

論文 高強度・超速硬グラウトモルタルの基礎物性

長谷川 聖史*1・伊達 重之*2・樋口 隆行*3・盛岡 実*4

要旨：超速硬セメントと急硬性混和材と凝結促進剤を組み合わせることにより、これまでにない高強度を早期に発現する超速硬グラウトモルタルの調製が可能となった。このグラウトモルタルは 20 分程度の可使時間を確保でき、材齢 4 時間で 40N/mm^2 以上の圧縮強さを発現する。そして、材齢 28 日では 80N/mm^2 以上の高強度を発現する。また、高強度を発現する一方で膨張性も発揮する。このため、継ぎ手や床版コンクリートとの強固な一体化に有効な材料であると考えられた。

キーワード：高強度, 超速硬, グラウトモルタル, 圧縮強さ, 膨張

1. はじめに

超速硬セメントが開発されて久しい^{1),2)}。超速硬セメントにはセメントタイプのものと急硬性混和材をポルトランドセメントに混合したタイプがあり、短時間で $20\sim 30\text{N/mm}^2$ 程度の実用強度を発現可能な水硬性材料である。この材料の開発によって、合理化施工技術も著しく進展し、今日では高速道路の増圧工法³⁾、緊急補修用モルタル⁴⁾、トンネルのプレライニング工法^{5),6)}などで実績をあげている。近年では、さらなる合理化施工や新たなニーズへの対応から、短時間でより高強度を発現する超速硬性材料の開発が強く求められている。例えば、プレキャスト床版工法において、床版と床版の間詰めに使用されるグラウトモルタルが挙げられる。プレキャスト床版を用いた道路の造成工事では、道路供用時間がグラウトモルタルの強度発現性に委ねられるためである。コンクリート製品であるプレキャスト床版の圧縮強度は 40N/mm^2 を超える。また、この工法ではプレストレスを導入する場合も多く見受けられる。ゆえに、プレキャスト床版工法で使用されるグラウトモルタルは短時間で 40N/mm^2 を超える高強度を発現す

ることが望まれている。しかしながら、現状では短時間で 40N/mm^2 以上を発現する超速硬グラウトモルタルは存在しない。このため、従来の超速硬グラウトモルタルを使用した場合には、打設から供用までに約 24 時間を見込んでいる。より高強度を発現する超速硬グラウトモルタルを開発できれば、さらなる合理化施工が可能となり、今後のコンクリート工学にとって非常に有益であると考えられる。

著者らは、超速硬セメントと急硬材と凝結促進剤を組み合わせることによって、十分な流動性や可使時間を有し、従来の超速硬グラウトモルタルよりも高強度を発現する高強度・超速硬グラウトモルタルを開発した⁷⁾。そのコンセプトは、20 分以上の可使時間を確保し、材齢 4 時間で 40N/mm^2 以上を発現するというものである。ここでは、この材料の基礎物性について詳細に報告する。

2. 材料開発のコンセプトと材料設計手法

2.1 材料開発のコンセプト

超速硬・高強度グラウトモルタルの具体的な目標物性を以下のように設定した。

*1 石川島建材工業(株)技術研究所 (正会員)

*2 石川島建材工業(株)技術研究所 課長代理 (正会員)

*3 電気化学工業(株)セメント・特混研究所 (正会員)

*4 電気化学工業(株)セメント・特混研究所 グループリーダー 博士(工) (正会員)

①圧縮強さ：20℃の環境において 4 時間で 40N/mm² 以上。

②可使時間：20 分以上。

③膨張率：JIS A 6202(B)による材齢 7 日の膨張率が 750～1250 (×10⁻⁶)。

2.2 材料設計手法

現在市販されている超速硬セメントに急硬性混和材や凝結促進剤を組み合わせることによって、さらなる強度増進の達成を試みた。モルタルの流動化は高性能減水剤を適用することにより、また、可使時間は凝結遅延剤を適用することによって確保することとした。

3. 実験

3.1 使用材料と配合

(1) 使用材料

本研究で使用した材料を表-1に示した。超速硬セメントは市販のものの中で強度発現性の最も良好なものを選定した（以下、A と表す）。急硬性混和材は非晶質カルシウムアルミネートと無水セッコウを主成分とするものを用いた（以下、B と表す）。凝結促進剤は無機系窒素化合物を選定した（以下、C と表す）。凝結遅延剤はオキシカルボン酸系化合物を用いた（以下、R と表す）。そして、高性能 AE 減水剤はポリカルボン酸塩系を採用した（以下、SP と表す）。

