

# [16] 高炉スラグ細骨材の鉄筋コンクリート構造物への適用性について

松井 正 (建設省近畿地方建設局・企画部)

上原 巖 (建設省近畿地方建設局近畿技術事務所)

仲村 文明 (新日本製鐵 堺製鐵所設備部)

正会員 ○山崎 友二 (神戸製鋼所 スラグ・建材部)

## 1 まえがき

天然資源の枯渇化が叫ばれている昨今、コンクリート用細骨材も例外ではなく良質の天然骨材の入手は困難になりつつある。特に近畿地方の臨海地区では海砂に依存しているのが現状である。そこで、近畿地方建設局では新しい材料である、高炉スラグ細骨材を実構造物に適用するため過去3年間試験施工を実施してきた。昭和54、55年度はコンクリートの品質、施工性および品質管理に重点を置いて無筋コンクリート造で調査した結果、単位水量・凍結融解試験を除き天然砂コンクリートとはほぼ同等の結果を得た。昭和56年度は鉄筋コンクリート構造物への適用試験を実施すると共にRCはりおよびボックスカルバート(工場製品)の破壊実験を行ない、ひび割れ特性・終局強度および力学的性質について、天然砂コンクリートと比較検討を加え、鉄筋コンクリート構造物への適用性を明らかにした。過去3年間の試験施工のうち、本論文では主に鉄筋コンクリート構造物への適用性について報告する。

## 2 鉄筋コンクリート構造物への適用試験

高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの鉄筋コンクリート構造物への適用試験は道路横断ボックスカルバートで実施した。その一例を図-1に示す。コンクリートは設計基準強度 $\sigma_{28} = 210$

$\text{kgf/cm}^2$ ・スランプ8 $\pm$ 2cm

空気量4 $\pm$ 1%とした。その

示方配合を表-1に示す

なお、高炉スラグ細骨材は

水砕砂と風砕

砂を用い、天然

砂との混合

率はそれぞれ

30%とした。

### 2.1) コンクリート試験結果

ボックスカルバートに打込んだコンクリートの試験結果を表-2に示す。この結果高炉スラグ細骨材を混合使用したコンクリートの品質は川砂、海砂コンクリートとはほぼ同等である。また、コンクリートのワーカビリティ等施工性を観察した結果を表-3に示す。高炉スラグ細骨材混合率30%程度であればコンクリートの打込み状況、ワーカビリティ・ポンプ圧送性・締め等天然砂コンクリートと同様の扱いでよく施工性も良好であった。

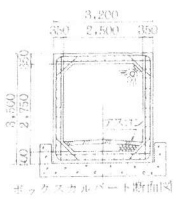
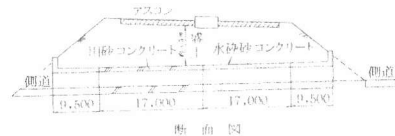
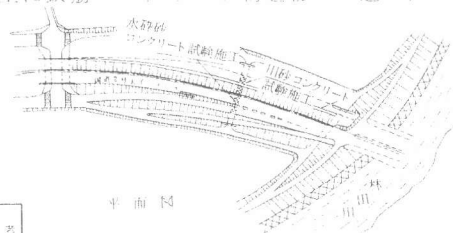


図-1 道路横断ボックスカルバート概要図

表-1 コンクリートの示方配合

工事種別	配合種別	水砕砂配合率(%)	細骨材含水率(%)	単位重量(kg/m <sup>3</sup> )					水和率	備考
				水	セメント	川砂	スラグ	川砂+スラグ		
I	川砂コンクリート	100	157	281	857	-	1,019	-	0.703	
	水砕砂コンクリート	56	163	281	600	275	1,019	-	0.703	水砕砂30%多配合
II	海砂コンクリート	100	173	293	806	-	1,009	0.103		
	風砕砂コンクリート	50	170	288	694	288	-	998	0.101	風砕砂30%多配合

