

論文 各種材料を用いた高強度吹付けコンクリートの諸物性に関する研究

杉山律*¹・長沢教夫*²・喜多達夫*³・福留和人*⁴

要旨：高強度吹付けコンクリートの配合選定手法を検討するために、材料を種々組合せた配合で吹付け試験を行い、初期強度発現特性、長期強度発現特性および長期耐久性を調べた。その結果、使用材料・配合を適切に選定すれば、材齢28日において50 N/mm²を越えるレベルまで高強度化が可能であることがわかった。また、凍結融解抵抗性は、空気量が主要因であり、また、中性化に対する抵抗性は、水結合材比および混和材の添加の影響を受け、通常のコンクリートと同様の傾向にあることがわかった。

キーワード：吹付けコンクリート、高強度、圧縮強度、凍結融解抵抗性、中性化

1. まえがき

社会・経済の進歩に伴い、トンネルの大断面化の要求が高まっており、合理的で経済的なトンネル施工法の確立が大きな課題となっている。これらの検討の中で、吹付けコンクリートを高強度し、それを有効に利用していくことが検討されている。このような背景から、近年シリカフェーム等を用いた高強度吹付けコンクリートが開発され実用化されている[1], [2]。しかしながら、その他の材料を用いた場合と比較検討した研究はほとんど行われておらず、経済性を考慮した配合設計手法は、未だ十分に確立されていないのが現状であると思われる。

以上のような観点から、本研究では、我国の現状に即した効果的で経済的な高強度吹付けコンクリートの配合選定技術を確立する上での基礎資料を得ることを目的に、材料を種々組合せた配合で試験吹付けを行い、使用材料および配合が、初期強度発現特性、長期強度発現特性および長期耐久性に及ぼす影響を調べた。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

実験に用いた材料の種類および仕様を表-1に示す。セメントは、普通ポルトランドセメント（以下、OPCと略記）とし、高強度用混和材として、シリカフェーム1種類（ノルウェー産の非造粒タイプ、以下SiFと略記）およびカルシウムサルホアルミネート系の混和材2種類（以下、CSA系混和材と呼ぶ。CSA I、CSA IIと略記）を用いた。骨材は、通常の吹付けコンクリートに使用されているものとし、粗骨材最大寸法は、15mmとした。高性能減水剤は、ポリエチレングリコール系の吹付けコンクリート用高性能減水剤を用いた。急結剤は、セメント鉱物系とし、カルシウムアルミネート系1種類（以下、CA系急結剤と呼ぶ。QCAと略記）とカルシウムサルホアルミネート系急結剤2種類（以下、CSA系急結剤と呼ぶ。QCSA I、QCSA IIと略記）を用いた。ここで、CA系急

* 1 (株) 間組土木本部技術設計部 (正会員)

* 2 (株) 間組土木本部トンネル統括部

* 3 (株) 間組技術研究所技術研究部第2研究室室長、工修 (正会員)

* 4 (株) 間組技術研究所技術研究部第2研究室 (正会員)

結剤は、現在汎用的に使用されている急結剤であり、一般にセメント鉱物系急結剤と呼ばれている。なお、CA系とCSA系で急結メカニズムが異なり、前者は、主としてセメント中の C_3S 、 C_2S の水和促進、後者は、急結剤の水和によるエトリンガイトの急激な生成により急結性を付与している。急結性は、CA系の方が優れているが、長期強度の増進は、CSA系の方が優れている。CSA系急結剤は、急結性確保のため、CA系急結剤の1.5倍程度の添加量としている。

2. 2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-2に示す。それぞれ

の配合の概要は、以下のとおりである。なお、空気量は、1～3%程度を目標とした。

- ①No. 1：NA TMの一次吹付けコンクリートに用いられている標準的な配合である。
- ②No. 2～4：急結剤は、CA系とし、水セメント比を低減した配合である。
- ③No. 5、6：②の2配合（水セメント比50，40%）で、急結剤は、CSA系とした。
- ④No. 7、9：混和材としてシリカフュームを用い、高性能減水剤により水結合材比を製造・施工上限界と考えられる値まで低減した配合である。急結剤は、2種類使用した。
- ⑤No. 8、10：④と同様の考え方で、混和材にCSA系混和材を用いた配合である。
- ⑥No. 11：材齢1時間以内の極初期の強度発現性および長期強度を大幅に改善させることを目的に開発された材料の組合せであり、CSA系混和材およびCSA系急結剤を用いている。

