

# 論文 フライアッシュ多量添加によるコンクリートのひび割れ抑制効果に関する検討

橋本 亮良\*1・溝渕 利明\*2

**要旨:** 近年、環境負荷低減や温度ひび割れ抑制の観点から、フライアッシュ等の混和材を多量添加したコンクリートの使用が注目されている。本研究では、温度ひび割れ抑制対策としてフライアッシュを多量添加した際の効果について検討するために、JIS 規格以上の混合比で添加した場合のコンクリートの力学特性と断熱温度上昇特性把握のための実験を行った。その結果、水結合材比に関係なく、フライアッシュを多量添加したコンクリートの断熱温度上昇特性は単位セメント量に依存していることを確認した。また、得られた力学特性値および断熱温度上昇特性値を用いて、柱状構造物を対象に温度ひび割れ効果の検討を行いその効果を把握した。

**キーワード:** フライアッシュ, 水和熱, 断熱温度上昇特性, ひび割れ抑制

## 1. はじめに

セメントの水和熱による温度応力が起因となる温度ひび割れは、ダムコンクリートに代表されるようなマスコンクリート構造物において、主な検討課題となっている。しかしながら、マスコンクリート構造物に限らず温度ひび割れは、施工条件や使用材料によって、比較的小規模な構造物においても生じていることがあるとの報告がされている<sup>1)</sup>。

セメントの水和反応の発熱量を抑制する手法としては、特にフライアッシュや高炉スラグ微粉末をセメントと置換し、セメントの使用量を減らすことで、水和熱を低減できることが広く適用されている。しかし、フライアッシュを多量に添加したコンクリートは、初期材齢における強度が小さいなど多くの検討項目も指摘されているためあまり使用されていないのが現状である。その反面、フライアッシュにはポゾラン反応による長期強度の増進が期待できることや、セメント使用量の削減を通じて、コンクリートの二酸化炭素排出量原単位を小さくできるため、環境負荷低減に有効的であると考えられている。

筆者らはこれまでに、フライアッシュコンクリートの断熱温度上昇特性は、単位セメント量にほぼ依存していることを確認した。また、水結合材比 50%でのフライアッシュコンクリートの圧縮強度特性を確認することができた。<sup>2)</sup>

本研究では、更なるデータの蓄積を目指し、水結合材比を 3 水準設定し、フライアッシュの添加量を変化させた場合の断熱温度上昇特性および強度特性を把握することを目的とした。さらに、得られた断熱温度上昇特性より、温度応力解析を行うことで、フライアッシュを多

量添加したコンクリートの温度ひび割れ効果について検討した。

## 2. 検討の概要

本検討では、温度ひび割れ抑制対策としてフライアッシュを多量に添加した場合の効果を評価するために、フレッシュコンクリート、硬化コンクリートおよびコンクリートの熱的特性について実験を行った。

実験は、フライアッシュ置換率及び水結合材比を検討要因として、表 - 1 に示す水準で行った。

## 3. 実験概要

### 3.1 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 3450cm<sup>2</sup>/g）を用いた。細骨材および粗骨材は、陸砂（密度 2.59g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 2.06%, 粗粒率 2.47%）、及び硬質砂岩砕石（密度 2.66g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.50%, 粗粒率 6.75%）を使用した。フライアッシュは、JIS A 6201 の II 種規格に適合するフライアッシュ（密度 2.35g/cm<sup>3</sup>）を用いた。混和剤は、リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体を主成分とする AE 減水剤標準型とポリカルボン酸エーテル系高性能 AE 減水剤を使用し、AE 剤は変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤を主成分とするもの(AE 剤 a)と変性アルキルカルボン酸化合物系陰イオン界面活性剤を主成分とする AE 剤 (AE 剤 b)を使用した。

表-1 要因と水準

要因	水準
水結合材比	0.35, 0.45, 0.55
フライアッシュ置換率(%)	0, 20, 40, 60

\*1 法政大学大学院 デザイン工学研究科都市環境デザイン工学専攻 (学生会員)

\*2 法政大学デザイン工学部都市環境デザイン工学科教授 博士(工学) (正会員)

