

## 報告 海洋環境下における石炭灰を使用したRC構造物の施工報告

大城 良信<sup>\*1</sup>・仲本 文範<sup>\*2</sup>・山田 義智<sup>\*3</sup>・大城 武<sup>\*4</sup>

要旨：本施工報告では、石炭灰(以下フライアッシュと称す)を混和材として使用したコンクリートを実環境下の護岸コンクリート構造物に打設し、そのフレッシュ性状、強度特性および乾燥収縮等を確認している。ここでは、初期性状に加え、1年半経過後の塩分浸透性についても検討している。この現場実証試験により、フライアッシュのコンクリート混和材としての有効性を確認している。

キーワード：護岸コンクリート構造物, フライアッシュ, 現場実証試験, 塩分浸透性

### 1. はじめに

沖縄県内の火力発電所から発生するフライアッシュは、年間14万トンで、その内約6万トンがセメント材料として利用され、残り8万トンが産業廃棄物として埋立て処分されている。また、平成14年に新たに稼働する火力発電所において、さらに年間11万トンのフライアッシュが発生すると予測され、電力の安定供給、地域環境保全の面からもフライアッシュの有効利用技術の開発が望まれている。

文献<sup>1)</sup>によれば、フライアッシュを混入したコンクリートは、普通コンクリート(以下ベースコンクリートと称す)に比べ、優れた遮塩性能を有することが示されている。沖縄県は、亜熱帯海洋性気候に属し、厳しい塩害環境下におかれている。そこで、フライアッシュの混入により遮塩性の向上を期待し、新設火力発電所構内の外洋に面した護岸コンクリートにフライアッシュコンクリートを打設した。ここでは、セメント代替(20%, 以下内割りと称す)および細骨材代替(80kg/m<sup>3</sup>, 以下外割りと称す)で配合設計した2種類を使用している。打設範囲は新設護岸の一部で、各々のフライアッシュコンクリートについて、護岸長5m、容量16.5m<sup>3</sup>であった。

本報告では、現場施工に際してのコンクリート配合設計、フレッシュ性状及び硬化コンクリートの特性、塩化物イオンの浸透性等に注目して報告する。

### 2. コンクリート配合決定及び室内試験結果

#### 2.1 試験概要

コンクリート配合設計に先立ち、モルタル試験を行い、そのデータに基づいてコンクリートの配合設計を行った。さらに、施工性の確認のため、実機プラントで配合の確認を行っている。

現場施工に際しては、生コンの出荷時に工場にて諸試験用の試料を採取し、また、施工現場においても同様の試料を採取した。施工後1年半経過時にコンクリートコアを採取し、圧縮強度試験および塩化物濃度分析を行っている。

#### 2.2 コンクリートの配合

##### (1) 使用材料

使用材料は、原則として現場施工に出荷する生コン工場で通常使用しているものとした。その物性値を表-1、表-2に示す。フライアッシュは、県内の火力発電所で外国産炭(豪州産；ワンボ炭)を燃焼する際に副産したものである。

\*1 沖縄県生コンクリート工業組合 中南部地区共同試験所試験係 (正会員)

\*2 沖縄電力(株) 電力本部発電部発電管理課副長

\*3 琉球大学 工学部環境建設工学科助手 博士(工学) (正会員)

\*4 琉球大学 沖縄職業能力開発大学校長 Ph.D. (正会員)

## (2) 配合要因

配合要因を表-3に示す。現地で施工されている護岸用のベースコンクリートに基づき、表-3に示す条件で配合設計が決定された。

表-1 使用材料の物性値

材 料	種類・産地	密度(g/cm <sup>3</sup> )	粗粒率
セメント	普通(N)	3.16	-
海砂	新川沖産	2.62	2.17
砕砂	本部半島産	2.67	3.10
砕石	本部半島産	2.70	60.2%
AE減水剤	リグニンスルホン酸(標準形)		

実積率

表-2 フライアッシュの物性値<sup>\*</sup>

材 料	種 類	密度(g/cm <sup>3</sup> )	強熱減量(%)	MB量(%)
フライアッシュ	ワンボ炭 <sup>**</sup>	2.20	6.3	1.12

