論文　次世代型多機能，多目的高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの諸物性

中西　博[*1]・矢口　稔[*2]・玉木　伸二[*3]・山田　一夫[*4]

要旨：近年，コンクリートへの要望として高流動，高強度化が期待され，高性能 AE 減水剤（以下 SP とする）に注目が集まっている。特に，低い水セメント比（以下 W/C とする）で，高い性能を有し，コンクリートに必要不可欠な材料である。日本では，良質な細骨材の枯渇により，単位水量の上限値対策に SP は使用されている。一方，コンクリートの耐久性では，ひび割れの低減が重要であり，その一方策に，自己収縮や乾燥収縮の低減が挙げられる。このような背景の中，SP の諸性能に加え，収縮低減性を持った新型 SP を見出し，幅広い W/C 領域で，良好なコンクリートの諸物性を示したので，ここに報告する。

キーワード：収縮低減，高性能 AE 減水剤，乾燥収縮，自己収縮

1.　はじめに

近年のコンクリート技術の進歩に対し，ユーザーにおいては，高強度，高流動性といった高い性能を有したコンクリートと共に，高い耐久性を有したコンクリートが期待されている。高い耐久性を有したコンクリート構造物を製造するための方法の一つとして，ひび割れ発生の低減技術の開発が有効的である。ひび割れ発生の主な要因としては，コンクリートの体積変化が挙げられ，その対策としては，単位水量の低減や乾燥収縮，自己収縮の低減が重要である。

日本においては，良質な骨材の不足により，所定の流動性を得るための単位水量が多くなり，規格上限を超えることがあり，高単位水量配合では，コンクリートの体積減少（乾燥収縮）を助長し，ひび割れの発生の懸念がある。また，高流動，高強度，超高強度コンクリートの製造に際し，W/C（W/B）が著しく小さく，粉体量が多い配合では，乾燥収縮の他に硬化体自身の自己収縮によるひび割れの発生が懸念されており，ひび割れの抑制は重要な課題である。

コンクリートの収縮に関する既存の研究[1)]より，収縮機構のメカニズムとしては，諸説あるが，毛細管張力説が最も有効であると考えられている。

現在使用されている収縮低減剤は，ペースト毛細管空隙水の表面張力を低下させることによりコンクリートの体積変化を低減するものである[1)～3)]。また，収縮低減剤は，主に乾燥による体積変化を小さくするものであるが，既往の研究[4)]から高粉体系の超高強度コンクリートの自己収縮低減効果にも有効であることが確認されている。しかし，収縮低減剤の使用量にあっては，セメント質量の 2%程度と多く，生コンプラントにおいて別のタンク（計量器）が必要となり，煩雑となる。

太田ら[5)]は，これら問題を解決するために，ポリカルボン酸（以下 PC とする）系 SP の分子構造中に収縮低減成分を導入することによって，既存の性能を損なわず，乾燥収縮低減効果を付与させうることを見出した。この報告の中では，現在の日本における SP の主用途である①単位水量低減対策や汎用コンクリート製造（高～中 W/C 領域），②高流動，高強度，超高強度コンクリート製造（低～超低水粉体比（以下 W/B とする）領域）のうち，特に高 W/C 領域において

*1 太平洋セメント（株）　中央研究所　セメント化学グループ　（正会員）
*2 （株）エヌエムビー　中央研究所　開発第二グループ
*3 竹本油脂（株）　第三事業部　研究開発部　化学グループ
*4 太平洋セメント（株）　中央研究所　セメント化学グループリーダー　工博　（正会員）

検討し，高い減水性と乾燥収縮低減性を持っていることが報告されている。

本研究では更に改良を加え，高 W/C から超低 W/B の広範囲で高い減水性やスランプ保持性といった SP の有する諸性能に加え，収縮低減性を持った新型 SP を見出し，多機能，多目的な次世代型 SP となりうる可能性について検証するため，これを用いたコンクリートの諸物性を報告する。

2. 実験概要

本研究では，新型高性能 AE 減水剤の多機能，多目的性を検討することを前提に，単位水量低減用から超高強度コンクリート製造用までの幅広い使用範囲で，既存の SP の有する性能を検証するとともに，新たに付与した新機能の乾燥および自己収縮低減効果を確認するため，W/C（W/B）を 52.5%，47.1%および W/B=22%の 3 水準として行った。

