

正会員 小倉弘一郎（明治大学）同 柿崎正義（鹿島建設） 同○阿部保彦（同）

## I. はじめに

本研究は、昭和52年度の建設省建設技術研究補助金研究として(社)日本鉄鋼連盟が受けた「水碎スラグ細骨材を用いたコンクリートの品質、性能に関する研究委員会」における研究活動の一環として行なったものである。

研究の目的は、水碎スラグ細骨材（以下水碎砂と称す）を用いたコンクリートをRC部材として使うことの可能性を検討するために、水碎砂を用いた川砂利コンクリートおよび高炉砕石コンクリートのひびわれ特性を、両引付着実験に上って求めるものである。比較実験として、川砂・川砂利コンクリートについても行なった。

## II. 実験の内容

## 1. 実験の概要 コンクリートの種類は表-1の3種類とした。

試験は鉄筋コンクリート曲げ材の引張側の応力状態を模したはり型試験体で両引付着試験によって行なった。測定ははり試験体のひびわれ巾、ひびわれ間隔および鉄筋ひずみなどについて行なった。

## 2. 試験体

(1) 試験体の形状・寸法 試験は  $100 \times 100 \times 2400$  mm のはり型試験体で、中心部に D25 のねじ異形鉄筋 (SD35) を配筋した。また、試験体の両端部には、端部から 125 mm までスパイラル筋 ( $\phi 9$ , SR24) を入れた。

試験体の個数は、コンクリート1種類につき2体とした。

図-1に試験体の詳細を示す。

## (2) コンクリート

コンクリートの計画調合および練りませ結果をそれぞれ表-2および3に示す。

## (3) 鉄筋 a. 軸方向鉄筋：ねじ鉄筋（神戸製鋼所製）

D25 SD35 (実降伏点  $38.5 \text{kg/mm}^2$ )

b. スパイラル筋： $\phi 9$ , SR24

表-2 コンクリートの計画調合

種類	粗骨 材 大 寸 法 (mm)	所 需 ス ラ グ 要 量 (cm)	所 需 空 氣 要 量 (%)	水 灰 土 シ ント 比 (%)	細 骨 材 料 (kg/m³)	单 位 水 量 (kg/m³)	重 量 (kg/m³)			ボ ル タ リ ス #100N (g/mm²)	ボ ル タ リ ス #303 (g/mm²)
							セ メ ント シ ント (kg/m³)	細 骨 材 材 料 (kg/m³)	粗 骨 材 材 料 (kg/m³)		
a・R	2.0	18	4~6	6.0	4.3	18.0	300	7.60	10.15	8.00	—
a・B	2.0	18	4~6	6.0	4.3	18.3	305	7.55	10.01	7.00	—
r・R	2.0	18	4~6	6.0	4.3	17.8	297	7.73	10.25	9.00	1.80

注) 10倍溶液

(4) 試験体の製作 試験体が養生、実験準備および加力中に曲げを受け不必要なひびわれが発生しないように、底型わく兼用の補強材として10cm角の角材を試験体の下に抱合させた。また、加力中に試験体と底型わくとの摩擦を極力減らすために、コンクリート打込み前に底型わく上に減摩シートを敷いた。

