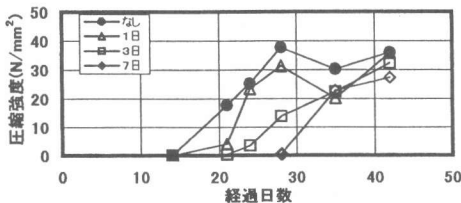


図8 前置き養生期間の影響(T=1.5% 65°C養生)

以上、シリーズ1~3の室内試験の結果、目標遅延日数の確保とその後の速やかな圧縮強度の発現を考慮した場合、超遅延剤の添加率は1.0%が妥当と判断し、以下の現場施工試験を実施した。

2.3 超遅延コンクリートの現場施工試験

(1) 試験概要

実施工で使用するプラントにて実機材料を用いて製造した超遅延コンクリートと早強コンクリートを層状に打

設した添梁部を模擬した試験体を製作し、室内試験で得られた超遅延剤の添加率と圧縮強度の発現性状の関係、超遅延コンクリートの硬化開始材齢、および圧縮強度の管理法等について検討を行った。なお、試験は添加率の異なる2配合について実施した。

a) 超遅延コンクリートの配合

超遅延コンクリートの配合を表4に示す。配合①の試験時に材料分離の傾向が認められたために、配合②では若干s/aを変更するとともに超遅延剤の添加率を変更した。なお、コンクリートの練上がり温度は、配合①が29°C、②が30°Cであった。

表4 超遅延コンクリートの配合

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/ml)				混和剤 (C×%)	
			W	C	S	G	AE減水剤	超遅延剤
①	47.1	40.1	159	338	694	1058	0.3	1.0
②	47.1	43.2			747	992		1.5

*混和剤は単位水量の一部として計量

b) 試験体形状と測定項目

図9に試験体および温度制御養生装置の概念を示す。添梁上部の早強コンクリートは、マスコンクリートとなるように $1m \times 1m \times 1m$ 、超遅延コンクリート部は $1m \times 1m \times 0.5m$ とした。また、境界部には打設時の状況、および硬化程度の確認のため、型枠に透明アクリル板を使用した。

実施工においては打設された超遅延コンクリートの硬化の開始と圧縮強度の発現性状の管理が重要となる。そこで、標準養生供試体と養生温度が試験体の温度変化に追従可能な温度制御養生装置を使用した供試体との圧縮強度の比較、および目視による試験体の硬化程度とを比較した。

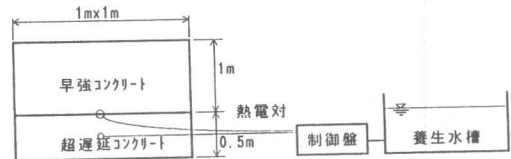


図9 温度制御養生装置の概念

(2) 試験結果

a) 超遅延コンクリートの特性

超遅延コンクリートはフリーティングが多い。このため、早強コンクリートとの境界部で部分的にフリーティングの水みちと思われる箇所、拳大で深さ3cm程度の範囲に未硬化しているのが数箇所見受けられた。

また、硬化程度の違い等の影響でコンクリート表面の仕上がりは、普通コンクリートに比べると悪く、できるだけ型枠の存置期間を長くする必要がある。

b) 温度

配合①試験体の温度測定の結果を図10に、また配合②については超遅延コンクリート中心部に着目した温度の測定結果を図11に示す。

配合①試験体の早強コンクリート中心部は、材齢12.5時間で最高温度96.8℃、早強コンクリートとの境界部の超遅延コンクリートは、材齢17.5時間で最高温度64.5℃（影響量35.5℃）、中心部は材齢48.5時間で最高温度46.0℃（影響量17℃）となった。

その後、超遅延コンクリート中心部において材齢72時間（3日）付近から超遅延コンクリート自身の水和発熱と思われる温度の再上昇が認められた。

配合②の超遅延コンクリート中心部は材齢約24時間で最高温度45.0℃となり、その後、材齢180時間（7日）付近から超遅延コンクリートの温度の再上昇（上昇量：6℃）が認められた。なお、境界部においても中心部程ではないものの、温度の再上昇の傾向が認められた。

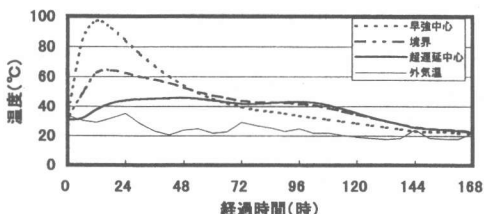


図10 温度の経時変化(配合①:T=1.0%)

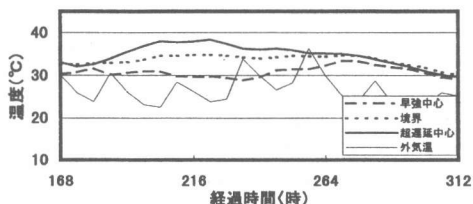


図11 温度の経時変化(配合②:T=1.5%)

c) 圧縮強度

図12に配合①、②の圧縮強度の発現性状を示す。図には標準養生供試体、および超遅延コンクリートの中心部の温度に対応した温度制御養生による供試体の圧縮強度を超遅延剤の各添加率毎に示す。

温度制御養生による供試体の圧縮強度試験の

結果より、添加率1.0%の硬化開始材齢は3日、1.5%は7日程度となっている。これは、前述の超遅延コンクリート自身の水和発熱による温度の再上昇時期と対応していることから、温度制御養生による供試体の圧縮強度は試験体の事象を良く捉えているものと思われる。