表-2に使用材料の基本配合を示した。B は A に内割置換して用いた。その置換率は 20（質量%）を基準とし、置換率を変えた系も実験検討した。C は A と B の合計に対して外割で 1（質量%）添加した。また、SP は A と B の合計に対して 3（質量%）を練り混ぜ水に置換して用いた。これは、メーカー指定の標準添加率の上限値に相当する。R は A と B の合計に対して 0.6 質量%を外割で配合した。表-2に示した様々な材料の組み合わせで調合された結合材を用いてモルタルを調製した。モルタルを調製する際の細骨材比率は、質量比で結合材 100 に対して 150 とした。水結合材比については、結合材の種類によって最適値が異なると思われるた

表-1 使用材料

略記	使用材料
A	超速硬セメント C ₃ S-C ₁₂ A ₇ 固溶体-無水セッコウ系
B	急硬性混和材 カルシウムアルミネート-無水セッコウ系
C	凝結促進剤 無機系窒素化合物
R	凝結遅延剤 無機炭酸塩とオキシカルボン酸の混合物
SP	高性能 AE 減水剤 ポリカルボン酸塩系

表-2 基本配合

結合材の略記	使用材料と配合割合（質量%）					
	A	B	C	R	SP	W
A	100	—	—	0.6	3	48, 50
A+B	80	20	—	0.6	3	46, 48
A+C	100	—	1	0.6	3	42
A+B+C	80	20	1	0.6	3	42

め、変化させながら最適値を求めた。なお、本研究の高強度・超速硬グラウトモルタルの比較として、普通ポルトランドセメントを用いて JIS R 5201 に準じて調製したモルタル（以下、普通モルタルという）や市販の超速硬グラウトモルタルも用いた。

3.2 実験項目と実験方法

(1) J₁₄ 漏斗流下時間と可使時間

J₁₄ 漏斗流下時間は JSCE-F 541 1999 「充てんモルタルの流動性試験方法」に準じて測定した。経時変化を確認するため、練り上げてから 20 分まで 5 分おきに測定した。可使時間は J₁₄ 漏斗流下時間が 15 秒を超え、実質的に十分な流し込みができなくなった時点とした。

(2) 圧縮強さ

モルタルの圧縮強さは、40×40×160mm の供試体を作製して JIS R 5201 に準じて測定した。

(3) 曲げ強度

40×40×160mm の供試体を作製して JIS A 1106 に準じて測定した。

(4) 長さ変化率

40×40×135mm の供試体を作製して JIS A 6202(B)に準じて測定した。

4. 実験結果および考察

4.1 J₁₄ 漏斗流下時間と可使用時間

図-1 に各種グラウトモルタルの J₁₄ 漏斗流下時間の経時変化を示した。図には結合材の種類とともに水結合材比も併記している。まず、A について見る。水結合材比を 48% とすると、練り上がり直後の J₁₄ 漏斗流下時間は約 5 秒となり、流動性の良好なモルタルとなった。しかしながら、経時変化が大きく、要求性能である 20 分の可使用時間を満足しなかった。そこで、水結合材比を 50% としたところ、J₁₄ 漏斗流下時間の経時変化は小さくなり可使用時間を満たした。よって、結合材 A を用いた場合の水結合材比は 50% に決定した。次に、A+B について見る。水結合材比を 46% とすると、練り上がり直後の J₁₄ 漏斗流下時間は約 7 秒となり、流動性の良好なモルタルとなったが、A と同様に経時変化が大きく、要求性能である 20 分の可使用時間を満足しなかった。そこで、水結合材比を 48% としたところ、J₁₄ 漏斗流下時間の経時変化は小さくなり可使用時間を満たした。よって、結合材 A+B を用いた場合の水結合材比は 48% に決定した。一方、A+C や A+B+C について見ると、水結合材比を 42% とかなり低めに設定しても要求性能である 20 分の可使用時間を満足した。なお、A や A+B を水結合材比 42% で練り混ぜたところ、流下しなかった。つまり、凝結促進剤 C は流動化剤として作用した。このように、凝結促進剤 C を配合した A+C や A+B+C では当初の予測とは全く異なる結果となった。つまり、凝結促進剤 C の添加により水和が促進され、むしろ流動性の確保が困難になると考えていたためである。C の添加によって J₁₄ 漏斗流下時間の経時変化も小さくなっていることから、この系では凝結促進剤である C が、流動化剤として働くばかりでなく、さらに流動性保持剤としても作用しているものと考えられる。

