

論文 引張強度増進用混和剤の開発について

森 敬幸*¹・鈴木 基行*²・寺澤 正人*³・安藤 尚*⁴

要旨：筆者らはコンクリートが持つ圧縮特性を大きく変化させることなく、コンクリートの引張強度を増進させる混和剤の実用化を目指して開発研究を継続しており、これまで室内強度試験や実物大供試体による効果の確認試験を実施した。研究の結果から開発中の混和剤を使用することにより、a)30%程度の引張強度増進効果があること、b)混和剤を添加しない場合の材齢 28 日引張強度を材齢 7 日程度で確保可能であること、c)温度応力などに起因する初期（施工時）ひび割れを大きく軽減可能であり、耐久性の高いコンクリート構造を実現可能であることなどが確認された。

キーワード：混和剤，コンクリート，引張強度特性，ひび割れ

1. はじめに

コンクリートは取り扱いが比較的容易で、かつ安価であることなどから、鉄とともに構造物の建設においては欠くことのできない材料である。しかしながら、コンクリートの引張強度は圧縮強度の約 1/10 程度でしかないという特徴があり、近年では、構造物の大型化や建設環境の変化に伴い、ひび割れ発生による構造物の耐久性低下および使用補強材の増加によるコスト上昇や施工性の悪化が問題となっている。これに対して各種研究機関では、コンクリートの圧縮強度の増進や炭素繊維などの繊維材による引張補強に関する研究などが行われ、多数の成果が得られているが、その効果やコストの面で課題は多いと思われる。筆者らは、コンクリートの持つ圧縮特性を大きく変えることなく、引張強度を増進させる混和剤の実用化を目指して、写真-1に示すような珪酸塩、カルボン酸などからなる混和剤A(白色，固体粒状，比重 $\rho=1.84$)を開発し、室内強度試験や実物大供試体による効果の確認試験を実施した。

2. 室内試験（その1）

筆者らは、既報告¹⁾に示すように、表-1に示す様な配合のベースコンクリートに対して、混和剤Aを後添加したコンクリートと無添加のコンクリートを気中養生（平均気温 20℃）した供試体に対して材齢 7 日，28 日，91 日にて、圧縮強度試験及び割裂引張強度試験を実施して、a)強度増進効果が、混和剤Aの粒径及び添加率によって異なること、b)適切な粒径，添加率の混和剤Aを使用すれば、圧縮特性を大きく変えることなく、無添加コンクリートの材齢 28 日の引張



写真-1 混和剤Aの外観

*1 飛島建設（株）土木本部設計部設計第3課（正会員）

*2 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻 工博（正会員）

*3 飛島建設（株）土木本部設計部設計第3課担当課長（正会員）

*4 （株）アストン 東京営業部専務取締役

強度をおよそ材齢7日で確保可能なこと、c)引張強度が圧縮強度の2/3乗に比例するとした場合の比例定数 α （以後「引張強度比例定数 α 」と呼ぶ）の比較などにより30%程度の引張強度増進効果が期待できることを確認した。表-2に最も結果が良好であった平均粒径2mmの混和剤Aをセメント重量比2.5%で添加した場合の強度試験結果を示し、図-1に混和剤Aを添加した場合と添加しない場合の引張強度発現図を示す。

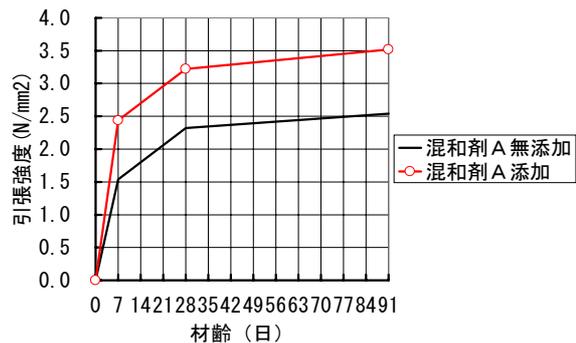


図-1 引張強度発現性比較図(室内試験その1)

3. 室内試験(その2)

この試験は a)骨材及びセメント種類を室内試験(その1)の材料から変更した場合における混和剤Aの引張強度増進効果の再現性確認、b)効果のメカニズム確認を目的として実施した。