2.1 使用材料

使用材料を**表—1** に示す。

セメントには普通ポルトランドセメントを用い，細骨材には陸砂，粗骨材には，硬質砂岩砕石を用いた。SP1，SP2 として市販の PC 系 SP を用い，N1，N2 として，新型 PC 系 SP を用いた。SP1 は，アクリル酸系グラフト共重合体を主成分としたものであり，SP2 は末端スルホン基を有するメタクリル酸系グラフト共重合体を主成分としたものである。N1，N2 とは，無水マレイン酸系グラフト共重合体を主成分とした SP の分子構造中に収縮低減成分を各々導入し，一つの高分子としたものである。N1 には，ジエチレンオキサイドジプロピレンオキサイドモノブチルエーテルを用い，N2 には，ジエチレンオキサイドモノブチルエーテルを用いた。SRA として，市販の低級アルコールアルキレンオキサイド付加物の収縮低減剤を用いた。なお，使用 SP の固形分濃度は 20%に調整して用いた。

2.2 配合

コンクリートの配合を**表—2** に示す。

W/C（W/B）は，前記した通り，高 W/C 領域（実験Ⅰ），中 W/C 領域（実験Ⅱ），低～超低 W/B 領域（実験Ⅲ）を代表して，52.5%，47.1%，22.0%の 3 水準として試験した。実験Ⅰ，Ⅱの目標スランプは 18cm とし，実験Ⅲについては，目標スランプフローを 65cm とした。スランプ（スランプフロー）の調整には，SP の添加量を調整した。また，実験Ⅰ，Ⅱの目標空気量は，4.5%とし，実験Ⅲについては，2.0%以下とし，空気量調整剤にて，適宜，調整した。

2.3 試験方法および項目

(1) 練混ぜ方法

コンクリートの練り混ぜには，50 リットル強制パン型ミキサを使用し，実験Ⅰ，Ⅱでは 90 秒間，実験Ⅲでは，コンクリートの状態（分離

表—1 使用材料

ｾﾒﾝﾄ	普通ポルトランドセメント 密度＝3.16g/cm^3 Bl’=3200
水	上水道水
細骨材	小笠産陸砂 密度=2.60g/cm^3,FM=2.75
粗骨材	岩瀬産砕石 密度=2.64g/cm^3,FM=6.54
混和剤	SP1，SP2:市販高性能 AE 減水剤 N1，N2:新型高性能 AE 減水剤 SRA:市販収縮低減剤
混和材	ｼﾘｶﾋｭｰﾑ 密度=2.20g/cm^3,比表面積=20m^2/g

表—2 コンクリート配合

実験水準	使用混和剤	W/C (%)	W/B (%)	SF/B (%)	s/a (%)	目標ｽﾗﾝﾌﾟ(cm)	目標空気量(%)	単位量（kg/m3）				
								W	C	SF	S	G
Ⅰ	SP1+SRA (SRA:C×2%) SP1 N1	52.5	－	－	48.3	18	4.5	163	310	－	871	948
Ⅱ	SP1 N1 N2	47.1	－	－	47.0	18	4.5	164	348	－	832	953
Ⅲ	SP2 N1	－	22.0	10	41.9	65*1	2.0>	175	715	80	591	832

*1：目標スランプフロー（cm）

等）を確認するため，静置時間 5 分を含む 9 分 30 秒間練り混ぜた。なお，1 バッチ当たりの練り量は 40 リットルとした。

（2）試験項目

スランプおよび空気量測定は，各々，JIS A 1101 および JIS A 1128 に準拠した。

圧縮強度試験は，JIS A 1108 に準拠し，材齢 3，7，28 日にて測定した。なお，実験Ⅲについては 1，3，7，28，91 日にて測定した。

凝結試験は，JIS A 1147 に準拠した。

長さ変化試験は，JIS A 1129 に準拠し，20℃，60％RH 室内で所定材齢まで保存し，乾燥収縮量を測定した。

凍結融解抵抗性試験は，JIS A 1148 に準拠した。

自己収縮試験は，日本コンクリート工学協会自己収縮委員会報告書「セメントペースト，モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法（案）」に準拠し，10×10×40cm の供試体を用いて，所定材齢まで 20℃室内中に供試体全面を被覆して保存し，測定した。