表-2 コンクリート試験結果

工事種別	試験項目	まじり合わないコンクリート				硬配コンクリート				備考				
		スランプ(mm)	空気量(%)	ワーカビリティ(%)	単位容積質量(kg/m <sup>3</sup> )	圧縮強度(kgf/cm <sup>2</sup> )		曲げ強度(kgf/cm <sup>2</sup> )			引張り強度(kgf/cm <sup>2</sup> )			
						7日	28日	7日	28日			7日	28日	
I	川砂コンクリート	8.5	3.7	-	14.0	167	274	-	-	-	ベース			
		8.5	4.3	0.12	2,246	15.0	176	252	266	90.6	39.4	18.8	26.5	側体
	水砕砂コンクリート	7.0	5.0	-	15.0	161	273	-	-	-	-	-	-	ベース
		8.5	4.6	0.15	2,250	12.5	162	268	292	76.0	40.6	17.8	26.7	側体
II	海砂コンクリート	9.5	3.3	0.27	-	24.0	173	293	362	-	34.6	-	27.7	ベース
		9.0	4.0	-	-	10 <sup>0</sup>	260	-	-	-	-	-	-	側体
	風砕砂コンクリート	8.0	3.4	0.23	-	17.0	163	260	210	-	26.1	-	23.3	ベース
		8.5	3.6	0.21	-	15.5	167	222	240	-	-	-	-	側体

表-3 コンクリート施工試験(性状観察)結果総括表

項目	観察結果
ミキサー車での運搬状況	①コンクリートの運搬時間およびミキサー車からの積荷状況は普通コンクリートと同様であった。
スランプ測定時(コンシステンシー)	②出荷から到着し荷までのスランプは普通コンクリートとはほとんど変わらなかった。
施工時(ワーカビリティ)	③鉄筋コンクリートの打込み、締め、流動性は高炉スラグ細骨材の配合率30%程度であれば、普通コンクリートと同様でよいとわかった。 ④ポンプ圧送性は普通コンクリートと同様である。
総合	①高炉スラグ細骨材コンクリートの練り上げ性状(稠度)は普通コンクリートに比べ若干軟く見える。 ②普通コンクリートと同様のスランプを得るための単位水量は配合率30%程度であればほぼ同等でよい。 ③風砕砂の混合単位水量を若干少なくできる。 ④コンクリートの打込み状況は普通コンクリートと同様でよい。 ⑤高炉スラグ細骨材配合率30%程度であればポンプ車による圧送性は普通コンクリートと同様の扱いでよい。

### 3 鉄筋コンクリートはり曲げ破壊実験

高炉スラグ細骨材を鉄筋コンクリート構造物に適用するに当り、前述の施工現場で図-2に示す鉄筋コンクリートのはり（以下RCはり）を製作し、純曲げ破壊試験を行った。

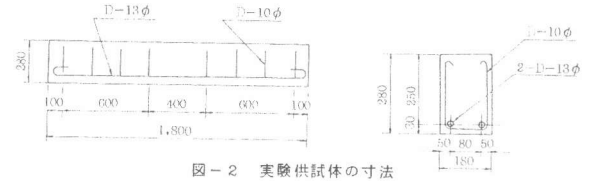


図-2 実験供試体の寸法

#### 3.1) RCはりの曲げ試験方法

RCはりの曲げ試験は材令3ヶ月になった時点で図-3に示すように2点載荷で実施した。測定項目はひび割れ巾、変位量、ひずみとした。なお、測定段階は表-4に示す

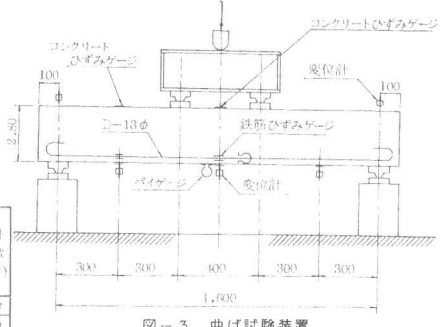


図-3 曲げ試験装置

ように3段階の繰返し載荷試験とした。なお、本実験に用いたコンクリートの性質および鉄筋の機械的性質を表-5、表-6

表-5 使用コンクリートの性質

項目	W/C	また固まらないコンクリートの性質			硬化コンクリートの性質			弾塑性係数 (×10 <sup>-5</sup> )
		スラッグ量 (mm)	空気量 (kg/m <sup>3</sup> )	単位容積重量 (kg/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張り強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
川砂コンクリート	56	8.5	4.3	2,246	286	26.5	30.4	2.37
水砕砂コンクリート	56	8.5	4.5	2,269	287	26.7	40.6	2.33

圧縮強度、弾塑性係数は現場養生材令91日の試験結果を示す。

表-6 鉄筋の機械的性質

項目	試料本	試験結果				平均値	JIS S 3112規格値
		1	2	3	4		
降伏点 (kgf/cm <sup>2</sup> )		3470	3470	3660	3680	3570	3000 ELI
引張り強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		5050	5080	5400	5400	5230	4900~6300
伸び率 (%)		26.1	27.0	24.6	25.0	25.7	14%以上