3.1 骨材、セメント種類を変更した強度試験

表-3のように配合と材料を室内試験(その1)のものから変更したベースコンクリートに対して、1.2mm以上2.5mm以下のふるいに残留

する粒径の揃った混和剤Aをセメント重量比2.0%にて後添加して、室内試験(その1)と同様の方法にて強度試験を実施した。試験は気中養生(平均気温18°C)のものに対して基本的に行い、一部、標準水中養生のものに対しても実施した。なお、配合を表-3に示す値と同値とし、高炉B種セメント(T社製)を使用した場合の強度試験も実施した。図-2に引張強度発現図を、表-4に強度試験結果を示す。

表-1 ベース配合(室内試験その1)

設計基準強度(N/mm²): 24 目標スランプ(cm): 8±2.5
粗骨材の最大寸法(mm): 20 空気量(%): 4.0±1.0

使用セメント	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
			水 W	セメント C	細骨材 S1	細骨材 S2	粗骨材 G	AE 減水剤
普通ポルトランドセメント(U社)	57.2	44.2	162	283	491	321	1058	1.7

S1: 葛生産(F.M=3.2 ρ=2.63) G: 葛生産(F.M=6.7 ρ=2.70)
S2: 佐原産(F.M=1.8 ρ=2.58) AE減水剤: 標準型

表-2 強度試験結果一覧(室内試験その1)

材齢	配合	引張強度		圧縮強度		α	
		強度(N/mm ²)	強度比	強度(N/mm ²)	強度比	値	比率
7日	混和剤A無添加	1.5	1.0	19.6	1.0	0.210	1.00
	混和剤A添加	2.4	1.6	24.3	1.2	0.290	1.38
28日	混和剤A無添加	2.3	1.0	30.1	1.0	0.240	1.00
	混和剤A添加	3.2	1.4	33.2	1.1	0.310	1.30
91日	混和剤A無添加	2.5	1.0	32.4	1.0	0.250	1.00
	混和剤A添加	3.5	1.4	36.1	1.1	0.320	1.28

強度は平均値

引張強度 = $\alpha \times (\text{圧縮強度})^{2/3}$

表-3 ベース配合(室内試験その2)

設計基準強度(N/mm²): 24 目標スランプ(cm): 8±2.5
粗骨材の最大寸法(mm): 20 空気量(%): 4.0±1.0

使用セメント	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G1	粗骨材 G2	AE 減水剤
普通ポルトランドセメント(T社)	55.0	48.0	176	320	842	564	376	1.8

G1: 八王子産砕石5号(F.M=7.0 ρ=2.67) G2: 八王子産砕石6号(F.M=5.9 ρ=2.67) S: 君津産山砂(F.M=2.6 ρ=2.59)
AE減水剤: 標準型

これらから骨材及びセメント種類を変更した場合においても、養生条件によらず、室内試験（その1）の結果と同様に、無添加の場合の28日引張強度をおよそ材齢7日で確保可能なこと、及び引張強度比例定数 α の比較により30%程度の引張強度増進効果が期待できることがわかり、混和剤Aの効果の再現性が確認される。

3.2 引張強度増進メカニズム確認試験

筆者らが開発した混和剤Aはコンクリートの引張強度増進を目的とするものであるが、一般的にコンクリートの引張強度には主にモルタル強度、粗骨材とモルタル界面（遷移帯²⁾）の強度、粗骨材自身の強度が影響を及ぼすと考えられている。ここでは混和剤Aの発揮メカニズム確認の一方法として、3.1に示した試験時のコンクリート（普通ポルトランドセメント使用配合）の一部から5mmふるいを用いて粗骨材を除去し採取したモルタル供試体に対して同様の強度試験を実施して引張強度比例定数 α を求め、これを用いて混和剤A添加時の無添加時に対する引張強度比率を計算し、コンクリートの値と比較した。図-3に比較図を示すが、モルタルの引張強度比率は、7日及び28日の両材齢において1.0以上であり、混和剤Aはモルタル分の引張強度増進に影響していると言えるものの、粗骨材