表-2 コンクリートの配合

W/B - 置換率	空気量の範囲	スランプの範囲	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
			水	セメント	フライアッシュ	細骨材	粗骨材	混和剤	
(%) - (%)	(%)	(cm)	W	C	F	S	G	混和剤	AE 剤
35-0	4.5±1.0	23±1.5	160	457	0	692	1019	0.0075 *1	0.000 *3
35-20			152	343	87	697	993	0.0070 *1	0.002 *4
35-40			144	247	164	704	1040	0.0080 *1	0.001 *4
35-60			135	154	232	715	1053	0.0075 *1	0.005 *4
45-0		12±2.5	160	356	0	741	1053	250 *2	0.005 *3
45-20			152	270	68	767	1043	250 *2	0.008 *4
45-40			144	192	128	756	1072	250 *2	0.020 *4
45-60			135	120	180	785	1069	250 *2	0.025 *4
55-0			160	291	0	818	1029	250 *2	0.001 *3
55-20			152	221	55	826	1037	250 *2	0.008 *4
55-40			145	158	106	834	1045	250 *2	0.020 *4
55-60			135	98	147	847	1061	250 *2	0.025 *4

\*1:高性能 AE 減水剤(C×%), \*2:AE 減水剤(ml/C=100kg), \*3:AE 剤 a(C×%), \*4:AE 剤 b(C×%)

### 3.2 コンクリートの配合

本検討で用いたコンクリートの配合を表-2に示す。目標スランプ12cm、目標空気量4.5%とした。ただし、水結合材比35%の水準においては施工性を考慮し、目標スランプを23cmとした。

### 3.3 試験項目

#### (1)フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの試験として、スランプ試験(JIS A 1101)、空気量試験(JIS A 1128)ブリーディング試験(JIS A 1123)、および凝結試験(JIS A 1147)を行った。

#### (2)硬化コンクリート

硬化コンクリートの試験は、圧縮強度試験(JIS A 1108)と割裂引張強度試験(JIS A 1113)、及び静弾性係数試験(JIS A 1149)を行った。圧縮強度試験用供試体は、φ100×200mm、割裂引張強度試験用供試体は、φ150×200mmとし、打ち込み後2日で脱型したのちに水中養生を行い、材齢7、14、28、56、91日で試験を行った。なお、供試体の養生は20℃の水中養生とした。

#### (3)熱的特性

熱的特性試験は、断熱温度上昇特性装置を用いて行った。プラスチック製の円筒容器(外径φ170mm×高さH240mm)にコンクリートを50打ち込み、供試体中央部の温度測定を行った。測定間隔は、30分間隔とし、10日間～14日間実験した。

これにより得られた温度履歴から温度上昇特性に関して同定解析を行い、以下に示す断熱温度上昇式を求めた。

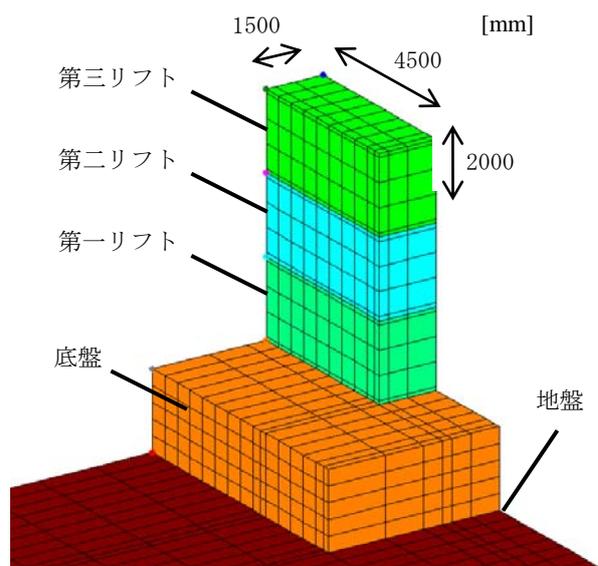


図-1 柱モデルメッシュレイアウト

$$Q(t)=K[1-\exp\{-\alpha(t-t_0)^\beta\}] \quad (1)$$

ここで、Q(t):材齢tまでの断熱温度上昇量(℃)、  
K:終局断熱温度上昇量(℃)、  
α:断熱温度上昇速度に関する定数、  
β:断熱温度上昇速度に関する定数、  
t:材齢(日)、t<sub>0</sub>:発熱開始材齢(日)