4.2 強度発現性

図-2 に各種グラウトモルタルの材齢 4 時間の圧縮強さを示す。なお、ここからは決定した

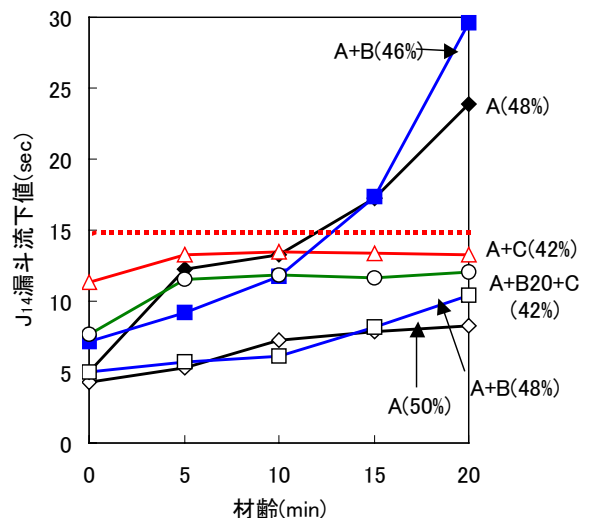


図-1 J₁₄ 漏斗流下値と可使用時間

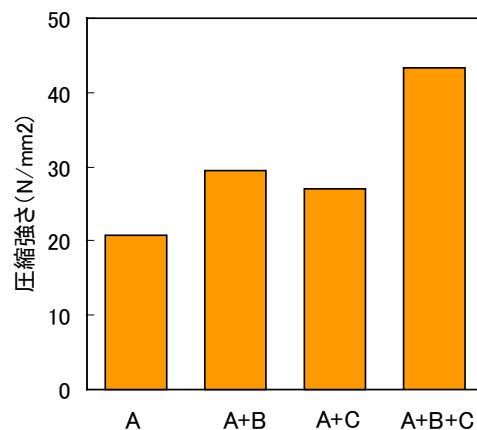


図-2 材齢 4 時間の圧縮強さ

水結合材比についてのみを対象とした結果を示す。また、強度発現性に関するデータは 3 本の供試体から求めたもので平均値として表している。A は約 20N/mm² の値を示した。一方、A+B は約 30N/mm² を示した。また、A+C は A よりも高い値を示したが、30N/mm² に達していない。このように、A、A+B、A+C はいずれも要求性能である 40N/mm² を満足しなかった。一方、A+B+C は 40N/mm² 以上を発現し、要求性能を満たした。A の圧縮強さが一番低い理由は、所定の流動性を得るために比較的高い水結合材比となったことに加えて、急硬性混和材 B を加えていないので急硬成分も多くないためと考えられる。A+B の圧縮強さが 40N/mm² 以上を満たせなかった理由は、急硬性成分は多く含むため A より高い圧縮強さを実現したが、所定の流動

性を得るために比較的高い水結合材比となったためと考えられる。A+C の圧縮強さが 40N/mm^2 以上を満たせなかった理由は、A と比べて所定の流動性を得るための水結合材比は低くすることができたので、A より高い圧縮強さを実現したが、急硬性成分の量が少ないため目標値を満足できなかったと考えられる。

図-3 に各種グラウトモルタルの材齢 28 日の圧縮強さを示す。A は 60N/mm^2 に達しなかった。A+B と A+C はいずれも 60N/mm^2 程度の値を示している。一方、A+B+C は 80N/mm^2 を超える高い強度を示した。本研究では長期的な強度発現性は要求性能に加えていないが、今回の実験結果より、 60N/mm^2 を超えるような高強度の用途への利用も可能と思われる。

以上より、可使時間の観点から、また、強度発現性の観点から、A+B+C が要求性能を満たすことが明らかとなった。そこで、A+B+C の強度発現性におよぼす各材料の配合割合、細骨材配合率などについて検討することとした。

