

# 報告 鉄鋼スラグ水和固化体を用いたRC構造部材の力学特性

田中 英紀\*1・内藤 英晴\*2・松永 久宏\*3・高野 良広\*4

**要旨:** 高炉スラグ微粉末と製鋼スラグを用いた鉄鋼スラグ水和固化体によるRC部材を作製し、曲げ耐力およびせん断耐力を静的載荷実験で調査した。曲げ試験では、荷重-変位関係、引張主鉄筋のひずみ-曲げひび割れ幅を、せん断試験では、せん断スパン比 (a/d) を 2.0, 3.0, 4.0 としたせん断補強鉄筋のないRCはりの荷重-変位関係、ひび割れ分布、主ひずみ方向などが得られた。さらに、コンクリート標準示方書による曲げひび割れ幅やせん断耐力算定式と実験結果を比較し、示方書や既研究成果による算定式が、本水和固化体による部材にも適用可能であることを確認した。

**キーワード:** 鉄鋼スラグ水和固化体、曲げ耐力、せん断耐力、曲げひび割れ幅、せん断スパン比

## 1. はじめに

環境負荷を低減し、循環型の社会を目指す中で、多量の自然材料を使用してきた社会資本整備の今後のあり方は大変重要なものとなる。高炉スラグやフライアッシュなどは、セメント生成の材料として利用されており、代表的な建設副産物の有効利用技術となっている。

さらに、近年ではコンクリートの細・粗骨材への建設副産物の適用を目指し、製鋼スラグや高炉スラグを用いたFSコンクリート<sup>1)</sup>や今回対象とした鉄鋼スラグ水和固化体の研究が行われるようになった。中でも鉄鋼スラグ水和固化体(以下、固化体と称す)の圧縮強度、ヤング係数などの基本力学特性については、技術マニュアル<sup>2)</sup>や既往の研究成果<sup>3)</sup>にまとめられている。しかし、固化体を構造部材に適用し、曲げ耐力やせん断耐力などの部材特性を調査した研究成果は比較的少ない。

そこで、筆者らは、固化体を用いてRC部材を作製し、曲げ耐力およびせん断耐力を静的載荷試験で調査し、曲げひび割れ幅や最終破壊形式などの特性をまとめた。また、普通コンクリートを対象としたコンクリート標準示方書<sup>4)</sup>や既往の研究<sup>5),6),7)</sup>に基づく曲げひび割れ幅、曲げ

耐力およびせん断耐力を実験結果と比較し、既往の算定式が固化体による部材にも適用可能であることを確認することが本報告の目的である。

## 2. 構成材料の力学特性

### 2.1 固化体

固化体は、結合材として高炉スラグ微粉末を、細・粗骨材相当の材料として製鋼スラグを用いる。

今回用いた固化体は、設計基準強度  $f_{ck}$  を 24 (N/mm<sup>2</sup>), 35 (N/mm<sup>2</sup>) の 2 水準とし、さらに、各設計基準強度に対して、高炉スラグ微粉末、フライアッシュおよび製鋼スラグの単位量が多い高粉体と標準の 2 配合を設定した。

配合一覧を表-1に示す。表中の記号は配合名で、Sは標準、Pは高粉体を示し、ハイフン以後の数字は設計基準強度に対応している。

次に、固化体の応力-ひずみ関係を図-1に示す。図中の実験は、設計基準強度  $f_{ck}=24$  (N/mm<sup>2</sup>) の標準配合の一例で、φ100 (mm)、高さ h200 (mm) の円柱供試体を用いた。また、学会式とは、コンクリート標準示方書[構造成能照査編]において次式で定義されている<sup>4)</sup>。

表-1 配合一覧

記号	スラブ (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	粗骨材容積率 (%)	製鋼スラグの最大寸法 (mm)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
						水	高炉スラグ微粉末	普通ポルトランド	フライアッシュ	製鋼スラグ 0-5mm	製鋼スラグ 5-25mm	混和剤①	混和剤②
						W	BP	NP	FA	SS-1	SS-2	Ad-1	Ad-2
S-24	12	2.0	47.4	32.9	20	174	297	53	134	942	993	7.738	0
S-35	12	2.0	47.4	32.9	20	174	360	90	62	942	994	8.437	0
P-24	50(70-)	2.0	52.0	29.3	20	175	370	85	85	1013	888	0	5.400
P-35	50(70-)	2.0	52.0	27.3	20	170	430	120	120	943	827	0	5.580