#### 4. ひび割れ抑制対策評価のための温度応力解析

力学特性試験および熱特性試験結果から、フライアッシュ多量添加によるひび割れ抑制効果の評価を行うために図-1に示すような柱状構造物を用いて温度応力解析を行った。図に示す3次元FEMモデルは、幅3m、長さ9m、1リフト高さ2mの柱状構造物を想定した1/4モデルである。

#### 5. 試験結果および考察

##### 5.1 フレッシュコンクリート

単位水量とフライアッシュ置換率の関係について図-2に示す。目標とするスランプを得るのに必要な単位水量は、図-2より置換率Rの増加に伴い低減するという従来と同様の結果となった。その低減率は、置換率10%で約4kg/m<sup>3</sup>であった。ブリーディングは、フライアッシュ置換率の増加に伴い低減する傾向を示し、スランプの経時変化は、練上がり後90分まで置換率が増加してもほとんど変化は無かった。

凝結試験は、図-3に示すように各水結合材比とも、置換率の増加に伴い、凝結始発、終結時間も遅くなる傾向を示した。60%置換では置換しない場合に比べて2倍近く遅くなる結果となった。したがって、本検討で確認はしていないが、従来から言われているように、寒中時での施工は難しいと考えられる。

##### 5.2 力学特性

圧縮強度は、各材齢で置換率の違いにより、結合材比-強度の関係が異なることから、図-4に示すように各材齢で結合材比ごとに置換率-強度関係を求めた。図-4から、各結合材比とも置換率と圧縮強度はほぼ線形関係にあった。これらの関係から、目標とする強度に対して保証材齢、水結合材比を選定することができることとなる。ただし、今回検討を行った範囲内でのフライアッシュ置換率(0~60%)で任意に置換率を設定することが難しいことから配合強度を目的変数として結合材比(B/W)、フライアッシュ置換率( $\alpha$ )、積算温度(M)を説明変数として重回帰分析を行った。重回帰式を以下に示す。

$$f'_{ck} = 21.04B/W - 0.592\alpha + 14.97\log M - 43.27 \quad (2)$$

式から推定した圧縮強度と試験結果を比較した結果を図-5に示す。

図-5から推定値と試験値はほぼ同様な値を示しており(重相関係数 0.972)式(2)を用いて本検討範囲内ではあるが、任意の置換率、保証材齢(積算温度)、目標強度から、水結合材比を推定することが可能となる。