に示す。この結果、設計基準強度 ( $\sigma_c = 21.0 \text{ kgf/cm}^2$ )、鉄筋のJIS規格を満足している。

#### 3.2) 試験結果と考察

RCはりの曲げ試験結果を表-7に示す。初期ひび割れ・ひび割れ巾0.2mm発生時の荷重は川砂コンクリートの方が若干大きな値となったが、降伏荷重・終局荷重は水砕砂コンクリートの方が若干大きな値であった。なお、日本建築学会、鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（以下RC構造計算規準）の初期ひび割れモーメント ( $M_c$ ) の計算式より求めた初期ひび割れ荷重 ( $P_c$ ) の値は各供試体とも実測値の方が大きく、降伏荷重 ( $P_y$ ) および終局荷重 ( $P_u$ ) はRC構造計算規準の計算式で求めた計算値より各供試体とも実測値の方が約20%大きな値である。以上の結果より、川砂コンクリートと水砕砂コンクリートは大差ないものといえよう。以下それぞれの項目について考察する。

##### (a) ひび割れ性状

初期ひび割れ発生位置は、はり中央附近の底部に発生し、荷重の増加に伴ない底部より側面に進展している。終局時のひび割れ状況を写真-1と2に示す。図-4は初期ひび割れ発生箇所にバイゲージを取付け、荷重とひび割れ巾の挙動を測定したものである。この結果、ひび割れ巾0.2mm発生時および鉄筋降伏後の挙動は両者ともほぼ同様の傾向である。

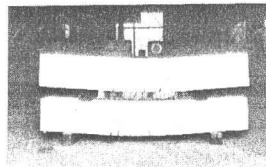
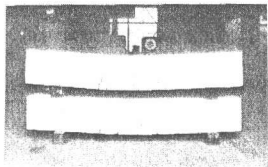


写真-1 川砂コンクリートの終局破壊状況 写真-2 水砕砂コンクリートの終局破壊状況

表-4 ひび割れおよび変位量測定段階 (単位: mm)

測定回数	1	2	3	4	5	備 考
第1段階	0	0.8	1.0	1.5	2.0	フェーストクラック発生後除荷
第2段階	0	0.5	1.0	1.5	2.0	ひび割れ巾0.2mm時除荷
第3段階	0	1.0	2.0	3.0	4.0	破壊時まで載荷

表-7 はりの曲げ試験結果

測定項目	(注1) ひび割れ荷重 (t)		降伏荷重 (t)	終局荷重 (t)	備 考	
	初期ひび割れ (0.2mm時)	ひび割れ巾0.2mm時				
川砂コンクリート	系1	2,380	—	6,610	9,960	計測値
	系2	3,250	6,000	8,000	12,000	実測値
水砕砂コンクリート	系1	2,380	—	6,610	9,960	計測値
	系2	3,500	5,500	7,000	12,000	実測値
水砕砂コンクリート	系1	2,380	—	6,610	9,960	計測値
	系2	2,750	5,000	8,000	13,000	実測値
水砕砂コンクリート	系1	2,380	—	6,610	9,960	計測値
	系2	3,000	4,750	8,000	13,000	実測値

(注1) ひび割れ荷重は目視により観察した時点の荷重を示す。なおひび割れ巾0.2mm時はバイゲージによって測定した。

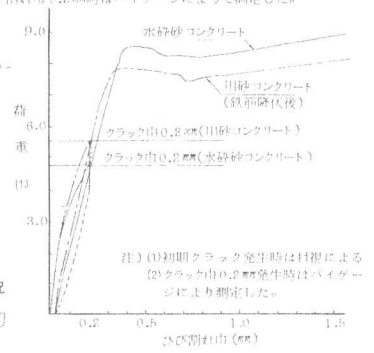


図-4 ひび割れ巾と荷重の関係

##### (b) たわみ性状

供試はり中央部におけるたわみと荷重の関係を図-5に示す。この結果両試験体とも荷重7tまではほぼ比例的に変形し、その後鉄筋の降伏点付近より荷重の増加と共にたわみ量は急げきに大きくなっている。また、全断面有効とした初期剛性時は計算値と実測値はほぼ一致している。さらに、はり中央部のたわみと支点上の変位量を測定した結果を図-6と7に示す。各荷重段階によるたわみの挙動は川砂コンクリート・水砕砂コンクリート共にほぼ同様の傾向を示しており、たわみについては両者に差異は無いものと考えられる。