\*1 五洋建設 (株) 技術研究所課長 博(工) (正会員)

\*2 五洋建設 (株) 技術研究所部長 工博 (正会員)

\*3 J F E スチール (株) スチール研究所 (正会員)

\*4 新日本製鐵 (株) 技術開発本部 環境・プロセス研究開発センター (正会員)

$$\sigma'_c = k_1 f'_{cd} \times \frac{\epsilon'_c}{0.002} \times \left( 2 - \frac{\epsilon'_c}{0.002} \right) \quad (1)$$

$\sigma'_c$ : 曲線部の応力ひずみ関係

$k_1$ : 係数

$f'_{cd}$ : コンクリートの設計圧縮強度

$\epsilon'_c$ : ピークひずみ  $\{= 0.002(2000\mu)\}$

ここでは、係数  $k_1$  と  $f'_{cd}$  との積は実験結果の圧縮強度と一致するように設定した。

実験結果は、ピーク値までは式(1)と良く整合しており、同範囲内であれば、普通コンクリートと同等の応力-ひずみ関係を示すものと判断できる。

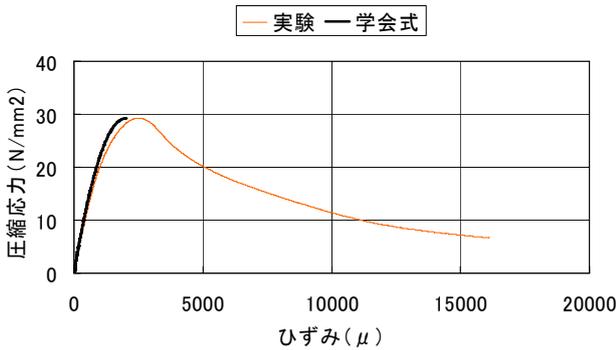


図-1 応力-ひずみ関係例

表-2に4配合に関する圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比および割裂引張強度一覧を示す。表中の材齢は、後述する曲げおよびせん断耐力試験実施日に合わせて実施したため、一般的な4週とは異なる。

## 2.2 主鉄筋およびせん断補強鉄筋

曲げ耐力用試験体には、圧縮およびせん断補強鉄筋にD13を、引張鉄筋としてD22を用いた。また、せん断耐力用の試験体に関しては、せん断スパン比  $a/d$  が2.0の場合だけD22を引張鉄筋とし、他の同スパン比ではD29を引張鉄筋として配置した。なお、せん断耐力用の試験体には、せん断補強鉄筋は配置していない。

用いた鉄筋のうち、D13とD22の3供試体による引張試験結果(応力-伸び率関係)を図-2および図-3に示す。同図より、上および下降伏応力、引張強度、破壊強度などの力学特性が明確に得られることがわかる。試

験はクリップ型の変位計を標点間位置に取り付けて実施した。また、表-3に結果一覧を示す。

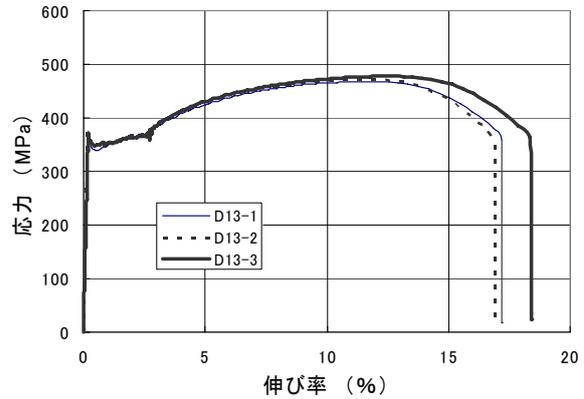


図-2 応力-伸び率関係 (D13)