3. 実験結果および考察

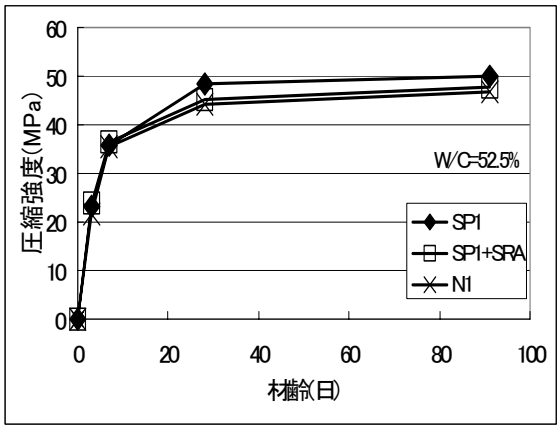
3.1 実験Ⅰの結果（高 W/C 領域）

W/C=52.5％でのコンクリート試験の結果を表—3 および図—1，2 に示す。

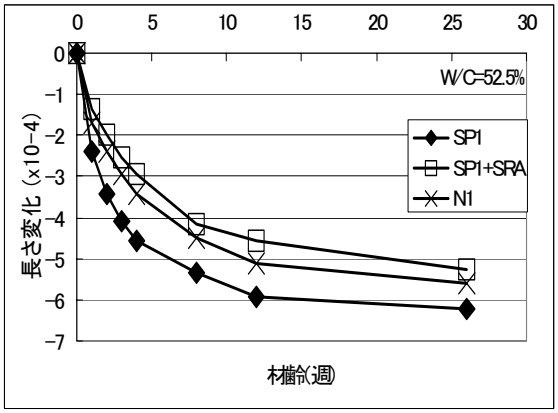
表—3 に示す通り，N1 は，比較用の SP1 よりも低添加量で所定の流動性を得ることができ，高い分散性（減水性）を示している。

凝結試験においては，収縮低減剤を使用したコンクリートは，既往の研究に見られる遅延傾向[6]を示さず，良好である。また，N1 は，市販の収縮低減剤使用量に比較し，約 1/40 程度と極少量であることが影響し，SP1 と同等の凝結性状であった。図—1 に示す通り，N1 は SP1 に比較し，ほぼ同等の強度発現性を示していることから，セメントの水和性状への影響はないものと推察される。

表—3 および図—2 より，材齢 4 週および 8 週での N1 使用コンクリートの乾燥収縮率は 3.44×10^{-4}，4.48×10^{-4} であり，SP1 使用コンクリートの 4.56×10^{-4}，5.36×10^{-4} に比較して，15～25％の収縮低減効果が認められる。一方，SRA を添加したコンクリートの乾燥収縮率は 2.96×



図—1　圧縮強度試験結果（実験Ⅰ）



図—2　長さ変化試験結果（実験Ⅰ）

表—3　実験Ⅰ結果

使用混和剤	添加量 (C×％)	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	空気量 (%)	凝結時間(時-分)		圧縮強度 (MPa)		乾燥収縮(×10^{-4})	
				始発	終結	1 週	4 週	4 週	8 週
SP1+SRA	1.0，2.0	19.5	4.8	6-30	9-35	36.6	45.1	2.96	4.16
SP1	1.0	18.0	4.7	5-50	8-20	35.7	48.5	4.56	5.36
N1	0.8	19.0	4.5	6-00	8-25	35.4	44.2	3.44	4.48

10^{-4}, 4.16×10^{-4} であり，SP1 に比較し，25～35％と高い収縮低減効果を示している。

N1 と SRA 添加コンクリートの SP1 使用コンクリートの乾燥収縮率に対する低減率としては，上記に示す通り，SRA 添加コンクリートがより高い低減率を示しているが，SRA の添加量が C×2％であるのに対し，N1 の添加量は C×0.8％と小さく，しかも，0.8％中の収縮低減成分については更に少ない量であり，約 1/40 程度である。このように少ない添加量においても比較的高い収縮低減効果を示すことが，N1 の特徴である。

本実験結果が示す通り，N1 は，既存の SP と同等の性能を有し，かつ，収縮低減効果が確認され，コンクリートの単位水量対策にも十分に適用可能な性能を有し，多機能型であることが確認された。