<sup>\*</sup>JIS A 6201 種

<sup>\*\*</sup>オーストラリア産

表-3 配合要因

要 因	条 件
単位水量	175kg/m <sup>3</sup> 以下
水粉体比	60%以下
スランプ	12±2.5cm
強 度	24N/mm <sup>2</sup> 以上(材齢28日)
混和剤使用量	0.4(標準使用量)~0.6%
細骨材率	37 ~ 48%

## (3) モルタル試験

コンクリートの配合設計を効率よく実施するため、コンクリート中のモルタル部分でフロー

値を測定し、その値からコンクリートのフレッシュ性状を推定している。本試験では、ベース配合のモルタル部分のフロー値を基準とし、フライアッシュを使用した配合のフロー値と比較している。その測定結果を表-4に示し、また、フライアッシュ量とフロー値の関係を図-1に示す。これらの結果は、内割配合、外割配合ともフライアッシュ使用量の増加に伴い、フロー値が減少する傾向を示している。特に外割配合の場合、フライアッシュ量が100kg/m<sup>3</sup>を超えると、フロー値の低下は大きくなる。このことは、粉体量の増加とフライアッシュの特性(未燃カーボン及び不整形粒子)の影響と考えられる<sup>2)</sup>。

これらの試験結果より、コンクリート配合設計に用いるフライアッシュは、内割配合で60kg/m<sup>3</sup>、外割配合で90kg/m<sup>3</sup>までとした。

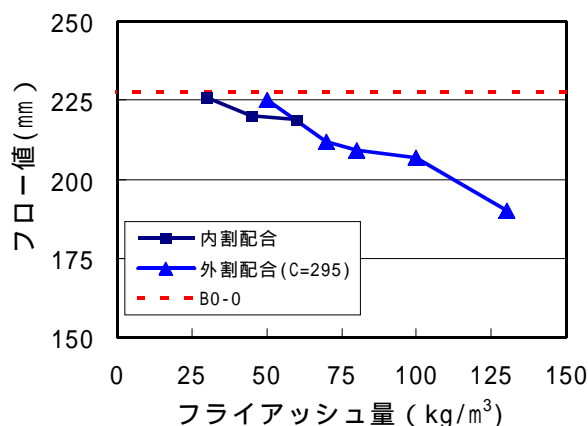


図-1 フライアッシュ量とフロー値の関係

表-4 モルタルフロー測定結果

配合区分	W/C	W/(C+F)	海砂:砕砂	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				AE減水剤	フロー値(mm)
	(%)	(%)	(%)	W	C	S	F	×(C+F)%	
B0-0	56.0	-	65:35	169	302	860	-	0.4	230×225
内割り	F1-60	70.0	65:35	175	250	847	60	0.4	220×218
	F1-45	66.0	65:35	175	265	830	45	0.4	220×220
	F1-30	62.5	65:35	175	280	844	30	0.4	226×226
外割り	F2-50	59.3	54:46	175	295	785	50	0.6	225×225
	F2-70	59.3	54:46	175	295	756	70	0.6	213×211
	F2-80	59.3	54:46	175	295	743	80	0.6	209×209
	F2-100	59.3	54:46	175	295	637	100	0.6	220×220
	F2-100	59.3	54:46	175	295	719	100	0.6	207×207
	F2-100	59.3	54:46	175	295	790	100	0.6	195×192
	F2-130	59.3	54:46	175	295	603	130	0.6	198×195

(4) コンクリート配合設計

モルタル試験結果から仮配合を設定し、室内試験練りでコンクリート配合を決定した。その際、現地の護岸コンクリート構造物で使用されているコンクリート配合(呼び強度24,スランプ12cm)をベースとした。なお、今回の配合設計では、高性能AE減水剤を使用していない。

各設計配合のフレッシュ性状を比較検討するため、コンクリート凝結試験、スランプ試験、空気量試験等をJIS規格に基づいて実施した。

(5) コンクリート試験

a) スランプと空気量の測定

室内試験練りの配合を表-5に示す。これらの配合から得られたスランプと空気量の測定結果等を表-6に示す。

内割配合(F1-60)の場合、単位フライアッシュ量60kg/m<sup>3</sup>で、スランプ13cm、空気量5.0%の目標値が得られた。このことは、使用しているフライアッシュの品質が良く、セメント代替として使用可能であることを示している。