図-4 に材齢 4 時間の圧縮強さに及ぼす B 成分の混和率の影響を示した。ここでは、B の配合割合だけを变化させ、その他の配合条件は一定として実験検討している。B の配合割合が 20（質量%）までは、配合割合が高くなるにつれて材齢 4 時間の圧縮強さも高くなっている。しかしながら、B の配合割合が 25（質量%）以上になると、むしろ圧縮強さは小さい値となった。つまり、急硬成分を増せば増すほど初期の強度発現性が良好となるのではなく、A と B の配合割合には最適値が存在すると思われる。以上より、B の配合割合は 20（質量%）の近傍に最適値が存在すると考えられた。

図-5 に材齢 4 時間の圧縮強さに及ぼす細骨材比率の影響を示した。ここでは、結合材 100 に対する細骨材比率だけを变化させ、その他の配合条件は一定として実験検討している。図より、細骨材比率が 150 までは要求性能の 40N/mm^2 を満たすが、細骨材比率が 200 になると 40N/mm^2 を満たせないことが明らかである。

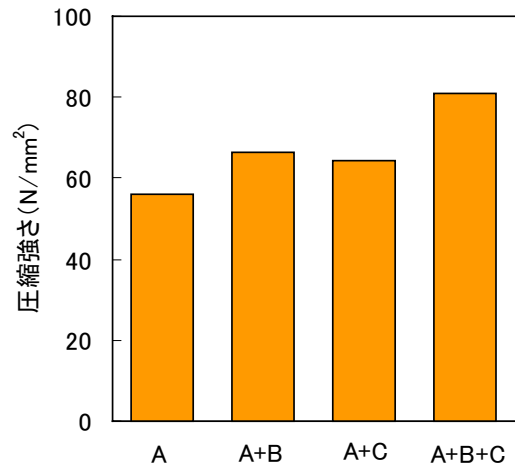


図-3 材齢 28 日の圧縮強さ

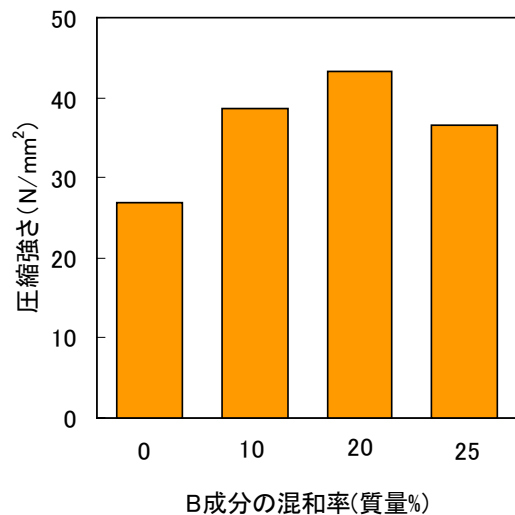


図-4 B 成分の混和率と材齢 4 時間の圧縮強さ

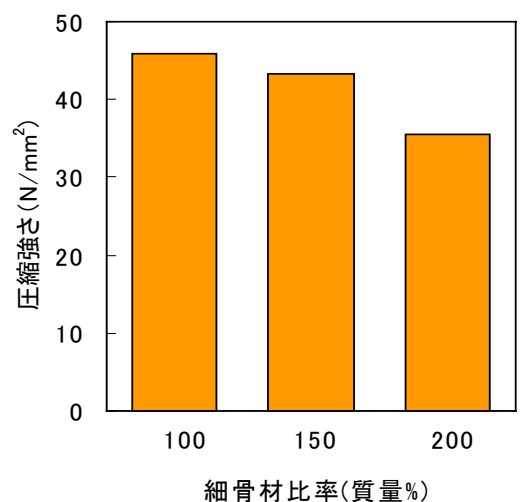


図5 細骨材比率と材齢 4 時間の圧縮強さ

要求性能を確保した上で、細骨材はできるだけ多く配合した方が耐久性の観点からは好ましいと考えられる。よって、細骨材比率は150が望ましいと思われる。

図-6に圧縮強さに及ぼす温度の影響を示した。温度が異なると、要求性能を満たす材齢も異なっている。5℃では、要求性能の40N/mm²を満たすまでに20時間以上が必要である。

図-7に積算温度と圧縮強さの関係を示した。積算温度で圧縮強さを整理すると、各温度での圧縮強さには大きな差が認められないことが明らかとなった。よって、温度が20℃を下回る場合には、積算温度から推定して養生期間を長めに設定するなどの施工管理が必要である。