3.2　実験Ⅱの結果（中 W/C 領域）

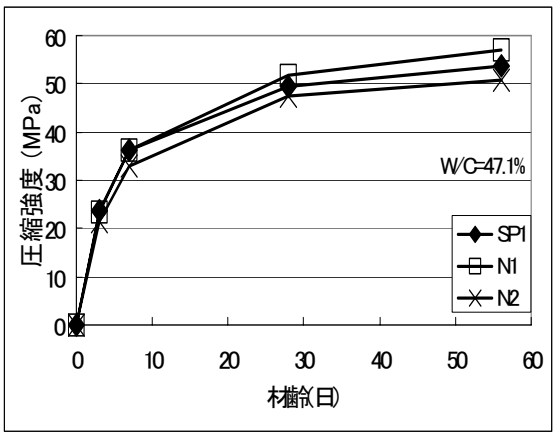
W/C＝47.1％でのコンクリート試験の結果を**表—4** および**図—3～5** に示す。

表—4 に示す通り，N1 および N2 は，SP1 に比較し，低添加量で，所定の流動性を得られ，かつ，60 分後のスランプの経時変化も小さく，高分散性，高スランプ保持性を有している。

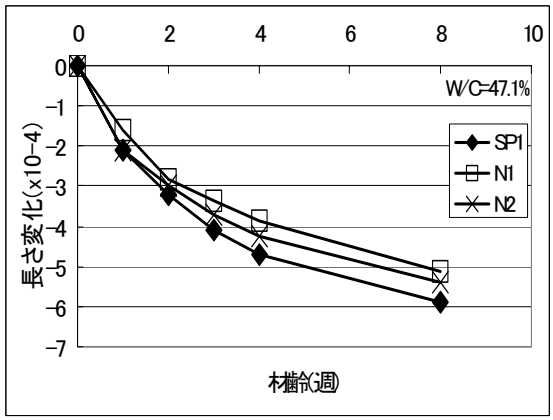
凝結試験においては，SP1 に比較し，スランプ保持性を高めたことにより，始発，終結時間とも 1～2 時間程度遅延している。

凝結時間の遅延により，初期強度への影響が懸念されたが，**図—3** に示す通り，圧縮強度試験結果では，初期材齢においても，概ね，同等の強度を示しており，特段の問題となる値ではなく，良好であると考えられる。

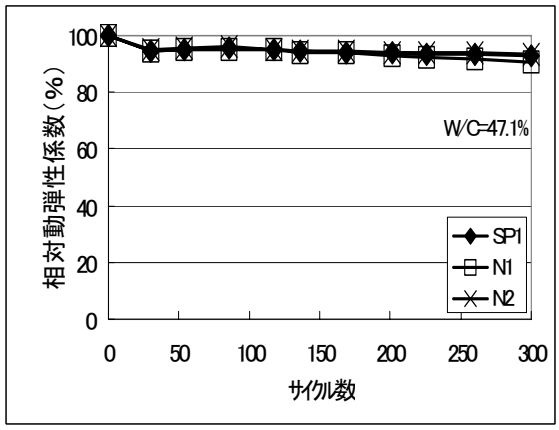
図—4 に示す通り，材齢 4 週および 8 週の乾燥収縮率は各々，N1 で 3.9×10^{-4}，5.1×10^{-4}，N2 で 4.2×10^{-4}，5.4×10^{-4} であり，SP1 の 4.7×10^{-4}，5.9×10^{-4} に比較して，N1 で 15～20％，N2 で 10％程度の収縮低減効果を示した。この W/C



図—3　圧縮強度試験結果（実験Ⅱ）



図—4　長さ変化試験結果（実験Ⅱ）



図—5　凍結融解抵抗性試験結果（実験Ⅱ）

表—4　実験Ⅱ結果

使用混和剤	添加量(C×%)	ｽﾗﾝﾌﾟ(cm)		空気量(%)	凝結時間(時-分)		圧縮強度(MPa)		乾燥収縮(×10^{-4})		耐久性指数
		0 分	60 分		始発	終結	1 週	4 週	4 週	8 週	
SP1	0.75	17.9	12.5	4.6	5-05	7-20	36.3	49.6	4.7	5.9	93
N1	0.60	19.2	18.1	4.6	6-20	8-50	36.4	51.9	3.9	5.1	91
N2	0.55	17.8	17.8	4.8	7-05	9-25	33.1	47.5	4.2	5.4	93