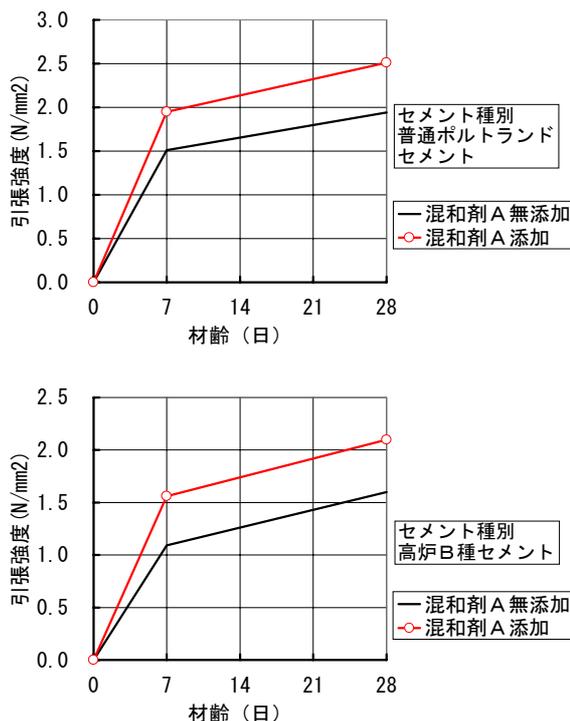


図-2 引張強度発現性比較図(室内試験その2)

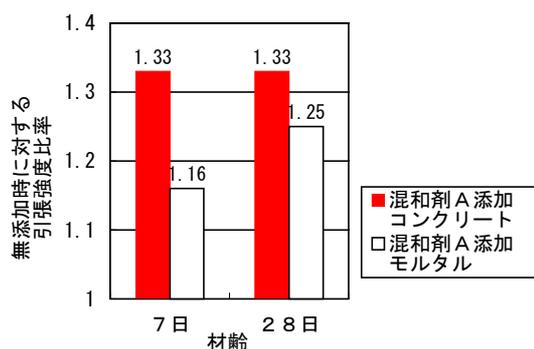


図-3 引張強度比率比較図

表-4 強度試験結果一覧(室内試験その2)

セメント種別:普通ポルトランドセメント

材齢	配合	引張強度		圧縮強度		α	
		強度 (N/mm ²)	強度比	強度 (N/mm ²)	強度比	値	比率
7日 (気中)	混和剤A無添加	1.5	1.0	20.8	1.00	0.199	1.00
	混和剤A添加	2.0	1.3	19.9	0.96	0.265	1.33
28日 (気中)	混和剤A無添加	1.9	1.0	30.3	1.00	0.200	1.00
	混和剤A添加	2.5	1.3	29.2	0.96	0.265	1.33
28日 (水中標準)	混和剤A無添加	2.6	1.0	38.9	1.00	0.228	1.00
	混和剤A添加	3.5	1.3	37.1	0.95	0.310	1.36

セメント種別:高炉B種セメント

材齢	配合	引張強度		圧縮強度		α	
		強度 (N/mm ²)	強度比	強度 (N/mm ²)	強度比	値	比率
7日 (気中)	混和剤A無添加	1.1	1.0	11.0	1.00	0.222	1.00
	混和剤A添加	1.6	1.4	12.0	1.10	0.298	1.34
28日 (気中)	混和剤A無添加	1.6	1.0	20.0	1.00	0.217	1.00
	混和剤A添加	2.1	1.3	21.2	1.06	0.274	1.26

強度は平均値

引張強度 = $\alpha \times (\text{圧縮強度})^{2/3}$

を含むコンクリートの値に比較して低い値である。これより混和剤Aはモルタルの引張強度増進以外の要因によってもコンクリートの引張強度を増進させていると考えられるが、混和剤Aは粗骨材自身の強度を増進するものではないことは自明であるので、モルタルの引張強度増進要因以外の要因が関与しているものと推察できる。更に、引張強度比率の材齢による変化をみると、コンクリートの値は2材齢間で一定(1.33)であるが、モルタルの材齢7日における値(1.16)は、28日の値(1.25)に比較して小さく、コンクリートの値との差が大きい。一般に粗骨材周囲は材齢3日から7日程度においてCa(OH)₂結晶や空隙を多く含むなどして脆弱な状態にあるとされるが、この時点でのコンクリートの引張強度が粗骨材周囲の低い強度によって支配的に決定されると考えた上で、混和剤Aがモルタルの強度増進と共に粗骨材周囲の構造体を有効的に強化し、コンクリートの引張強度を大きく向上しているとすれば、この差が説明可能であり、かつ混和剤A添加コンクリートが無添加時の28日引張強度を材齢7日程度で発現可能であることの説明も可能と推察される。一方、図-4は材齢28日において混和剤A添加及び無添加コンクリートの粗骨材近傍のモルタルを採取して、ポロシメータで測定した細孔径分布の比較図であるが、混和剤Aを添加したものは無添加に比較してより小さな細孔へ変化し、粗骨材周囲の空隙を小さくして緻密化を図っていると言えるが、混和剤Aの引張強度増進メカニズムの詳細な確認には電子顕微鏡による粗骨材周囲の観察等が必要と思われる。