また、標準養生と温度制御養生とでは、硬化開始材齢に差がみられ、添加率1.0%では温度制御養生により高温履歴を与えた供試体の方が若干遅延効果が大きく、添加率1.5%では逆に標準養生供試体の方が遅延した。添加率1.0%では高温履歴が水和の開始時点まで及んだのに対し、添加率1.5%の場合、水和の開始時点（7日）では既に早強コンクリートの温度が低下しており、水和の開始時に高温履歴を受けなかったことが原因と思われる。

圧縮強度の発現は、標準養生（20℃水中）、中心部、境界部の順で低くなっており、高温履歴を受ける早強コンクリートとの境界部付近程、強度発現は悪く室内試験（図5）とも良く対応する結果となった（図13）

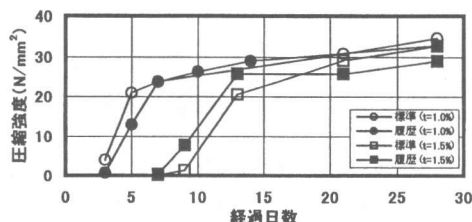


図12 温度制御養生装置による圧縮強度の管理

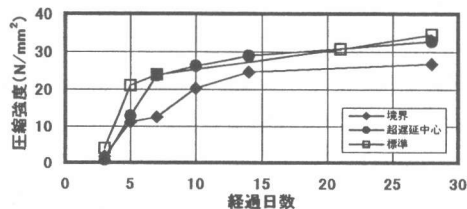


図13 部位別の圧縮強度発現性状

現場施工試験の結果、圧縮強度の発現は室内試験に比べて幾分早くなった。これは、室内試験とプラントとの練混ぜ方法等の違いが影響したものと思われ、実施工では目標の遅延日数を確保するために超遅延剤の添加率を1.5%とした。

3. 実施工

(1) 施工概要

添梁コンクリートの打込みは、橋脚が9月30日、橋台が10月14日であった。当日は、まず超遅延コンクリート約4m³を打ち込んだ後、早強コンクリート ($f'_{ck} = 40\text{N/mm}^2$) を静かに打設するとともに、界面には棒状パイルートを挿入し十分締固めを行った。また、プレストレス導入時点において、超遅延コンクリートが未硬化であること、およびその後の圧縮強度の発現性状を温度制御養生の供試体で管理するために熱電対を超遅延コンクリートの中心部に埋設した。以下に橋台の施工結果について示す。

(2) 施工結果

図14に各計測点における温度の経時変化を示す。超遅延コンクリートの打設温度は20℃で、境界部は材齢39時間後に最大温度59℃（影響量39℃）、超遅延中心部は72時間後に最大温度42℃（影響量22℃）となった。

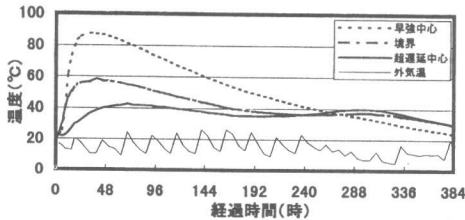


図14 橋台部添梁の温度の経時変化

添梁のプレストレス力の導入は、コンクリート打設3日目に行ったが、その時点では標準養生、および温度制御養生の供試体ともに圧縮強度は発現していないことを確認した。その後、材齢8日目から12日まで超遅延コンクリート中心部において5℃程度の温度の再上昇が認められた（図15）。標準養生、および温度制御養生の供試体による圧縮強度を図16に示す。

標準養生、および温度制御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、超遅延中心部の温度の再上昇時期とほぼ対応した。また、温度制御養生により高温履歴を受けた供試体は、標準養生の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、および現場施工試験と同様の結果が得られた。なお、

標準養生供試体は、材齢28日で温度制御養生による圧縮強度に追いついた。

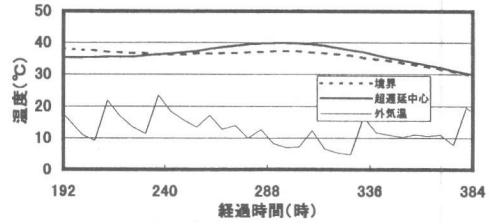


図15 超遅延部の温度の再上昇

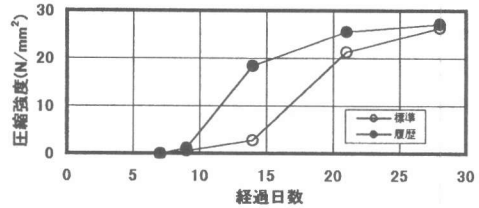


図16 橋台部添梁の圧縮強度

4. まとめ

各種パラメータに着目した超遅延コンクリートの室内試験、現場施工試験、および実施工の結果、以下の事項がわかった。

- (1) 超遅延剤を1.5%程度添加することによりコンクリートの硬化開始を7日程度コントロールできる。
- (2) 超遅延剤の添加率の影響は、標準養生の方が練上がり、および養生温度が高い場合に比べて顕著に表われ、超遅延剤の添加率が大きくなる程遅延効果は大きくなる。一方、添加率が小さい場合は（1.0%）、標準養生に比べて養生温度、および練上がり温度が高い程遅延効果は大きくなる。
- (3) 超遅延コンクリートの凝結開始前に高温履歴を与えると、圧縮強度の伸びは悪くなる。
- (4) 超遅延コンクリートの硬化開始材齢は、断熱状態におかれた実構造物の温度履歴において、温度の再上昇時期（水和発熱）に対応する。
- (5) 温度制御養生装置は、実構造物中の圧縮強度の管理に有効と思われる。

【参考文献】

- 1) 竹内徹・長瀧重義・大即信明・坂本健：フレッシュコンクリートの凝結時間の調節に関する基礎的研究，土木学会論文集，vol. 45, No9, pp985-992, 1996.9