表-1 コンクリートの種類

記号	細骨材	粗骨材
a・R	水碎砂	川砂利
a・B	同上	高炉スラグ砕石
r・R	川砂	川砂利

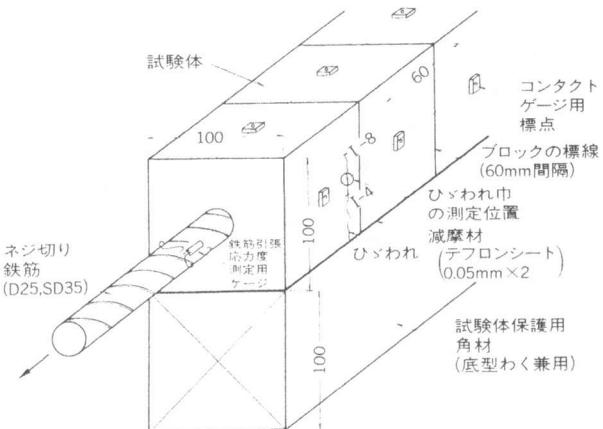


図-1 試験体の詳細

セメント：普通ポルトランドセメント（日本セメント社製）

水 砂：新日鐵（名古屋）製, F.M=2.6.7, 表乾比重=2.6.9

川 砂：富士川産, F.M=2.6.4, 表乾比重=2.6.4

高炉スラグ砕石：川崎製鉄（千葉）製, F.M=6.8.3, 表乾比重=2.5.4

川 砂 利：富士川産, F.M=6.6.4, 表乾比重=2.6.3

表-3 コンクリートの練りませ結果

種類	練 り ま せ 月/日	室 温 (C)	練 上 り 時 刻	練 上 り 温 度 (C)	ス ラ グ シ ント (cm)	フ ロ ー リ ー ク ル ー ム (cm)	空 気 量 (%)	単 位 容 重 (kg/m³)
a・R	9/13	27	10:20	27.5	1.85	2.85 2.79	5.0	2.261
a・B	9/13	27	11:05	2.70	1.75	2.65 2.60	4.2	2.264
r・R	9/13	27	12:00	2.65	1.80	2.75 2.70	4.0	2.290

コンクリートは2層に分けて打込み、一層毎に振動締固めを行なった。養生は、材令1Wまで型わくに入れたままで、コンクリート上面をビニールレートで覆い、20°C、RC 80%の部屋で湿潤養生を行なった。材令1W後で脱型し、その後実験時まで空中養生を行なった。両引付着試験は、各種コンクリートの圧縮強度が約225kg/cm<sup>2</sup>に達したものから順次行なった。圧縮強度の出ないコンクリートは引続き湿布養生を行なった。

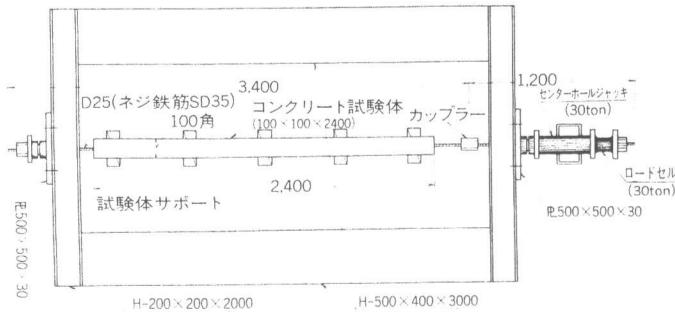


図-2 加力方法

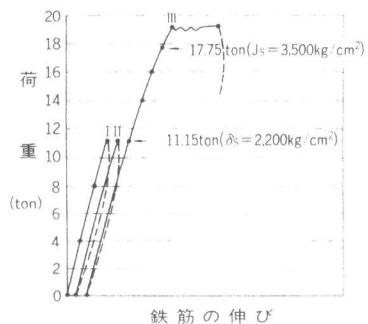


図-3 加力ステップ

### 3. 実験方法

両引付着試験は、試験体の両端に露出させた鉄筋をセンターホールジャッキ（容量50ton）で引張って行なった。引張荷重はセンターホールジャッキに直列に接続したロードセルおよびその指示計により測定した。

図-2に試験体の加力方法を、図-3に加力ステップを示す。試験中の測定項目は a) 試験体表面のひびわれ発生状況、b) 試験体の長さ変化、c) 鉄筋の応力度、であるが、それぞれの測定方法を表-4に示す。