表1 使用材料

| | 種 類 | 仕 様 |
|--------|--------------------------|---|
| セメント | 普通ポルトランドセメント | 比重：3.15 比表面積：3,250cm ² /g |
| | | シリカ フューム (SiF) |
| 混和材 | カルシウムサルボアルミネート系(CSA I) | 比重：2.60 比表面積：4,000cm ² /g |
| | カルシウムサルボアルミネート系(CSA II) | 比重：2.60 比表面積：4,000cm ² /g |
| 細骨材 | 陸砂（静岡県丸子産） | 比重：2.615 吸水率：1.17% |
| 粗骨材 | 碎石（静岡県丸子産） | 比重：2.680 吸水率：1.46% |
| 急結剤 | カルシウムアルミネート系(QCA) | |
| | カルシウムサルボアルミネート系(QCSA I) | |
| | カルシウムサルボアルミネート系(QCSA II) | |
| 高性能減水剤 | ポリエチレングリコール系高分子 | |

表-2 コンクリートの配合

| 配合No | 配合条件 | | | | 単 位 量 (kg/m ³) | | | | | | 混和剤 (%) | | | | | | | |
|------|----------|----------|--------|---------|----------------------------|------|---------|---------|----|--------|---------|--------|-----|------|------|------|-----|-----|
| | 水結材比 (%) | 細骨材率 (%) | 混和材の種類 | 急結剤の種類 | 水 | セメント | シリカフューム | CSA系混和材 | | 細骨材 | 粗骨材 | 高性能減水剤 | 急結剤 | | | | | |
| | | | | | | | | I | II | | | | | | | | | |
| 1 | 60 | 62 | — | QCA | 217 | 360 | — | — | — | 1053 | 662 | — | 7.0 | | | | | |
| 2 | 50 | 62 | | | 180 | 360 | | | | 1114 | 699 | 1.1 | | | | | | |
| 3 | 40 | | | | 180 | 450 | | | | 1032 | 705 | 1.1 | | | | | | |
| 4 | 30 | | | | 175 | 500 | | | | 1017 | 691 | 1.3 | | | | | | |
| 5 | 50 | | | | 62 | — | | | | QCSA I | 180 | 360 | | — | — | 1114 | 699 | 1.1 |
| 6 | 40 | 60 | | | 180 | | | | | | 450 | 1032 | | | | 705 | 1.1 | |
| 7 | 35 | 62 | SiF | QCA | 173 | 450 | 45 | — | — | 1011 | 691 | 1.3 | 7.0 | | | | | |
| 8 | 37 | | CSA I | | 178 | 450 | — | 32 | — | 1017 | 694 | — | | | | | | |
| 9 | 35 | | SiF | | QCSA I | 173 | 450 | 45 | — | — | 1011 | 691 | | 1.3 | 10.0 | | | |
| 10 | 37 | | CSA I | 178 | | 450 | — | 32 | — | 1017 | 694 | — | | | | | | |
| 11 | 37 | | CSA II | QCSA II | | 183 | 450 | — | — | 45 | 1001 | 683 | — | 10.0 | | | | |

2. 3 コンクリートの製造および運搬

コンクリートの製造には、容量0.5m³の2軸強制練りミキサを用いた。1回当たりの吹付け量は、2m³とし、1バッチの練混ぜ量0.5m³として、計4バッチ製造した。コンクリートの運搬には、容量4.5m³のアジテータトラックを使用した。

2. 4 吹付け機械および吹付け方法

吹付け機械には、ローター型の空気圧送方式の吹付け機械（アリバ285）を用いた。吹付け能力は、公称最大20m³/hrである。試験時の吹付け速度は、8m³/hrを目標とした。

2. 5 試験項目および試験方法

表-3に試験項目および試験方法を示す。

- a) 初期強度試験：JSCE-G561-1994に準じて行い、せん断強度から圧縮強度に換算した。
- b) 圧縮強度試験：ベースコンクリートは、φ10×20cmの型枠を用い、JIS A 1132に準じて作製した。吹付けコンクリートの供試体は、JSCE F561に準じて作製し、φ5×10cmの供試体をコアボーリングにより採取した。
- c) 凍結融解試験：吹付けられた供試体から10×10×40cmの供試体をコンクリートカッターにより切り出した。
- d) 中性化試験：圧縮強度と同様の方法で採取した供試体(φ5×10cm)を用い、所要期間暴露後割裂し、フェノールフタレイン1%アルコール溶液を噴霧して未着色部分の深さを測定した。
- e) 細孔径分布：材齢28日においてコア供試体のモルタル部分から2.5~5.0mmの破片を採取し、D-dryで乾燥させた後測定を行った。