図-8に曲げ強度と圧縮強さの関係を示した。ここで、曲げ強度と圧縮強さの比率を曲げ／圧縮比率と呼ぶこととする。普通モルタルと比較して市販の超速硬グラウトモルタルは曲げ／圧縮比率がやや大きい傾向が認められる。そしてさらに、本研究で提案した高強度・超速硬グラウトモルタルの曲げ／圧縮比率は、市販の超速硬グラウトモルタルと比べても大きい傾向が認められた。これは、次のように考えられる。

市販の超速硬グラウトモルタルはエトリンガイトを多量に生成する急硬成分を含むものである。よって、普通セメントを基材としている普通モルタルよりも多量のエトリンガイトが生成していると考えられる。エトリンガイトは針状の水和生成物である。この水和物の存在により微視的レベルではファイバー効果が発揮され、曲げ強度に貢献するものと考えられる。そして、超速硬セメントにさらに急硬性混和材を配合して調製された本研究の高強度・超速硬グラウトモルタルでは、市販の超速硬グラウトモルタルと比べてより多くのエトリンガイトが生成しているものと思われる。このため、ファイバー効果がより顕著に発揮され、曲げ／圧縮比率がより高い傾向を示したものと考えられる。エトリンガイトの生成量やモルフォロジーについては別報にて報告する。