### III. 実験結果と考察

#### 1. 実験に用いたコンクリートの物性

図-4に実験に用いたコンクリートの諸物性が、材令の経過に伴って変化する様子を示す。これにより、実験時のコンクリートの圧縮強度ならびに弾性係数がそれぞれ200~260kg/cm<sup>2</sup>、ならびに2.5~3.0×10<sup>5</sup>kg/cm<sup>2</sup>で計画どおりの範囲に入っていたことが判る。一方、実験時のコンクリートの長さ変化率は、水浮砂・川砂利コンクリートと水碎砂・高炉スラブ砕石コンクリートが0.02~0.037%であるのに対し、川砂利コンクリートでは0.065%と2倍も大きい値を示している。

#### 2. ひびわれ発生状況

図-5に、加力ステップIII-18(鉄筋応力度3.500kg/cm<sup>2</sup>)における各試験体のひびわれ図を示す。図中の数字は試験体を長さ方向に60mm間隔で40分割したブロックの番号を示し、アルファベットA, B, Cは、それぞれ試験体のコンクリート打込面、および左右側面を表わしている。川砂・川砂利コンクリートによる試験体は、加力前にすでに微少ひびわれが入っていた。ひびわれは加力ステップの初期に発生したものが、長さおよび巾とともにそのまま成長を続け、加力ステップの途中で新しいひびわれの発生することはまれであった。図-5によつても明らかのように、ひびわれ発生状況については、3種のコンクリートの間で特筆すべき差異を見出すことはできなかつた。

表-4 測定項目と測定方法

試験項目		試験方法
はりひびわれの状況(I)	表面ひびわれ巾	1: はり試験体を長手方向に6cmの間隔で40ブロックに分けた。 2: 各荷重段階毎に生じたひびわれの巾をクラックゲージで測定した。
	表面ひびわれ位置	各荷重段階毎に生じたひびわれの先端に印を付け、荷重段階を記入した。試験終了後にひびわれ状況をスケッチして、ひびわれの長さおよびひびわれ間隔を測定した。(図-1)。
はり変化の長さ	各ブロックの長さ変化	各ブロックの中央に接着した標点の相対距離は、各荷重段階毎にコンタクトゲージで測定した(図-1)。
鉄筋引張荷重、M	鉄筋引張荷重	鉄筋の引張荷重はセンターホールジャッキに直列に接続したロードセルおよびその指示計によりジャッキの荷重を測定した。
	鉄筋引張応力度	応力度は露出鉄筋に貼布したストレンジゲージのひずみを各荷重段階の測定開始時と終了時に測定し、別途行なった鉄筋引張試験からたσ-ε曲線より算定して求めた。

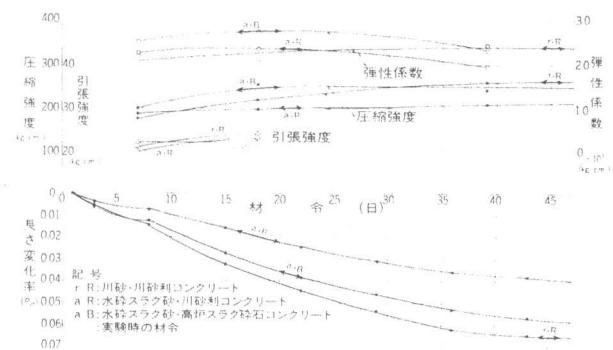


図-4 実験に用いたコンクリートの物性

### 3. ひびわれ間隔

図-6に鉄筋応力度  $2,200 \text{ kg/cm}^2$  (長期許容応力度) および  $3,500 \text{ kg/cm}^2$  (降伏点応力度) におけるひびわれ間隔の頻度分布を示す。この図によると、平均ひびわれ間隔、および平均ひびわれ間隔以上のひびわれ間隔量は、いずれも川砂・川砂利コンクリート、水碎砂・川砂利コンクリート、さらに水碎砂・高炉スラグ碎石コンクリートの順に大きくなっていることが判る。しかし、同一種類のコンクリートでひびわれ間隔のばらつきが相当大きい(変動係数 27~42%)ことから、平均値が異なるというだけで 3 種のコンクリート間でひびわれ特性に差があると判断するには早計と思われたので、分散分析の手法を用い、3 種のコンクリートの間で平均値の差の検定を行なった。その結果は表-5 に示すとおりであり、3 種のコンクリートの間には 95% 以上の確率でひびわれ間隔に差の