表-3 試験項目および試験方法

| 試験項目 | | 試験方法 |
|-------------|---------|--|
| フレッシュコンクリート | スランプ | JISA1101(出荷時, 現着時) |
| | スランプフロー | JSCE F 503 1990による. (現着時) |
| | 空気量 | JISA1118(出荷時, 現着時) |
| | 温度 | 棒状温度計による. |
| 初期強度 | | 引抜き試験による (材齢1, 3, 8, 24時間) |
| 圧縮強度 | ベース | JIS A 1108(材齢7, 28, 91日) |
| | 吹付け | コア供試体(材齢7, 28, 91日) |
| 凍結融解試験 | | JSCE G501による. (試験開始材齢28日) |
| 中性化試験 | | 促進中性化試験 (CO ₂ : 5%, 30°C, 60%RH) |
| 細孔径分布 | | 水銀圧入式ホシメタによる |

3. 実験結果および考察

3. 1 フレッシュコンクリートの性状および吹付け性状

表-4に品質管理試験結果および吹付け速度の測定結果を示す。吹付け速度は、2配合程度若干小さいものもあったが、ほぼ目標の吹付け速度となっている。なお、水結合材比を低減させるとコンクリートの粘性の増加により吹付け時の圧送負荷が増大し、施工不能となることが懸念されたため、水結合材比の小さい配合ではあらかじめスランプの設定値を大きくした(水結合材比40%以下では20~25cm)。このことにより、いずれの配合とも吹付けは可能であったが、水結合材比40%以下の配合では、若干脈動が見られた。ただし、今回の試験は少量の施工結果であり、実際の施工に適用する場合には、吹付け機械システムの検討も必要となると考えられる。

表-4 品質管理試験結果および吹付け速度

| 配合 No. | 配合条件 | | | | 品質管理試験結果 | | | | | | | | 吹付け 速度 m ³ /hr |
|-----------|--------------|-------------|--------|---------|------------------|--------------|------------|------------------|--------------|-----------------|------------|-----|---------------------------------|
| | 水結合材比 (%) | 細骨材率 (%) | 混和材の種類 | 急結剤の種類 | プラント | | | 現場 | | | | | |
| | | | | | コンクリート温度 (°C) | スランプ (cm) | 空気量 (%) | コンクリート温度 (°C) | スランプ (cm) | スランプフロー (cm) | 空気量 (%) | | |
| 1 | 60 | 62 | — | QCA | 24.0 | 7.5 | 1.3 | 24.5 | 9.5 | — | 1.5 | 8.2 | |
| 2 | 50 | | | | 21.0 | 16.0 | 1.0 | 25.0 | 17.0 | 25.0 | 1.2 | 7.5 | |
| 3 | 40 | | | | 22.0 | 21.0 | 1.8 | 25.0 | 19.5 | 30.5 | 1.3 | 8.0 | |
| 4 | 35 | 60 | — | QCSA I | 25.0 | 24.0 | 0.9 | 26.0 | 24.0 | 47.5 | 0.9 | 8.1 | |
| 5 | 50 | 62 | | | 22.0 | 18.0 | 1.7 | 23.0 | 20.5 | 33.0 | 1.7 | 5.2 | |
| 6 | 40 | 60 | | | 23.5 | 21.0 | 1.3 | 24.5 | 20.5 | 34.0 | 1.5 | 6.2 | |
| 7 | 35 | 60 | SiF | QCA | 20.0 | 23.0 | 1.3 | 21.5 | 24.5 | 45.0 | 1.2 | 8.0 | |
| 8 | 37 | | CSA I | | 21.0 | 23.5 | 4.5 | 22.0 | 24.0 | 43.0 | 5.3 | 8.0 | |
| 9 | 35 | | SiF | QCSA I | 24.5 | 18.0 | 2.5 | 25.5 | 13.0 | — | 2.3 | 8.0 | |
| 10 | 37 | | CSA I | | 23.5 | 20.5 | 2.5 | 25.5 | 16.0 | — | 1.9 | 8.2 | |
| 11 | 37 | | CSA II | QCSA II | 24.0 | 25.5 | 2.5 | 25.0 | 25.0 | 56.5 | 2.0 | 8.0 | |