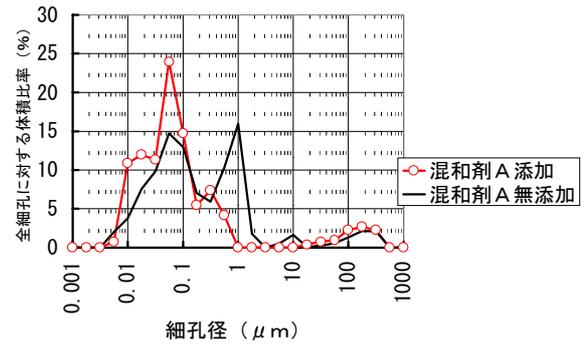


図-4 粗骨材近傍モルタルの細孔径分布比較図

4. 実物大供試体による効果の確認試験

前述の室内試験の結果から、混和剤Aを用いるとコンクリートの引張強度を増進させ、またその効果は初期材齢において有効であることが確認されたことから、コンクリート構造物の初期（施工時）ひび割れの発生を抑制可能なものと判断された。ここでは図-5に示すような実物大供試体2体各々の壁部に混和剤Aを添加及び添加しないコンクリートを打設し、両者の壁部挙動を比較して混和剤Aの効果を確認した。

4.1 壁部の施工概要

壁部は底版施工7日後において表-5に示す配合の生コンクリートをベース配合として施工した。混和剤A（粒径は室内試験（その2）時と同様）は添加量をセメント重量比2.0%として、

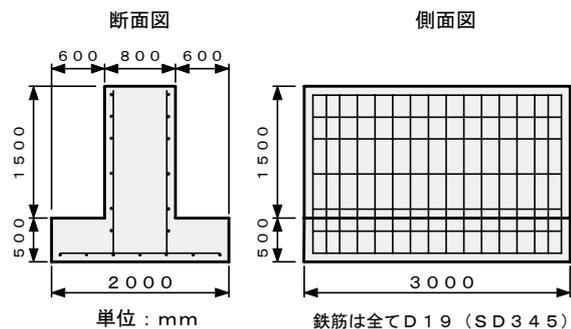


図-5 実物大供試体概要図

表-5 ベース配合（実物大試験時）

設計基準強度(N/mm²) : 24
粗骨材の最大寸法(mm) : 20

目標スランプ(cm) : 8±2.5
空気量(%) : 4.0±1.0

使用セメント	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					粗骨材 G	AE 減水剤
			水 W	セメント C	細骨材 S1	細骨材 S2	粗骨材 G		
普通ポルトランドセメント (U社)	57.2	44.6	159	278	499	326	1058	1.7	

S1: 葛生産 (F.M=3.2 ρ=2.63)
S2: 佐原産 (F.M=1.8 ρ=2.58)

G: 葛生産 (F.M=6.7 ρ=2.70)
AE減水剤: 標準型

ミキサー車到着後ホッパーより直接投入し、ミキサーを2分間高速回転させて攪拌する現場後添加方式により添加した。(コンクリート量4.5m³) また打設はポンプ車を用いて行い、混和剤A添加コンクリート壁及び無添加コンクリート壁とも同一位置に同日のほぼ同時刻に実施した。(日付2002/11/29 場所:千葉県東葛飾郡)

4.2 フレッシュコンクリートの性状および施工性

混和剤A無添加コンクリートはスランプ9.0cm 空気量5.0% 温度14℃, 混和剤A添加後のコンクリートはスランプ10.0cm 空気量5.5% 温度15℃であった。図-6にそれぞれのスランプの経時変化図を示すが、スランプの低下程度は両者ほぼ同じであった。また混和剤A添加コンクリートの施工には支障はなかった。