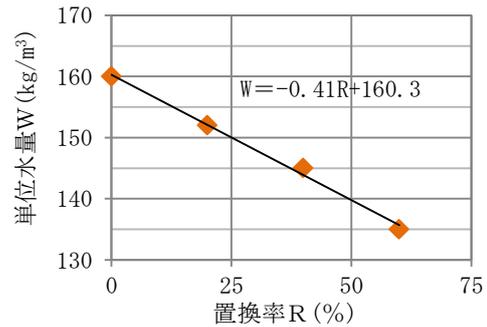


図-2 置換率と単位水量の関係

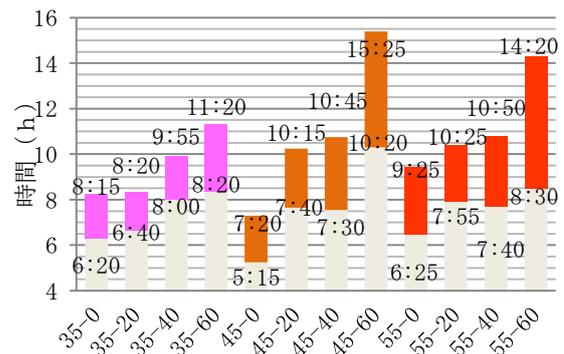


図-3 始発時間と終結時間

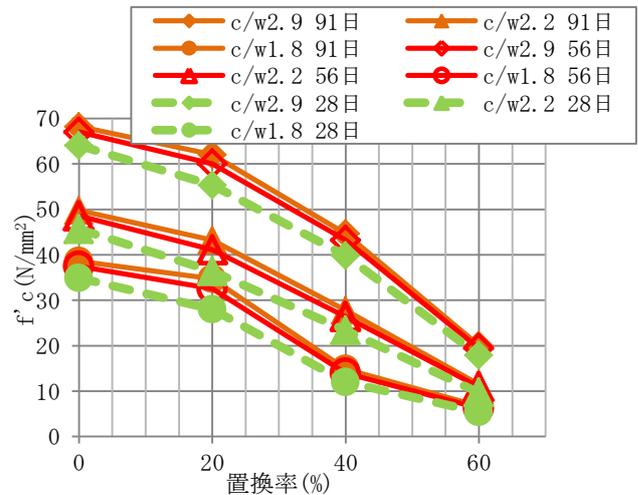


図-4 置換率と圧縮強度の関係

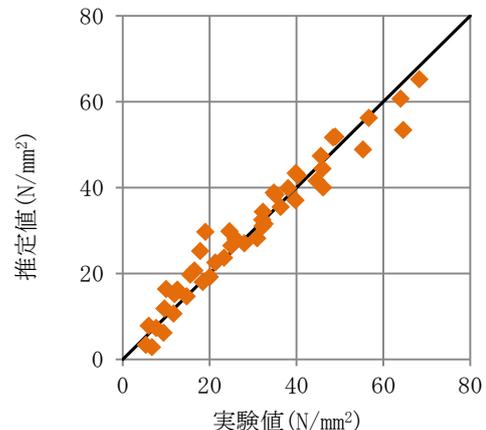


図-5 推定値と試験値の比較

次に、圧縮強度と引張強度、及び圧縮強度とヤング係数の関係について図 - 6、図 - 7 に示す。

図 - 6、図 - 7 から引張強度およびヤング係数ともひび割れ制御指針等で示されているように水結合材比とフライアッシュ置換率に関係なく圧縮強度を用いて表すことが可能である。各式を以下に示す。

$$f_t = 0.142 f'_c{}^{0.835} \quad (3)$$

$$E_c = 6.73 f'_c{}^{0.388} \quad (4)$$

### 5.3 断熱温度上昇特性

断熱温度上昇試験結果を元に、各ケースの単位セメント量Cと終局断熱温度上昇量Kおよび上昇速度に関する係数 $\alpha$ との関係をカロリメータより得られた温度履歴から同定解析を行い、断熱温度上昇特性の推定を行った。同定解析により推定した断熱温度上昇特性について、図 - 8、図 - 9 に示す。断熱温度上昇特性の各係数は、単位セメント量のみ依存し、単位セメント量の増加に伴って大きくなることわかる。

$$K = 0.0936C + 13.9 \quad (5)$$

$$\alpha = 0.0041C + 0.031 \quad (6)$$

### 6. フライアッシュ多量添加による温度ひび割れ抑制効果の検討

検討条件としては、目標スランプ 12cm、目標空気量 4.5%、設計基準強度 24N/mm<sup>2</sup>(変動係数 10%)とした。フライアッシュ置換率は 0%(case1)、30%(case2)、60%(case3)として、目標強度を満足できる保証材齢と水結合材比をそれぞれ選定した。検討条件を満たす配合について、管理材齢、水結合材比、単位水量、単位粉体量を表 - 3 に示す。

東京都における夏季の施工を想定し、外気温には東京都の 09~11 年の平均気温を使用した。施工スケジュールは、底盤を 7 月に打ち込み、続いて柱部は 8 月から週に 1 リフトのスケジュールで打ち込みを行う。解析期間は、4 月から 11 月までの 8 ヶ月間とした。本解析に用いた物性値について表 - 4 に示す。

表-3 検討条件を満たす管理材齢、配合

	管理材齢	W/B	単位量(kg/mm <sup>3</sup> )		
	(日)	(%)	W	C	F
case1	28	0.55	160	291	0
case2	91	0.55	148	188	80.7
case3	91	0.331	136	164	246