一方、外割配合では、単位フライアッシュ量50kg/m<sup>3</sup>まではスランプ低下が認められない。しかし、80kg/m<sup>3</sup>に増加すると、細骨材率を40%に減少させ、海砂と砕砂の混合割合を50:50,AE減水剤を標準使用量(0.4%)の1.5倍増に配合を修正をすることにより、目標スランプの確保が可能となった。さらに、単位フライアッシュ量90kg/m<sup>3</sup>に増加すると、細骨材率及び細骨材の混合割合を修正することにより目標スランプの確保は可能であるが、粘性が増加し、作業性が低下するため実用化が困難であると考えられる。

これらの結果より、フライアッシュの混入量

は、内割配合で単位フライアッシュ量60kg/m<sup>3</sup>、外割配合で80kg/m<sup>3</sup>とした。

表-6 スランプ及び空気量の測定結果

配合区分	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度( )
B0-0	12.5	5.8	17.6
F1-60	13.0	5.0	17.8
F2-50	13.0	3.6	18.1
F2-70	14.0	4.5	18.5
F2-80	12.0	4.5	17.8
F2-90	13.5	4.5	17.9

b) 凝結試験

凝結試験は、最も混和剤使用量の多い外割配合(F2-90)と、ベース配合(B0-0)で比較検討を行った。その結果を図-2に示す。

F2-90配合は、ベース配合に比較して凝結時間が始発、終結共に5時間程度遅延している。その理由は、フライアッシュの使用と多量の混和剤使用によるものと考えられるが、ここではフライアッシュを砂代替として用いており、セメント量を一定量確保している為、凝結の遅延は、後者の混和剤多量使用による影響が大きいものと考えられる。

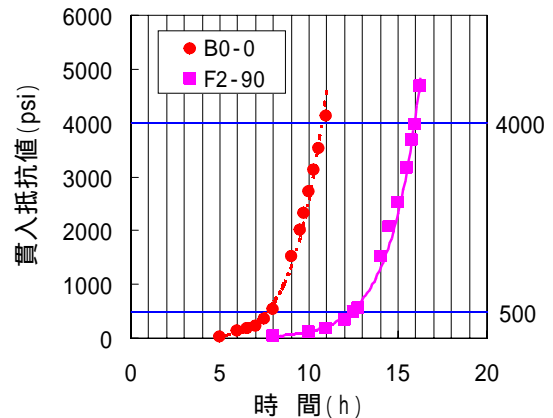


図-2 凝結試験結果

表-5 室内試験練り配合表

配合区分	W/C (%)	W/(C+F) (%)	s/a (%)	海砂:砕砂 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					AE減水剤 x (C+F) %
					W	C	F	S	G	
B0-0	56.0	-	47.2	54:46	173	309	-	854	971	0.4
F1-60	70.0	56.5	47.8	54:46	175	250	60	851	947	0.4
F2-50	59.3	50.7	44.7	54:46	175	295	50	785	987	0.4
F2-70	59.3	47.9	40.0	50:50	175	295	70	693	1057	0.6
F2-80	59.3	46.7	40.0	50:50	175	295	80	688	1052	0.6
F2-90	59.3	45.5	38.0	30:70	175	295	90	648	1079	0.6

c) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、標準養生3,7,28,91日後に行った。圧縮強度の発現状況を図-3に示す。

標準養生3日では、内割配合がベース配合より4N/mm<sup>2</sup>低い値を示すのに対し、外割配合は同程度の値を示す。養生7日においては、養生3日と同様の傾向を示す。また、養生28日では、内割配合がベース配合より4N/mm<sup>2</sup>低いのに対し、外割配合(F2-90)は6N/mm<sup>2</sup>高い値を示している。その他の外割配合(F2-70,F2-80)は、ベース配合とほぼ同程度の値を示す。さらに、養生91日において、内割配合とベース配合がほぼ同じ値(40N/mm<sup>2</sup>)を示すのに対し、外割配合が内割配合よりも9~10N/mm<sup>2</sup>の高い値を示す。なお、外割配合の強度が高いのはW/(C+F)が小さいことによる。