4.3 強度発現性

表-6にコンクリートの強度試験及び圧縮弾性試験結果を示すが、強度発現性状に関しては、それまでの室内試験結果と同様の傾向であった。

圧縮弾性係数は、混和剤Aを添加したものは、無添加の場合よりも若干小さな値となったが、圧縮特性は大きく変わらないと判断された。

4.4 壁部計測

壁部の長手方向中央位置に図-7に示す様な配置にて温度計及びコンクリート有効応力計を配置し、コンクリートの応力と温度を計測した。

(1) 温度計測

図-8に壁部内において最高温度を示したT3計測点における温度経時変化比較図を示す。混和剤Aを添加したコンクリートは若干温度上昇量が高いが、混和剤Aが温度上昇に与える影響は小さいものと判断される。

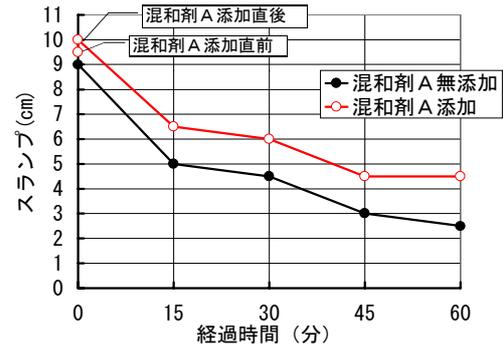


図-6 スランプ経時変化図

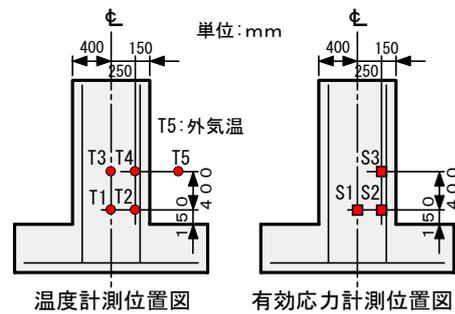


図-7 計測位置図

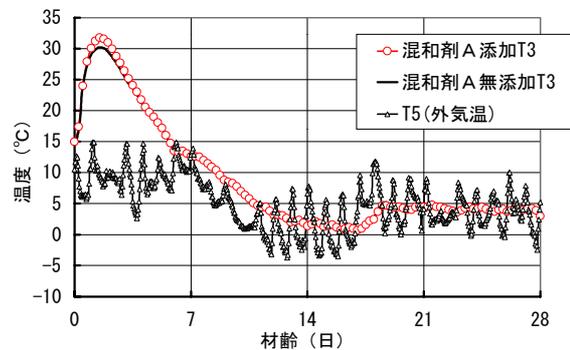


図-8 壁部温度経時変化比較図

(2) コンクリート応力計測

応力計測の代表として最大引張応力を記録したS3測点での応力経時変化比較図を図-9に示す。混和剤A添加壁及び無添加壁の両者の応力

表-6 強度試験結果一覧(実物大供試体試験)

材齢	配合	引張強度		圧縮強度		α		弾性係数 (N/mm ²)
		強度 (N/mm ²)	強度比	強度 (N/mm ²)	強度比	値	比率	
7日 (気中)	混和剤A無添加	1.5	1.0	17.0	1.00	0.220	1.00	22400
	混和剤A添加	1.9	1.3	16.4	0.96	0.292	1.33	21300
28日 (気中)	混和剤A無添加	2.0	1.0	27.3	1.00	0.220	1.00	25500
	混和剤A添加	2.5	1.3	25.4	0.93	0.287	1.30	24300
28日 (水中標準)	混和剤A無添加	2.8	1.0	38.3	1.00	0.242	1.00	33600
	混和剤A添加	3.6	1.3	37.2	0.97	0.324	1.34	33500

強度は平均値

引張強度 = α × (圧縮強度)^{2/3}

レベルはほぼ同等であるが、混和剤Aを添加したコンクリートは、発熱量が若干大きいものの、弾性係数が無添加コンクリートに比較して小さい（表-6参照）ために相殺効果によりこのような結果をもたらしたものと判断される。またS3測点の混和剤A無添加の壁では、材齢6日において応力計測値に不連続降下点が見られる。これは外部拘束応力を主原因とする内部ひび割れの発生を示すものと判断されるが、混和剤A添加壁にはこれが見られない。応力レベルがほぼ同値でありながらこの差が生じたのは、混和剤Aの引張強度増進効果によるものと判断される。なお、構造物内の引張強度が室内試験値の約8割と仮定し、S3応力計測値から求まるひび割れ指数³⁾は無添加壁で約1.3（ひび割れ発生確率³⁾約45%）に対し混和剤A添加壁でその1.3倍の約1.7（ひび割れ発生確率約5%）と計算される。