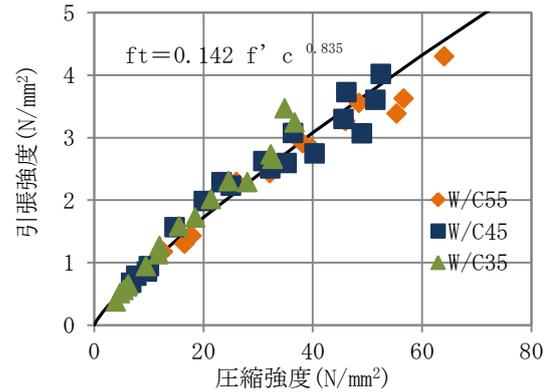


図 - 6 圧縮強度と引張強度の関係

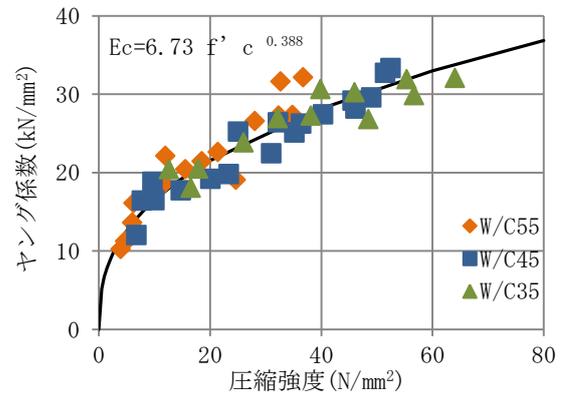


図 - 7 圧縮強度とヤング係数の関係

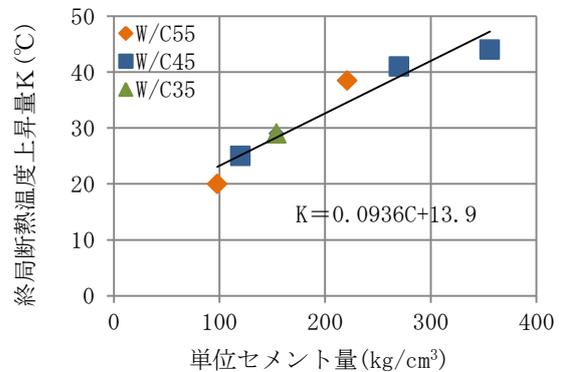


図 - 8 単位セメント量と断熱温度上昇量の関係

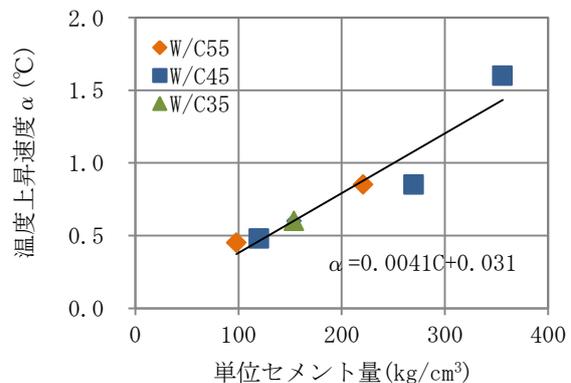


図 - 9 単位セメント量と温度上昇速度の関係

温度応力解析結果について図-10に最高温度の分布を示す。図-10より、最高温度分布に関してはフライアッシュ添加率が大きくなると共に、温度は低下することが分かる。case1において各リフトの中心部温度は70℃程度まで上昇したが、case2, case3では60℃を下回るまで温度上昇を抑えることが出来ている。

次にひび割れ指数についてであるが、各リフトの中心部の履歴を見た時、第1リフトにおいてひび割れ指数の低下が目立った。そこで図-11に、図-10のA点におけるひび割れ指数履歴について示す。図-11より、ひび割れ指数はフライアッシュ置換率が大きくなるほど向上していることが分かる。無置換のコンクリートでは打ち込みから材齢14日程度で1.5を下回った。この時点での指数を各caseごとに比較すると、case1で1.46、case2で1.75、case3では2.28となり、フライアッシュを添加することによりひび割れを防止する効果が得られていることが確認できる。打ち込みから30日以降では、case2の指数が他と比べて低下しているが、これは3ケースの中でcase2の配合では強度発現が比較的遅いことが影響していると考えられる。

## 7. まとめ

本検討では、実験より得られたフレッシュ特性、力学特性、及び熱特性から推定式を立て、フライアッシュを結合材として高置換したコンクリートの強度推定、断熱温度上昇値の推定を行った。さらに、求めた推定値より、温度応力解析を行うことで、フライアッシュを多量添加したコンクリートの温度ひび割れ抑制効果について検討した。