表-5 ひびわれ間隔がコンクリート

の種類の間で有意差がある確率			
コンクリートの種類	川砂・川砂利 コンクリート	水碎砂 川砂利コンクリート	水碎砂 高炉スラグ碎石コンクリート
川砂・川砂利コンクリート		(8.0%) *	(9.9%)
水碎砂 川砂利コンクリート	—		(9.9%)
水碎砂 高炉スラグ碎石コンクリート	—	—	

注 1. ( ) 内の値は鉄筋応力度  $2,200 \text{ kg/cm}^2$  の場合、また下段の値は  $3,500 \text{ kg/cm}^2$  の場合である。

2. \* 例: 「川砂・川砂利コンクリートと水碎砂・川砂利コンクリートでひびわれ間隔に差のある確率が 8.0% で、差のない確率が 2.0% ある」という。

することが判明した。

一方、ひびわれ間隔に関するいくつかの実験定数を求める表-6 のようになり、既往の研究による定数とほぼ同じ値を示した。

### 4. ひびわれ巾

(1) ひびわれ巾の表示について、ひびわれ巾の測定には、ひびわれ巾を直接クラックゲージで測定する方法と、 $6 \text{ cm}$  間隔にコンクリート表面に貼り付けた標点の間隔をコンクリートゲージで測定する方法を併用した。図-7 にクラックゲージおよびコンタクトゲージで測定したひびわれ巾および変形量と鉄筋応力度との関係の一例を示す。これによると個々のひびわれ巾は鉄筋応力度の増加に伴い必ずしも滑らかに増加せず、ある応力度に達すると急激に増加を開始していた。一方、各プロットの変形量は鉄筋応力度の増加に伴い比較的滑らかに増加していた。以後のひびわれ巾の表示は、実際のひびわれ進展状況を忠実に表現し、また測定およびデータ整理の容易なクラックゲージによるひびわれ巾によった。

一方、ひびわれ巾の測定は、試験体の A 面 (上面) および B, C 面 (両側面) で行なったが、以後の総平均ひびわれ巾とは、A, B, C 各面の平均ひびわれ巾を平