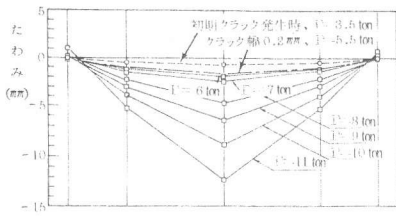


図-6 川砂コンクリート供試体のたわみ分布(No.2)

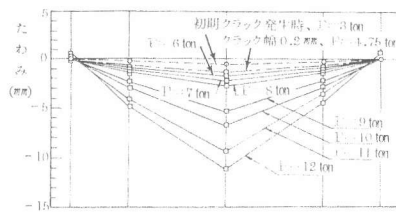


図-7 水砕砂コンクリート供試体のたわみ分布(No.2)

(c) 鉄筋ひずみとコンクリートひずみ

供試はり中央部における鉄筋の引張りひずみおよびはり上面のコンクリートひずみと荷重の関係を図-8, 9に示す。川砂コンクリート、水砕砂コンクリートとも鉄筋のひずみは約  $1.900 \times 10^{-6} \sim 2.000 \times 10^{-6}$  まではほぼ直線的となり、鉄筋の降伏後は急げきにひずみが大きくなっている。また、コンクリートの圧縮ひずみは両者とも約 8 ton 付近より急げきに大きくなっている。以上の結果、鉄筋の引張りひずみとコンクリートの圧縮ひずみの挙動は川砂コンクリート・水砕砂コンクリートともほぼ同様であり、両者に差異はないものと推定される。

4 ボックスカルバートの破壊実験

本実験に用いたボックスカルバートは道路下部に埋設される共同溝・下水道溝を対象とし、輪荷重を 20 ton 盛土厚さ 0 ~ 3 m として基本設計したものである。供試体寸法および設計基準強度・配合・養生条件を表-8に示す。なお、示方配合は通常工場で実績のある配合条件に合せ試し練りを行ない表-9に示す示方配合とした。コンクリートの養生は標準養生を基本とし、工場製品に合せた蒸気養生との2方法とした。そのコンクリート試験結果を表-10に示す。

表-9 コンクリートの示方配合

コンクリートの種別	細骨材配合率 (%)	水・セメント比 (%)	種骨率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				試験値	
				水	セメント	山砂	風砕砂		
山砂コンクリート	25	39.5	40.0	163	418	711	—	1122	2.51
水砕砂配合コンクリート	25	38.5	40.0	161	424	496	227	1105	1.29
風砕砂配合コンクリート	25	38.5	39.5	161	418	494	236	1118	1.18

4.1) 載荷試験方法

ボックスカルバートの破壊試験は工場製品に合せ材令 16 日とし、図-10に示す試験装置を用い、中央荷重重 (巾 20 cm) で行なった。載荷々重段階は表-11に示す通り 3 段階の繰り返し載荷試験とした。

4.2) 試験結果と考察

3種類のボックスカルバートの破壊試験結果を表-12に示す。この結果、初期ひび割れ荷重は 3 試験体とも同様の傾向であるひび割れ巾 0.2 mm 発生時の荷重は風砕砂の方が若干大きな値を示したが、他の 2 試験体は

表-12 載荷試験結果一覧表

試験項目	注1) 初期ひびわれ荷重, Per (ton)			Per=0.2mm (ton)	破壊荷重 (ton)
	頂板	底板	側壁		
標準試験体	8.8	13.0	13.0	18.6	30.0
水砕砂試験体	8.8	12.0	14.0	17.0	35.9
風砕砂試験体	8.0	12.0	12.0	21.8	41.5

注1) ひびわれ荷重は、目視により観察を行なったものである。  
注2) 初期ひびわれ発生後、シャケットラジアルが生じ、他のシャケットを使って除荷を行なったが、その際一時的に過大荷重が加わった。