検討項目より、以下に示す結論を得た。

- 1)水結合材比に関わらず、フライアッシュを置換したコンクリートの強度特性は曲線近似による推定が可能であると考えられる。
- 2)水結合材比に関わらず、フライアッシュを置換したコンクリートの断熱温度特性は単位セメント量に依存している。
- 3)フライアッシュを高置換することにより(本検討では内割り60%)、断熱温度上昇量の抑制に大きな効果がある。また、これに伴いひび割れの防止にも効果を発揮すると考えられるが、断熱温度上昇量や強度発現性を考慮し、単位セメント量、水結合材比、置換率を決定する必要がある。

表-4 解析に用いた物性値

物性値	地盤	底盤	柱
初期温度(℃)	平均気温	平均気温+5	
比熱(kj/kg・℃)	1.4	1.15	1.15
密度(kg/m <sup>3</sup> )	2100	2400	2400
熱伝導(W/m・℃)	1.7	2.7	2.7
線膨張(μ/℃)	10	10	10
ヤング(N/mm <sup>2</sup> )	3000	20000	6730・fc <sup>0.388</sup>

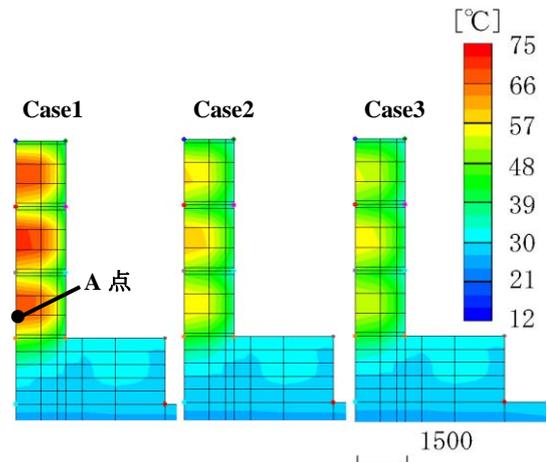


図-10 最高温度分布図

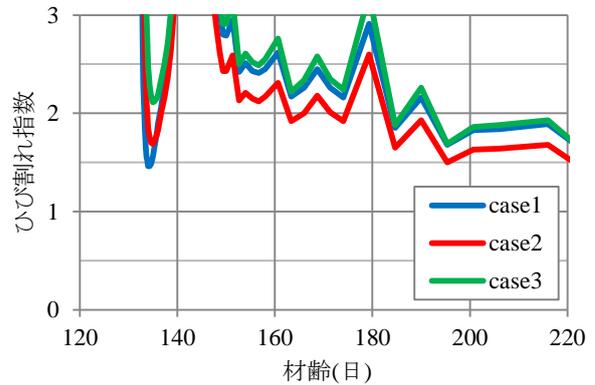


図-11 柱モデルのひび割れ指数履歴

## 参考文献

- 1) 吉岡慧, 吉田和隆, 吉武勇, 浜田純夫, 北原敦志: 簡易試験によるHVFAコンクリートの断熱温度上昇量の推定, Journal of Society of Materials Science, Vol.57, No.5, pp.509-514, 2008.5
- 2) 細川大介, 竹内直也, 溝渕利明: フライアッシュ多量添加によるコンクリートの水和熱抑制効果に関する検討 コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011
- 3) JCI 社団法人 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, pp47-52, pp104-114, 2008

- 4) 松永 篤, 山根 昌治, 竹田 宣典, 十河 茂幸 :  
温度ひび割れ抵抗性に及ぼす低熱セメントおよび  
混和材料の影響, コンクリート工学年次論文報告集,  
Vol.17, No.1, 1995
- 5) 福留 和人, 坂本 守, 鈴木 達雄, 長瀧 重義 :  
フライアッシュを多量に用いた硬化体の基本特性,  
コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2,  
1998
- 6) 大友 健, 横井 謙二, 松岡 康訓 : 混和材料を大  
量に添加した低発熱コンクリートの温度ひび割れ  
抑制効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16,  
No.1, 1994