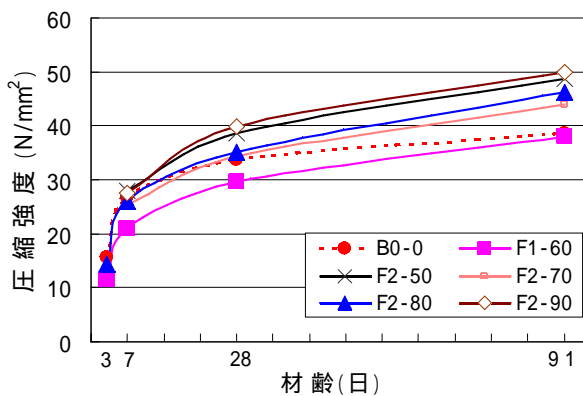


図-3 圧縮強度の発現状況

3. 実機プラントでの配合決定

実機プラントでの配合は、室内試験練りの結果を修正して決定し、その示方配合を表-7に示す。この配合確認のため、実機プラントにおいて練り混ぜが行われた。練り混ぜ量は1m<sup>3</sup>とし、スランプ及び空気量の測定の後、圧縮強度用試験体を採取した。更に、経時変化試験を30分毎に90分経過まで行い、スランプ及び空気量の測定を行った。その測定結果を図-4、図-5に示す。

スランプの経時変化は、内割配合とベース配合が同様の性状を示すが、外割配合は30分経過後に大きなスランプロスを示した。

空気量の経時変化は、ベース配合の緩やかな減少に対し、フライアッシュ使用配合は、いずれも30分経過後に大きな減少を示している。外割配合は、その後においても減少している。

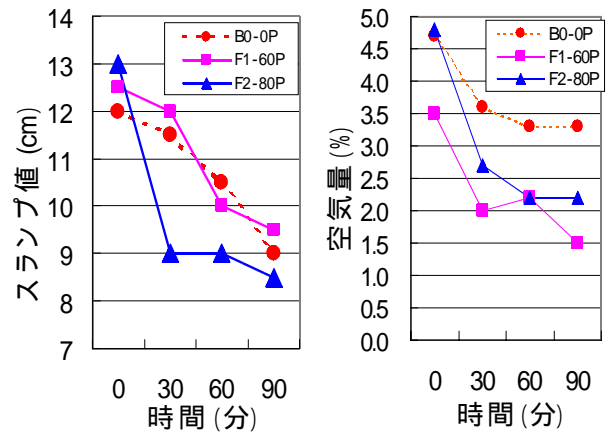


図-4 スランプ経時変化 図-5 空気量経時変化

4. 現場施工時のコンクリート試験

4.1 フレッシュコンクリートの品質検査

フライアッシュコンクリートのスランプ及び空気量を生コン工場と荷卸し地点で測定した。生コン工場から荷卸し地点までの所要時間は約30分であった。

スランプ及び空気量とも、実機プラントでの経時変化試験と同様の値を示し、30分後のロスが大きかった。このことより、使用する混和剤の選定が今後の検討事項である。

4.2 圧縮強度試験

フライアッシュコンクリート打設は、2日に分けて行われ、各々に対して、圧縮強度用試験体を工場及び現場で採取した。試験体の標準養生は、工場採取が1年、現場採取は28日までとした。

表-7 示方配合表 (実機プラント)

配合区分	W/C (%)	W/(C+F) (%)	s/a (%)	海砂:砕砂 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					AE減水剤 x (C+F) %
					W	C	F	S	G	
B0-0P	56.0	-	47.2	65:35	169	302	-	860	979	0.4
F1-60P	70.0	56.3	47.6	65:35	172	245	60	852	955	0.4
F2-80P	59.3	46.7	40.0	50:50	175	295	80	688	1052	0.6

圧縮強度の試験結果を図-6に示す。圧縮強度発現性は、外割配合が最も高く、内割配合、ベース配合の順に小さくなっている。フライアッシュコンクリートは、ポゾラン効果により長期材齢で強度が増加している。材齢28日強度における工場採取と現場採取の試験体では、現場採取の方の強度が高くなっている。その原因は、空気のロスが影響しているものと考えられる。