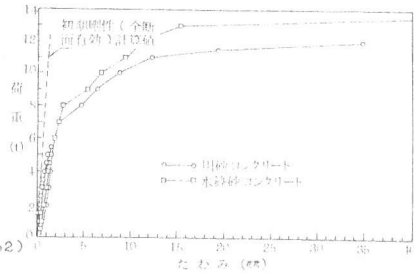


図-5 供試体中央たわみと荷重の関係

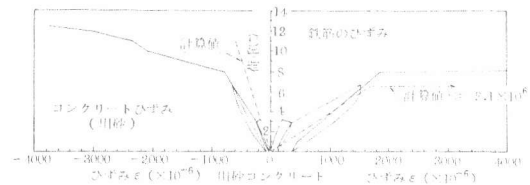


図-8 鉄筋ひずみ、コンクリートひずみと荷重の関係

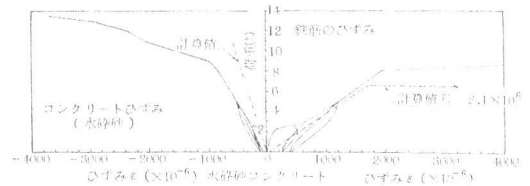


図-9 鉄筋ひずみ、コンクリートひずみと荷重の関係

表-8 供試体寸法および配合・養生条件

項目	寸法および条件	備 考
供試体寸法	巾 1.6m, 高さ 1.0m, 長さ 1.0m	山砂 (100%), 水砕砂, 風砕砂 (20% 配合使用)
配合条件	設計基準強度 250kg/cm <sup>2</sup>	標準配合, 山砂配合 (1.6m x 1.0m), 水砕砂配合 (1.6m x 1.0m)
養生条件	蒸気養生 (20°C 24時間保持)	標準養生, 蒸気養生 (24時間養生)

表-10 硬化コンクリートの試験結果

養生種類	試験項目	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )				引張強度 (kg/cm <sup>2</sup> )		曲げ強度 (kg/cm <sup>2</sup> )		
		3日	7日	14日	28日	7日	28日	7日	28日	
標	山砂コンクリート	273	363	446	495 (3.8x10 <sup>5</sup> )	573	—	38.8	—	49.7
	水砕砂配合コンクリート	296	396	461	515 (3.1x10 <sup>5</sup> )	618	—	42.2	—	50.5
	風砕砂配合コンクリート	281	411	473	510 (3.8x10 <sup>5</sup> )	601	—	41.7	—	51.3
蒸	山砂コンクリート	—	—	465 (3.0x10 <sup>5</sup> )	—	—	—	37.4	—	47.4
	水砕砂配合コンクリート	—	—	472 (3.2x10 <sup>5</sup> )	—	—	—	36.8	—	47.4
	風砕砂配合コンクリート	—	—	455 (3.1x10 <sup>5</sup> )	—	—	—	35.5	—	46.7

( )内は、脆性係数である。

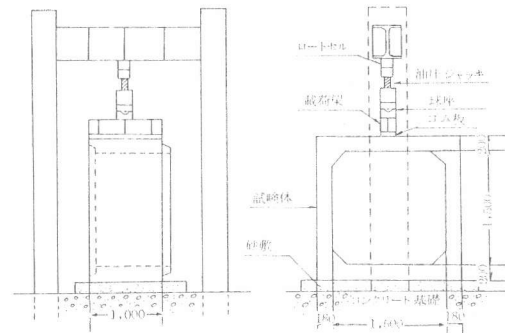


表-11 載荷荷重段階

第1回目(ton)	0, 1, 2, 3, 4, 5, …………… 0.2mm 除荷
第2回目(ton)	0, 1, 2, 3, 4, 5, …………… Per=0.2mm, 除荷
第3回目(ton)	0, 2, 4, 6, 8, …………… 破壊

ほぼ同様の値である。破壊荷重は風砕砂、水砕砂、山砂の順に大きな値である。なお、ボックスカルバートに直接輪荷重が加わったとすれば約  $7.6 \text{ t/m}$  となり、本実験の初期ひび割れ荷重  $8.8 \text{ ton}$  は輪荷重の  $1/1.6$  等に相当し安全側である。従って高炉スラグ細骨材を混合使用しても天然砂と同等の性能が得られることが確認できた。以下それぞれの項目について考察する。

#### (a) ひび割れ性状

初期ひび割れ発生位置は3供試体とも載荷点直下附近に発生し、その後底版中央附近およびハンチ部の外側に発生した。図-11は初期ひび割れ発生箇所にバ イメージを取付け、荷重とひび割れ巾の挙動を測定したものである。この結果、ひび割れ巾  $0.2 \text{ mm}$  発生時・破壊時の挙動は3供試体ともほぼ同様である。