3. 2 初期強度発現特性

図-1、図-2に材齢と換算圧縮強度の関係を示す。OPC単味でCA系急結剤を用いた場合、高性能減水剤を用いて水セメント比を低減することによって初期材齢（材齢1～8時間）の強度発現性を改善することが可能であるが、材齢8時間から24時間の強度増進はほとんど見られない。OPC単味でCSA系急結剤を用いた場合も初期強度の発現性は良好である。シリカフュームやCSA系混和材を用いた場合、水結合材比を低減した配合とすることで初期強度の発現性は改善されるが、OPC単味の場合とほぼ同程度であり、その効果は顕著ではない。材齢24時間においては、OPC単味の場合に比べて高い強度が得られており、強度改善効果が見られる。CSA系混和材および急結剤を組合せた場合、1時間以内の極初期材齢の強度発現性を大幅に改善できる。

3. 3 長期強度発現特性

図-3および図-4に材齢と圧縮強度の関係を図-5に水結合材比と圧縮強度（材齢28日）の関係を示す。

OPC単味でCA系急結剤を用いた場合、材齢7日以降の圧縮強度の伸びは小さい。また、水セメント比の低減による圧縮強度の改善効果はほとんど見られない。一方、急結剤にCSA系急結剤を用いた場合、強度発現性は良好であり、材齢28日において39～48 N/mm²と高い強度が得られている。また、水セメント比低減による圧縮強度の改善効果も見られる。

シリカフュームやCSA系混和材を用いた場合、OPC単味に対して強度改善効果が見られる。CSA系急結剤と組合せるとさらに高強度化でき、材齢28日で60N/mm²以上とかなり高い強度が得られている。

3. 4 細孔径分布

図-6に水結合材比と半径5nm以上の細孔量の関係を示す。OPC単味でCA系急結剤を用いた場合、他の材料の組合せに比べて組織が粗であり、また、水セメント比の低減による組織の緻密化は、ほとんど見られない。また、シリカフューム、CSA系混和材の添加により細孔量は低減されているが、その効果はさほど大きくない。それに対し、OPC単味、高強度用混和材を用いた場合、いずれもCSA系急結剤を用いることで細孔量は大幅に低減しており、微細組織の緻密化が見られる。図-7に半径5nm以上の細孔量と圧縮強度（材齢28日）の関係を示す。通常

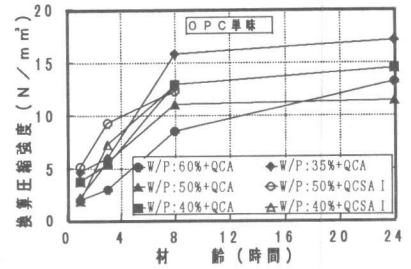


図-1 初期強度発現特性 (OPC単味)

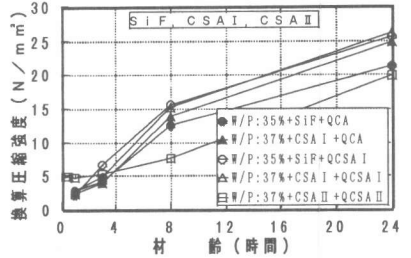


図-2 初期強度発現特性 (SiF, CSA)

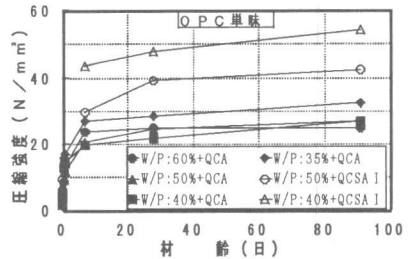


図-3 長期強度発現特性 (OPC)

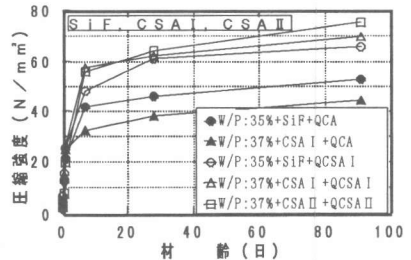


図-4 長期強度発現特性 (SiF, CSA)