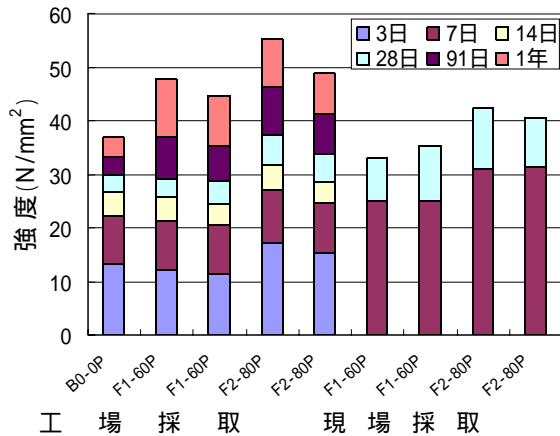


図-6 圧縮強度の発現状況

#### 4.3 長さ変化試験

長さ変化試験は、JIS A 1129のダイヤルゲージ法で行った。その測定結果を図-7に示す。材齢8週までは材齢とともに収縮し、以降は収束する傾向を示している。

現場に打設したフライアッシュコンクリート (F1-60P, F2-80P) は、最大で収縮率  $5 \times 10^{-4}$  を示す。この値は、単位水量の上限設定の根拠となった乾燥収縮率  $8 \times 10^{-4}$  以下<sup>3)</sup> を満足している。

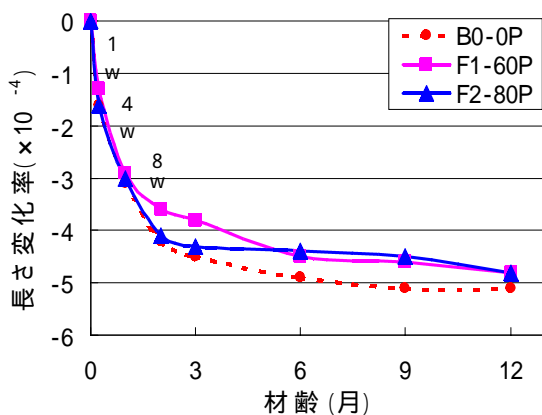


図-7 長さ変化試験

## 5. 耐久性試験

### 5.1 試験概要

ベースコンクリート及びフライアッシュコンクリートを用いた護岸コンクリートから打設1年半後にコア(94mm)を採取し、中性化試験、圧縮強度試験及び全塩分量の測定を行った。コアの採取位置を図-8に示す。なお、コアNo.1,2,3は中性化試験及び圧縮強度試験に用い、No.4,5,6を全塩分試験に用いた。

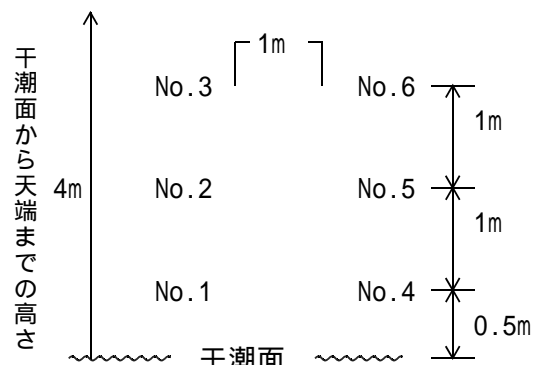


図-8 コア採取位置

### 5.2 中性化試験結果

中性化試験は、試験体側面に1%フェノールフタレイン溶液を噴霧して測定した。各配合の試験体とも赤紫色に着色し、中性化部分は認められなかった。

### 5.3 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験は、中性化試験終了後の試験体を用いて測定を行った。圧縮強度の試験結果を表-8に示す。ベース配合(B0-0P)の平均値が32.8N/mm<sup>2</sup>に対し、フライアッシュコンクリート内割配合(F1-60P)、外割配合(F2-80P)が各々46.3N/mm<sup>2</sup>, 51.8N/mm<sup>2</sup>を示している。

表-8 圧縮強度の試験結果 (N/mm<sup>2</sup>)

コアNo.	B0-0P	F1-60P	F2-80P
1	30.7	50.1	49.3
2	29.8	44.4	55.3
3	37.8	44.4	50.8
平均値	32.8	46.3	51.8

#### 5.4 塩化物量分析結果

塩化物量の分析方法は、JCI SC 5に準拠し、コンクリート表面から深さ5cmまでを1cm間隔、5cm以降9cmまでは2cm間隔でカットし、分析用試料とした。図-9、図-10、図-11に塩化物イオン濃度分布(CI<sup>-</sup>: wt%)をコア採取位置ごとに示す。