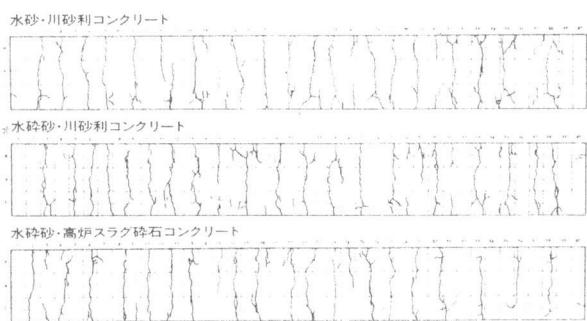


図-5 ひびわれ発生状況の例

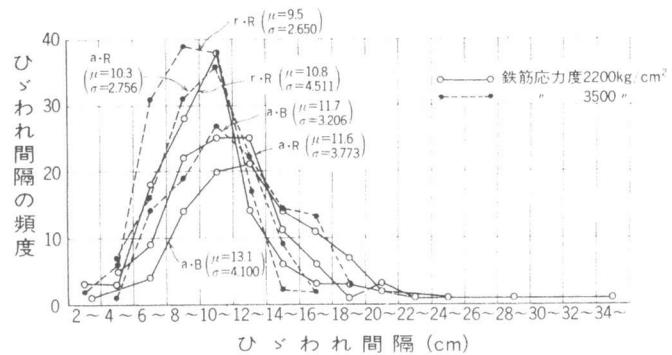


図-6 ひびわれ間隔の頻度分布

表-6 ひびわれ間隔に関する実験定数

種類	L <sub>me</sub>	L <sub>max</sub>	L <sub>me</sub> = k <sub>1</sub> L <sub>max</sub> / k <sub>1</sub>	L <sub>max</sub> = k <sub>2</sub> · t / k <sub>2</sub>	L <sub>me</sub> = k <sub>3</sub> · t / k <sub>3</sub>
a·R	11.6 (10.3)	19.5 (15.0)	1.68 (1.46)	5.23 (4.04)	3.09 (2.74)
	13.1 (11.7)	22.0 (17.7)	1.68 (1.51)	5.89 (4.72)	3.49 (3.12)
r·R	10.8 (9.5)	21.2 (15.1)	1.96 (1.59)	5.65 (4.08)	2.88 (2.53)
L <sub>me</sub> : 平均ひびわれ間隔 L <sub>max</sub> : 最大 " " t : かぶり厚さ					
Leonhardt 氏: 1.7 森田氏: 1.5 ( $\sigma_s = 3,000 \text{ kg/cm}^2$ ) 秋元・富沢氏: 1.52					
角田氏: 5.4~6.4 B.B.Brom 氏: 4.0 森田氏: 4.7 $t = 2 \sim 6 \text{ cm}$ ( $\sigma_s = 3,000 \text{ kg/cm}^2$ )					

注) 上段は鉄筋応力度  $2,200 \text{ kg/cm}^2$ 、下段は  $3,500 \text{ kg/cm}^2$

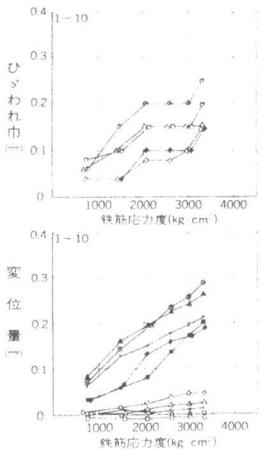


図-7 ひびわれ巾および変位量と鉄筋応力度の関係

均し、さらに同一種類のコンクリートによる試験体 2 本について平均したものである。また最大ひびわれ巾とは、各加力ステップにおける、2 本の試験体および A, B, C 面の中での最大ひびわれ巾のことである。

(2) 総平均ひびわれ巾と鉄筋応力度 図-8 は、3 種類のコンクリートの総平均ひびわれ巾、最大ひびわれ巾と鉄筋応力度との関係を表わしたものである。この図より、総平均ひびわれ巾は、鉄筋応力度に比例して直線的に大きくなり、水碎砂・川砂利コンクリートが他の 2 種類のコンクリートよりやや大きいことが判る。鉄筋応力度  $2.000 \text{ kg/cm}^2$  における総平均ひびわれ巾は、前者が  $0.09 \text{ mm}$  而後者が  $0.07 \text{ mm}$  程度である。

一方、Clark<sup>1)</sup> および後藤<sup>2)</sup> の実験式も、平均ひびわれ巾は鉄筋応力度に一次的に比例し、その直線は鉄筋応力度軸と  $\oplus$  側で交わるのに対し、今回の実験結果では  $\ominus$  側で交わっている。これは、前者のひびわれ巾が鉄筋位置におけるものであり、また  $0.04 \text{ mm}$  以下のひびわれ巾も正確に測定しているのに対し、今回の実験では、ひびわれ巾をコンクリート表面で測定し、さらに  $0.04 \text{ mm}$  以下のひびわれ巾はすべて  $0.02 \text{ mm}$  として総平均ひびわれ巾を求めたために平均ひびわれ巾が前者より大きくなつたためと思われる。