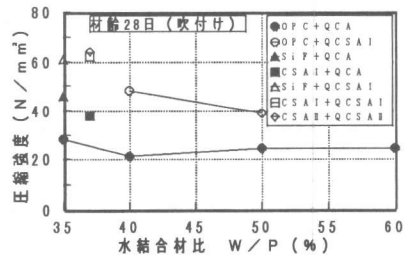


図-5 水結合材比と圧縮強度の関係

のコンクリートと同様、細孔量と圧縮強度の間には高い相関が見られる。以上の結果および強度試験結果を併せて考察すると以下ようになる。

①OPC単味でCA系急結剤を用いた場合、材齢初期に急激に水和反応が生じ、材齢の経過に伴う水和の進行が阻害される。また、水セメント比の低減効果は、初期の水和促進に大きく現れ、逆にそのことが長期的な水和の進行を妨げ、細孔構造の緻密化、長期強度の増進が見られなくなる。

②シリカフューム、CSA系混和材を用いることで、組織が緻密化し、圧縮強度が改善される。

③CSA系急結剤を用いた場合、エトリンガイトの針状結晶の形成により組織が緻密化し、圧縮強度が改善される。

3. 5 凍結融解抵抗性

図-8、図-9に凍結融解試験結果を示す。

図-8に示すように従来の材料の組合せ（OPC単味+CA系急結剤、配合No. 2, 4）より改善されているが、2配合を除いて耐久性指数は、40~60%程度であり十分な凍結融解抵抗性を有しているとは言えない。重量変化率は、高強度化することで低減されている。

図-10 および図-11にそれぞれフレッシュコンクリートの空気量および圧縮強度と耐久性指数の関係を示す。最も高い強度が得られた配合（No. 11）は、少ない空気量で高い凍結融解抵抗性が得られているが、その他は空気量と相関が見られる。一方、空気が連行された配合（No. 8）および配合No. 11以外は、圧縮強度と相関が見られ、圧縮強度が高くなるに従って耐久性指数は高くなっている。しかしながら、高強度化による改善効果は小さく、十分な凍結融解抵抗性を確保するためには、所要の空気量を確保する必要があると言える。

図-12に半径10nm以上の細孔量と重量変化速度の関係を示すが、細孔量が小さいほど重量変化速度は小さくなっている。このことから、高強度化に伴う組織の緻密化により重量変化率が低減したものと予想される。

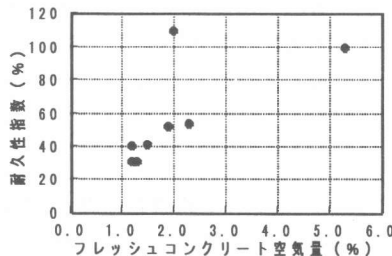


図-10 空気量と耐久性指数の関係

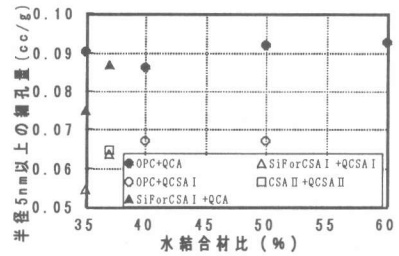


図-6 水結合材比と細孔量の関係

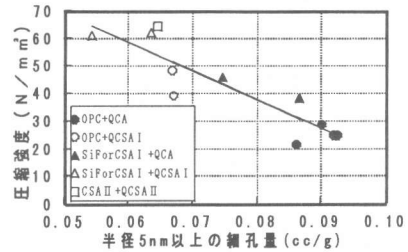


図-7 細孔量と圧縮強度の関係

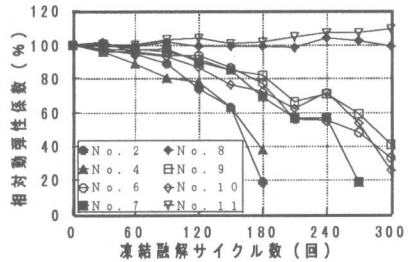


図-8 凍結融解試験結果(動弾性係数)

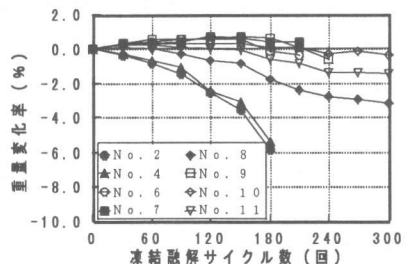


図-9 凍結融解試験結果(重量変化率)