#### (b) たわみ性状

本実験では側壁の変形はないものと仮定し、頂版中央のたわみを測定した。その実測値と計算値(ボックスラーメンの解法)を図-12に示す。頂版中央のたわみは初期ひび割れ発生まではState I(全断面有効)の計算値とほぼ一致し、その後荷重の増加と共に徐々にState II(ひび割れ巾  $0.2 \text{ mm}$  発生時)の計算値に近づく傾向を示す。

#### (c) 鉄筋ひずみ

頂版中央の鉄筋ひずみの実測値と計算値を図-13に示す。鉄筋ひずみより推定される初期ひび割れ荷重は水砕砂の場合約  $9 \text{ ton}$ 、風砕砂の場合約  $8 \text{ ton}$  であり、目視によるひび割れ荷重とほぼ一致する。また、ひび割れ巾  $0.2 \text{ mm}$  発生時の鉄筋ひずみは山砂と水砕砂試験体では約  $1000 \times 10^{-6}$  ( $\sigma_s : 2100 \text{ kg/cm}^2$ ) 風砕砂試験体は約  $1400 \times 10^{-6}$  ( $\sigma_s : 2900 \text{ kg/cm}^2$ ) である。鉄筋の許容応力  $\sigma_s$  を  $1600 \text{ kg/cm}^2$  (標準示方書) と仮定すれば、各試験体とも有害なひび割れは発生しないものと推定される。

### 5 まとめ

高炉スラグ細骨材の鉄筋コンクリート構造物への適用試験を2工事現場で実施した。その結果、コンクリートの品質・ポンプ圧送性・打込みおよび締固め等の施工性は天然砂コンクリートとほぼ同等であった。また、RC柱の曲げ試験およびボックスカルバートによる破壊試験を行ない、ひび割れ特性・たわみ性状・鉄筋ひずみ・最大荷重および力学的挙動について比較検討した結果、天然砂コンクリートとほぼ同等の結果を得た。以上の結果から判断すれば高炉スラグ細骨材を用いた鉄筋コンクリート構造物への適用は天然砂コンクリートとほぼ同等であり、現設計法(弾性理論)に基づいて設計すれば有害なひび割れの発生もなく十分使用できることが確認できた。また、強度の高い工場製品へ適用する場合も天然砂と同様の製造管理で良好な製品が得られることが確認された。

### 6 あとがき

高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの試験施工は昭和54年度から3年間に亘り実施してきた。その間近畿地方建設局管内の10工事事務所の協力を得て、29ヶ所の実構造物で約  $13300 \text{ m}^3$  の施工実績を蓄積し、その汎用性を確認することができた。一方、建設省技術管理業務連絡会議・コンクリート部会・スラグ分科会では高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの耐久性および長期にわたる強度特性等について研究を開始しており、本試験施工は5年~10年後の追跡調査対象となる貴重な構造物として考えられている。

最後に本試験施工に御協力いただいた近畿地方建設局・鉄鋼スラグ協会の関係者に感謝の意を表す。

参考文献 1), 2), 3) 近畿地方建設局・鉄鋼スラグ協会(昭和54年度, 55年度, 56年度)高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの試験施工報告書

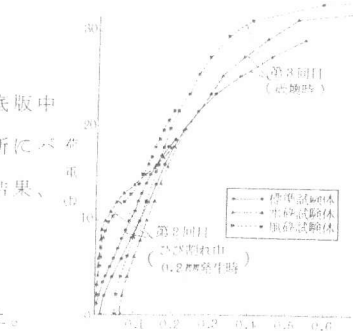


図-11 荷重とひびわれ幅

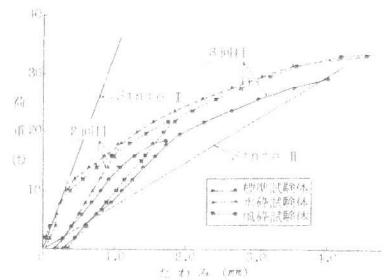


図-12 頂版中央のたわみ(第2,3回目)

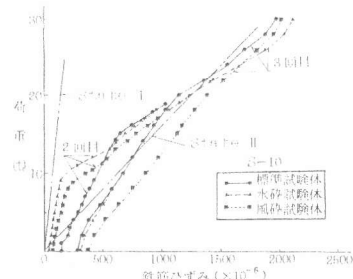


図-13 頂版鉄筋ひずみ(S-10,第2,3回目)