4.5 壁部発生ひび割れ

図-10に材齢28日における壁部のひび割れ発生状況図を示す。発生状況及び施工時期（冬季）を考慮すると、セパレータ孔周辺のコンクリートの沈下によるひび割れを温度応力（方向性のない内部拘束応力）が進展させたものが主なもので、これに外部拘束温度応力によるものが一部加わっていると判断されるが、混和剤Aを添加した壁では無添加の壁に比較してひび割れ発生程度は軽微であり、初期ひび割れ対策として混和剤Aの添加が有効であると判断される。

5. まとめ

一連の試験より以下の結果を得た。

- a)混和剤Aを使用することにより、30%程度の引張強度増進効果が期待できる。また骨材、セメント種類によらず再現性がある。
- b)混和剤Aの引張強度増進効果は、初期材齢にお

参考文献

1) 寺澤ほか：引張強度増進用混和剤を用いたコンクリートの強度特性，土木学会第57回年次学術講演会講演概要集，V-730，2002.9

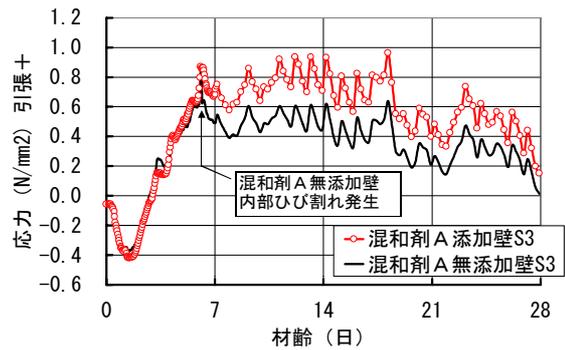


図-9 壁部コンクリート応力経時変化比較図

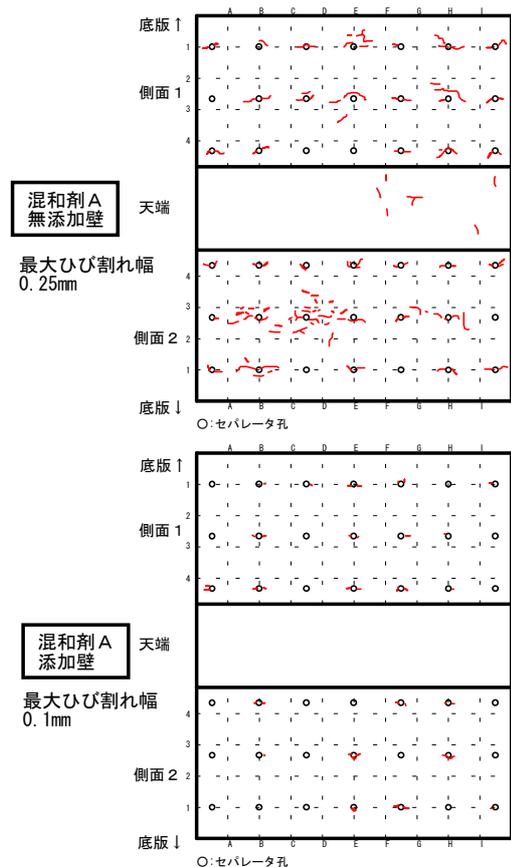


図-10 壁部ひび割れ発生状況比較図

- いて顕著であるが、電子顕微鏡観察などにより詳細なメカニズム確認が必要と判断される。
- c)実物大供試体試験では、無添加のひび割れ指数1.3を混和剤A添加により1.7に改善でき、混和剤Aの初期ひび割れ軽減効果が確認された。

- 2) 田澤，佐伯：コンクリート工学 微視構造と材料特性，技報堂出版，pp. 36-41，1998.10
- 3) 土木学会：[2002年制定]コンクリート標準示方書 施工編，pp. 42-43，2002.3