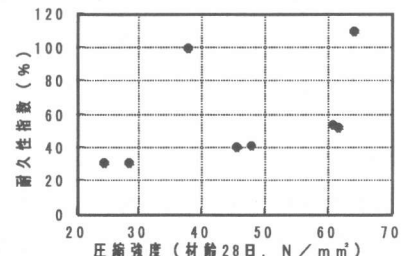


図-11 圧縮強度と耐久性指数の関係

3. 6 中性化に対する抵抗性

図-13および図-14にそれぞれ吹付けコンクリートおよびベースコンクリートの水結合材比と暴露期間56日における中性化深さの関係を示す。OPC単味の場合、水セメント比と中性化深さには、線形関係が見られる。CSA系急結剤を用いた場合は、ベースコンクリートと同程度の中性化深さとなっているが、CA系急結剤を用いた場合は、中性化深さは大きくなっている。これは、組織の緻密さの影響と考えられる。一方、シリカフューム、CSA系の混和材を用いた場合、同一水結合材比で比較するとセメント単味に比べて中性化深さは大きくなっている。これは、混和材の添加により水酸化カルシウムが消費されることによるものと考えられる。

4. まとめ

本研究の結果をまとめると以下ようになる。

- (1) セメント単味でカルシウムアルミネート系急結剤を用いた場合、水セメント比の低減により初期強度は改善されるが、長期強度はさほど改善されない。
- (2) カルシウムサルホアルミネート系急結剤を用いることで初期および長期において高強度化が可能であり、材齢28日においてセメント単味の場合で、 $48\text{N}/\text{mm}^2$ 、シリカフューム、カルシウムサルホアルミネート系混和材と組合せると $60\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の圧縮強度が得られる。
- (3) 凍結融解抵抗性は、高強度化することである程度向上するが、空気量が主要因であり、所要の凍結融解抵抗性を確保するためには、所要の空気量を確保する必要がある。
- (4) 中性化に対する抵抗性は、水結合材比を低減することで改善されるが、シリカフュームやカルシウムサルホアルミネート系混和材を用いた場合は、セメント単味と比較して若干低下する。

謝 辞

本実験は、日本道路公団東名高速道路（改築）日本坂トンネル西工事において実施したものであり、実験に当たり日本道路公団焼津工事事務所の関係者の方々には多大なご協力およびご指導を頂いた。また、実験の実施に際し、ハザマ・東急企業体、電気化学工業（株）、デンカグレース（株）、木部建設（株）の関係各位には多大なご協力を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] ジェオフロンテ研究会：高強度吹付けコンクリート開発報告書、1995. 12
- [2] 田沢雄二郎、本橋賢一、横関康祐、岡田浩司：シリカフュームを混和した高強度吹付けコンクリートの物性と適用例、土木学会論文集、No. 550/V 33, pp. 173 184、1996. 11

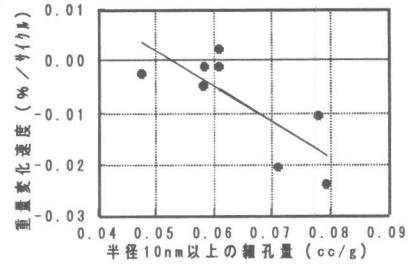


図-12 細孔量と重量減少速度の関係

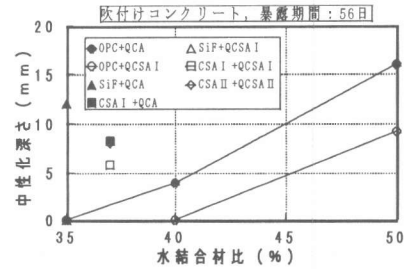


図-13 水結合材比と中性化深さの関係 (吹付けコンクリート)

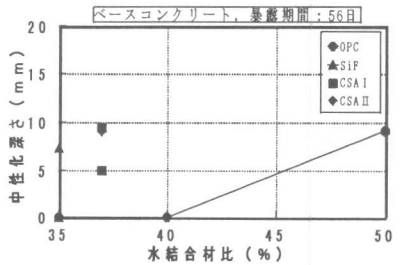


図-14 水結合材比と中性化深さの関係 (ベースコンクリート)