(3) 最大ひびわれ巾と鉄筋応力度 図-8 によると、川砂・川砂利コンクリートの最大ひびわれ巾は、CEB 式<sup>3)</sup> および kaar & Mattock 式<sup>4)</sup> に近似して鉄筋応力度に一次的に比例している。一方水碎砂を用いたコンクリートは鉄筋応力度が  $2.200 \text{ kg/cm}^2$  までは川砂・川砂利コンクリートよりも急激な勾配で大きくなるが、その後鉄筋応力度が増加しても最大ひびわれ巾は増加しない。最大ひびわれ巾  $0.2 \text{ mm}$  に対する鉄筋応力度は川砂・川砂利コンクリートが  $2.200 \text{ kg/cm}^2$  であるのに対し、水碎砂を用いたコンクリートの鉄筋応力度は約  $1100 \text{ kg/cm}^2$  な前者の半分である。鉄筋応力度  $2.200 \text{ kg/cm}^2$  に対する後者の最大ひびわれ巾は  $0.3 \text{ mm}$  となる。

#### N.まとめ

以上の結果から次のようなことが明らかになった。

水碎砂を用いたコンクリートは、乾燥収縮が約 2 倍の川砂・川砂利コンクリートと比較してもかかわらず、平均ひびわれ間隔、平均ひびわれ巾および最大ひびわれ巾のいずれも川砂・川砂利コンクリートよりも大きい値を示し、大きいひびわれの生じやすい特性を持っている。

表-7 に鉄筋応力度  $2.200 \text{ kg/cm}^2$  におけるひびわれ特性をコンクリート種類別に示す。

#### 参考文献

- 1) Clark, A. P.; Cracking in Reinforced Concrete Flexural Members; ACI Journal, Vol. 27, April 1956
- 2) 後藤, 植田, 満木; 鉄筋コンクリート部材引張部のひびわれに関する研究—両引供試体による実験; コンクリートライブラー, 第 14 号, 土木学会, 1965-12
- 3) CEB-FIP; コンクリート構造物設計施工国際指針; 1970, 鹿島出版会
- 4) kaar, P.H. and Mattock, A.H.; Control of Cracking, Journal of PCA Research and Development Laboratories, Vol. 4, No. 1, Jan. 1962

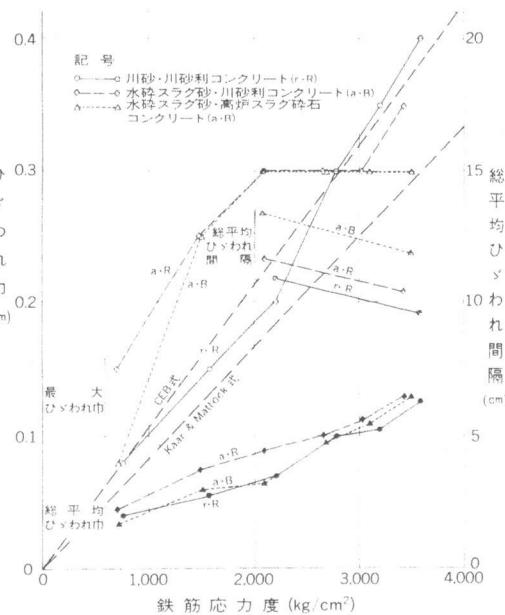


図-8 総平均ひびわれ巾、最大ひびわれ巾  
および総平均ひびわれ間隔

表-7 鉄筋応力度  $2.200 \text{ kg/cm}^2$  における

ひびわれ特性の比較			
コンクリートの種類	平均ひびわれ間隔 (cm)	平均ひびわれ巾 (mm)	最大ひびわれ巾 (mm)
川砂・川砂利コンクリート	1.08 (100)	0.07 (100)	0.2 (100)
水碎砂・川砂利コンクリート	1.16 (107)	0.09 (129)	0.3 (150)
水碎砂・高炉スラグ砕石コンクリート	1.31 (121)	0.07 (100)	0.3 (150)

( ) 内は川砂・川砂利コンクリートを 100 とした場合の各コンクリート比