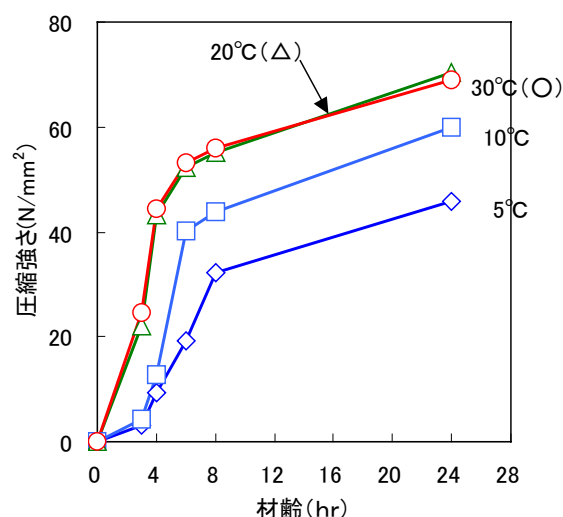


図6 圧縮強さに及ぼす温度の影響

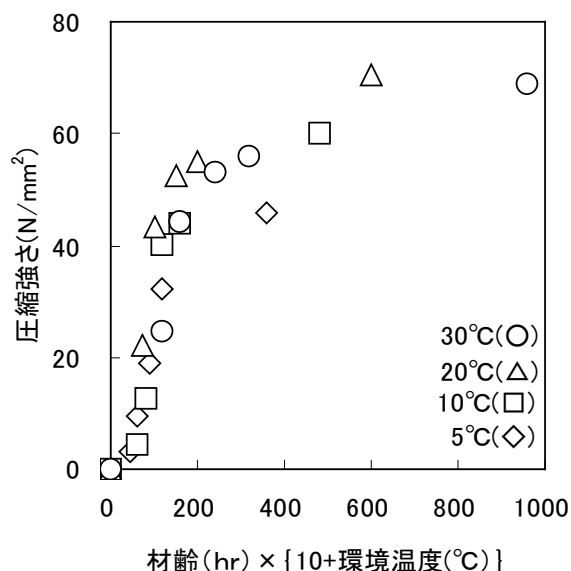


図7 積算温度と圧縮強さの関係

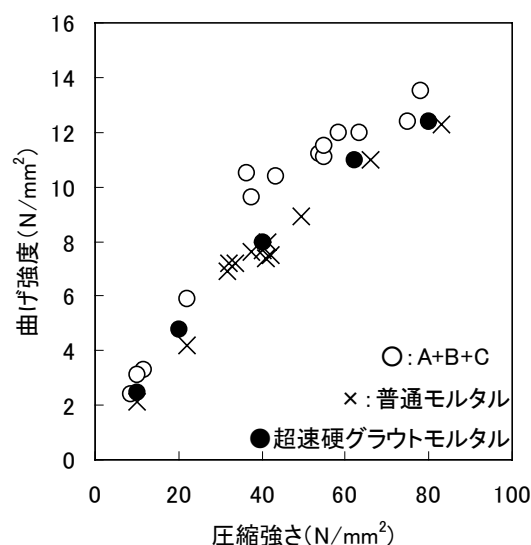


図8 曲げ強度と圧縮強さの関係

4.3 長さ変化率

図-9に各グラウトモルタルの長さ変化率を示す。AやA+Bは要求性能の $750 \sim 1250 \times 10^{-6}$ を満足していない。A+CとA+B+Cが要求性能を満たした。また、AやA+Bと、A+CやA+B+Cとでは、その後の乾燥収縮挙動に大きな差が認められる。AやA+Bと比べて、A+CやA+B+Cは材齢7日以降の乾燥収縮が小さい結果となっている。これは、A+CやA+B+CがAやA+Bと比べて水結合材比が低いためと考えられる。このことより、流動化剤として作用する凝結促進剤Cは乾燥収縮を低減する観点からも重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

なお、本研究で提案した高強度・超速硬グラウトモルタルの水和解析については別報にて詳細に報告する。

5. まとめ

高強度・超速硬グラウトモルタルの基礎物性について検討を加え、以下の結論を得た。

- (1) 超速硬セメントと急硬性混和材と凝結促進剤を併用することによって、一定の可使用時間を確保でき、材齢4時間で 40N/mm^2 以上を発現する高強度・超速硬グラウトモルタルの材料設計が可能となった。
- (2) 超速硬セメントと急硬性混和材と凝結促進剤を組み合わせた系において、凝結促進剤（無機系窒素化合物）は流動化剤および流動性保持剤として作用した。
- (3) 本研究の高強度・超速硬グラウトモルタル圧縮強さは、積算温度で整理できた。
- (4) 本研究の高強度・超速硬グラウトモルタルの曲げ／圧縮比率は、普通セメントモルタルや従来の超速硬グラウトモルタルと比較して高い。
- (5) 凝結促進剤（無機系窒素化合物）の併用により、所定の流動性を得るための水結合材比を小さくすることができ、その結果、乾燥収縮も小さくすることが可能となった。

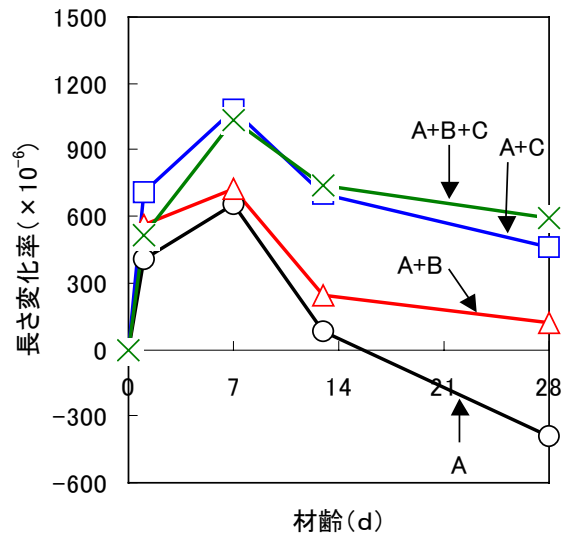


図9 長さ変化率

参考文献

- 1) Greening, N.R., : 速硬性ポルトランドセメント組成物, 特開昭 47-39924 号公報, 1972.10
- 2) 中川晃次: セメントの強度促進剤, 特開昭 48-1024 号公報, 1973.1
- 3) 樺山好幸, 大友弘志, 半田実, 五味秀明: 床版上面増厚工法に関する超速硬 SF コンクリート付着強度発現機構に関する研究, 土木学会論文集, No.540/VI-31, pp.241-250, 1996.6
- 4) 高山和久, 渋谷寿雄, 菊池泰行, 山田浩司: 超速硬セメントと繊維を用いた吹き付けモルタルの基礎性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1511-1516, 2003.6
- 5) 木村政敏, 酒向龍美, 尾寄師成, 川上正史: NTL 工法用急硬性コンクリートの施工, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.277-282, 1997.6
- 6) 谷口裕史, 荒木田憲, 長沢教夫, 青山昌二: 切削即時充填式プレライニング工法用コンクリートの配合選定, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.1177-1182, 2001.6
- 7) 伊達重之, 長谷川聖史: 高強度・超速硬, 石川島播磨技報, 第44巻, 第2号, pp.191-192, 2004.3