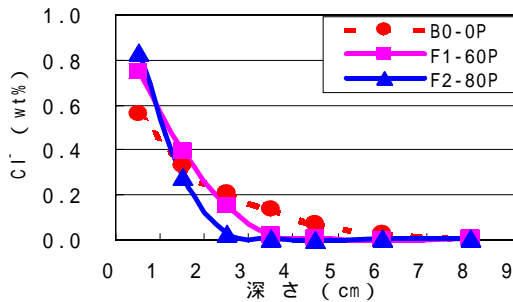


図-9 塩化物イオン濃度分布(No.4)

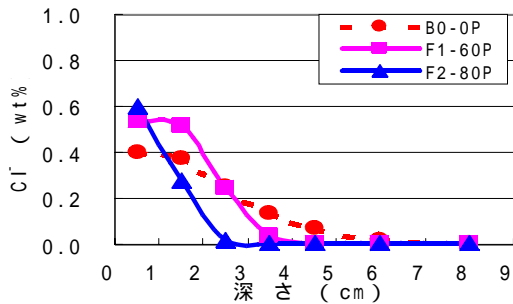


図-10 塩化物イオン濃度分布(No.5)

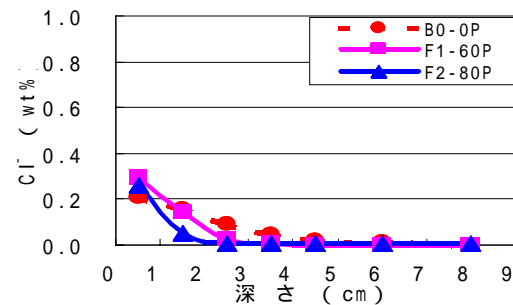


図-11 塩化物イオン濃度分布(No.6)

最も厳しい飛沫帯(No.4の位置)における表層(0~1cm)での塩化物イオン濃度は、0.6~0.9%と非常に高い値を示す。ここでは外割配合(F2-80P)が最も高い値を示している。内部(2~3cm)において、ベース配合(B0-0P)の0.2%、内割配合(F1-60P)の0.13%に対し、外割配合(F2-80P)が0.03%と非常に小さい値を示す。No.5の位置についても海水飛沫の影響が強く、表層を除

いてNo.4の位置の濃度分布とほぼ同様の値を示している。No.6の位置における濃度は、飛沫の影響が小さく、塩化物の浸透量が少ない。なお、全ての部位においてフライアッシュ量の多いF2-80P配合の遮塩性が優れている。

#### 6. まとめ

今回の実証試験より得られた結果を列記する。

- (1) モルタル試験で得られたデータは、内割、外割配合ともコンクリート配合設計に有効に利用出来る。
- (2) 本実験で使用している混和剤(AE減水剤)を標準使用量の1.5倍に増加しても、外割配合のフライアッシュ使用量の上限は80kg/m<sup>3</sup>である。
- (3) 外割配合(F2-90)の凝結時間は、混和剤を標準使用量の1.5倍に増加すると、ベース配合に比べ5時間程度遅延する。
- (4) 外割配合の圧縮強度は、ベース配合より高くなる傾向を示す。一方、内割配合の初期強度は、ベース配合より小さいが長期強度は増大する。
- (5) フライアッシュコンクリートの長さ変化は、単位水量の上限設定の根拠となった乾燥収縮率 $8 \times 10^{-4}$ 以下を満足している。
- (6) 構造物から採取したコア供試体の1年半後の圧縮強度は、内割、外割配合ともベース配合より高い値を示す。
- (7) 遮塩性は、外割配合、内割配合、ベース配合の順に表れ、フライアッシュによる遮塩効果が認められる。

#### 参考文献

- 1) Sorn Viralほか：フライアッシュを多量使用したコンクリート中への塩化物イオン浸透性状、コンクリート工学年次論文報告、Vol.22, No.1 pp.139-144, 2000
- 2) 畑本浩樹，平野利光：海外炭専焼発電所から発生する石炭灰を用いたコンクリートの性状について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16, No.1, pp.413-418 1994
- 3) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説JASS 5 鉄筋コンクリート工事 pp.215, 1997