領域でも既存の SP の性能を保持しつつ，収縮低減効果という新しい機能が付与されている。

図—5 に示す凍結融解抵抗性試験結果では，N1 および N2 とも，既存高性能 AE 減水剤である SP1 と比較して，同等の耐久性指数（SP1，N2：93%，N1：91%）を示しており，十分な耐凍害性を有している。

本実験結果から，本 W/C 領域においても，単位水量対策時と同様に，十分に適用可能であることが確認された。

3.3　実験Ⅲ結果（低 W/C～超低 W/B 領域）

W/B=22%でのコンクリート試験の結果を**表—5** および**図—6，7** に示す。

表—5 に示す通り，N1 は SP2 と同等の添加量において，所定の流動性を得ることができ，フレッシュコンクリートは，どちらも良好な性状を示した。また，スランプフローロスについては，N1 使用コンクリートが SP2 使用コンクリートよりも小さい値となった。

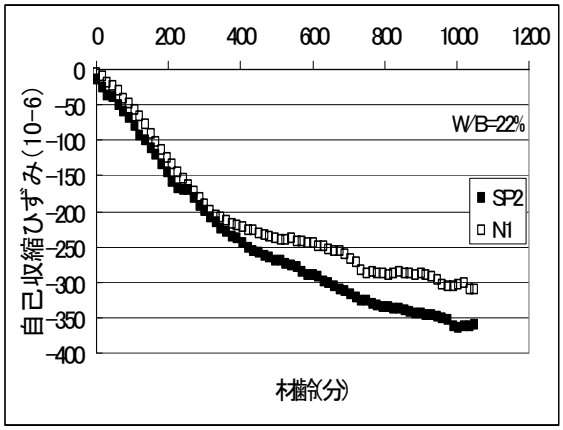
凝結時間においては，始発，終結時間とも，スランプ保持性の高い N1 が，SP2 に比較し，1～2 時間遅延する傾向を示した。

圧縮強度試験結果より，N1 は SP2 に比較し，凝結遅延に伴い，材齢 1 日で約 10%の低い値となったが，材齢の進行に伴い，材齢 7 日でほぼ同等となり，28 日では，約 130MPa となり，十分な強度発現を示した。

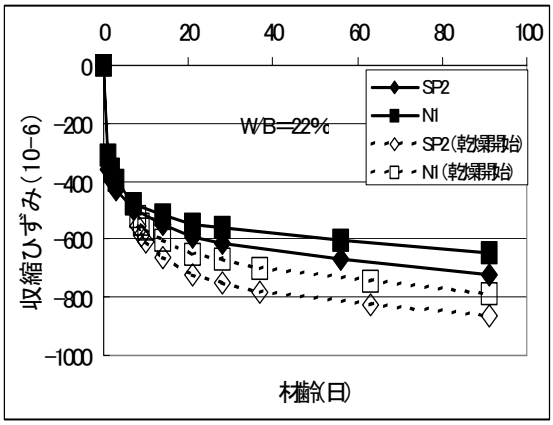
図—6 に示す通り，凝結の始発頃から約 1 日までの自己収縮ひずみを測定すると，終結を迎えた頃より，それぞれの勾配に変化が見られ，N1 は SP2 に比較し，勾配が緩やかとなり，自己収縮ひずみに差が確認された。

材齢約 1 日後の自己収縮ひずみは，N1 では 300×10^{-6} であり，SP2 では，360×10^{-6} となり，約 20%の低減効果を示していることが確認された。材齢 13 週における自己収縮低減効果は，約 10%となり，N1 は，高粉体系の超高強度コンクリートの自己収縮低減効果を有していることが確認された。

図—7 に示す通り，材齢 7 日より供試体表面の被覆を取り去り，乾燥を条件に加えた。材齢 7～91 日の間の乾燥+自己収縮量は，SP2 で約 370μm，N1 で約 310μm であった。その収縮低減効果は，約 15%となり，全収縮に対しても N1 の有効性が確認され，W/B＝22%という超低 W/B 領域においても，自己収縮の低減や乾燥を



図—6　自己収縮ひずみ（1 日まで）



図—7　全収縮ひずみ（91 日まで）

表—5　実験Ⅲ結果

使用混和剤	添加量(C×%)	ｽﾗﾝﾌﾟﾌﾛｰ(mm)	空気量(%)	凝結時間(時-分)		圧縮強度（MPa）			自己収縮(×10⁻⁴)		全収縮(×10⁻⁴)	
				始発	終結	1 日	1 週	4 週	1 日	13 週	4 週	13 週
SP2	1.8	680	1.5	6-25	8-05	54	98	133	3.6	7.2	7.5	8.6
N1	1.8	645	1.5	8-50	10-25	45	103	127	3.0	6.5	6.7	7.9

含む全収縮の低減に大きく貢献できるものであることが確認された。

4. まとめ

収縮低減成分をPC系SPの分子構造中に組み込んだ次世代多機能，多目的型高性能 AE 減水剤を使用したコンクリートの諸性状を評価した結果を以下にまとめる。

(1)比較的 W/C の高い領域において，新型高性能 AE 減水剤は，高い減水性，良好な凝結，強度発現性を示すとともに，10～20%の乾燥収縮低減効果を付与することが可能であった。

(2)汎用なコンクリートを対象とした W/C 領域において，新型高性能 AE 減水剤は，既存の高性能 AE 減水剤に比較し，高い減水性を持ち，かつ，良好なスランプ保持性，強度発現性を示した。また，凍結融解抵抗性も十分に持ち，新しい機能として乾燥収縮低減効果を 10～20%付与することが出来た。

(3)超低 W/B 高粉体系高強度コンクリート製造領域においても，新型の高性能 AE 減水剤は，既存の高性能 AE 減水剤と比較し，同等の性能を有していた。また，本領域において懸念される自己収縮についても初期～中，長期にかけて，10～20%の収縮低減効果を示し，かつ，乾燥を条件として加えた全収縮についても約 15%の低減効果を示し，新型高性能 AE 減水剤として十分な性能を発揮していた。

(4)市販の収縮低減剤使用時と比較した場合，その効果は小さいが，添加量が約 1/40 で，1/2～1/3 程度の収縮低減効果が得られることが確認され，低添加量で，高い収縮低減効果が得られた。

(5)本実験全体を通じて，新型高性能 AE 減水剤は，既存の高性能 AE 減水剤が有している全性能を持ち，近年の日本での高性能 AE 減水剤の主使用範囲である単位水量対策から超低 W/B 領域までの幅広い範囲において，高性能 AE 減水剤の性能としては新しい“乾燥および自己収縮低減効果”を付与することができ，高耐久で，高性能なコンクリートの製造に欠くことのできない多機能，多目的型の高性能 AE 減水剤であり，次世代の高性能 AE 減水剤となる可能性を有していることが確認された。

謝辞

本実験を行うにあたり（株）エヌエムビー，竹本油脂（株）第三事業部，香春太平洋セメント（株）コンクリート試験所，太平洋セメント（株）中央研究所セメント・コンクリート技術センター，第 4 グループの方々より多大なる指導，ご協力をいただいたことを，ここに記し，感謝申し上げます。

参考文献

1) 富田六郎，収縮低減剤：コンクリート混和剤の開発技術（第 2 章 11 節），株式会社シーエムシー，pp. 146-163，1998
2) 富田六郎，竹田邦夫，城所卓明：収縮低減剤を用いたコンクリートの乾燥収縮性状，セメント技術年報，No.37，pp.386-389，1983
3) 佐藤健，後藤孝治他：セメント硬化体の乾燥収縮を低減する有機質混和剤の作用機構，セメント技術年報，No.37，pp.65-68，1983
4) 谷村充，兵頭彦次，佐藤達三，佐藤良一：高強度コンクリートの収縮低減化に関する一検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.991-996，2000
5) Sugiyama，T，Ohta，A，Tanaka，Y：Shrinkage Reduction Type of Advanced Superplasticizer,FOURTH,CANMET/ACI/JCI International Symposium on advances in concrete technology，ACI SP-179，pp.189-200，1998
6) 谷村充，兵頭彦次：収縮低減剤を用いたコンクリートの基礎性状，日本建築学会大会学術講演概要集（北陸），pp.757-758，2002