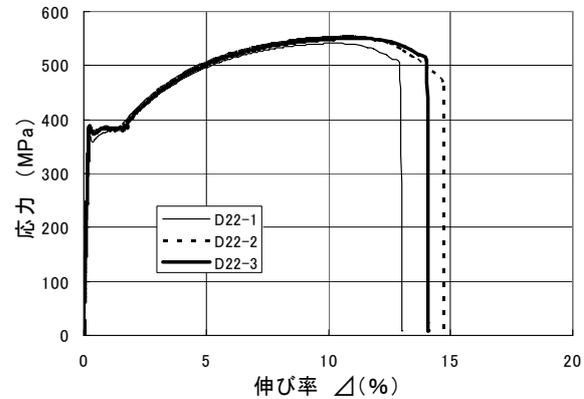


図-3 応力-伸び率関係 (D22)

表-3 鉄筋の力学特性一覧

鉄筋種類	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	上降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	下降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
D13	200,083	349	323	452
D22	192,010	374	361	540
D29	190,898	374	366	529

## 3. 部材耐力

本章では、固化体を用いて梁部材を作製し、曲げおよびせん断耐力を静的荷重試験で調査した。以下に、その概要と結果を示す。

表-2 強度特性一覧

コンクリート配合	材齢 (日)	養生条件	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 ( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
S-24	42	現場封緘	31.9	2.28	0.21	2.54
P-24	48	現場封緘	28.1	2.41	0.22	2.48
S-35	47	現場封緘	37.5	2.71	0.21	2.81
P-35	37	現場封緘	40.3	2.78	0.23	3.04

※) 表中の値は、3供試体の平均値を示す。

### 3.1 曲げ耐力

#### (1) 実験方法および検討ケース

ここでは、固化体の設計基準強度  $f'_{ck}$  を  $35 \text{ (N/mm}^2\text{)}$  とし、標準と高粉体の2ケースとした。また、試験は中央2点荷重とし、表-4に示す項目を計測した。なお、図-4には構造図を、図-5には計測機器の配置を示す。

次に、荷重は曲げひび割れ発生相当時、引張主鉄筋が降伏応力に達した時を基準として、負荷と除荷を繰り返して、最大荷重が明確にわかるまで実施した。なお、主筋が降伏応力に達するまでは  $0.1\text{kN/s}$  の荷重制御で、それ以降は  $0.6\text{mm/min}$  の変位制御で荷重した。図-6に概略荷重方法を示す。ここで、 $P_c$  は曲げひび割れ発生荷重、 $\delta_y$  は鉄筋降伏荷重時の中央変位を示す。

表-4 計測項目一覧

計測項目	設置位置	備考
変位計	中央 支点 1/4支点	750mm間隔
ひずみゲージ (固化体)	曲げ区間 引張側下面 圧縮側上面	5箇所 1箇所
ひずみゲージ $\pi$ ゲージ	引張主鉄筋 側面(2箇所) 引張側下面	図-5の丸数字 曲げひび割れ 幅測定

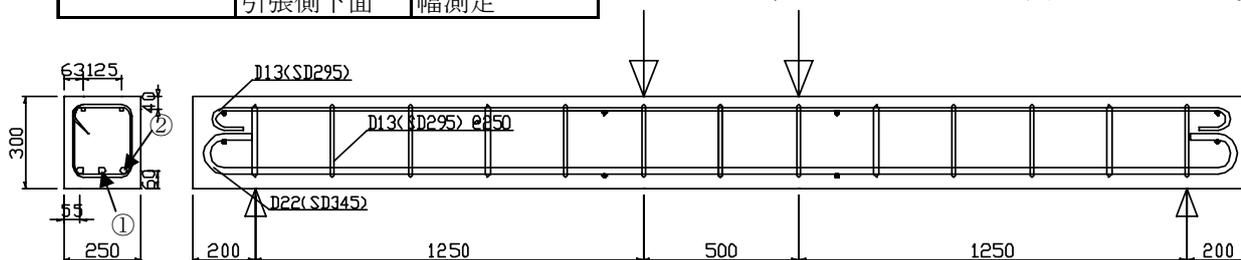


図-4 曲げ試験体構造図 (単位: mm)

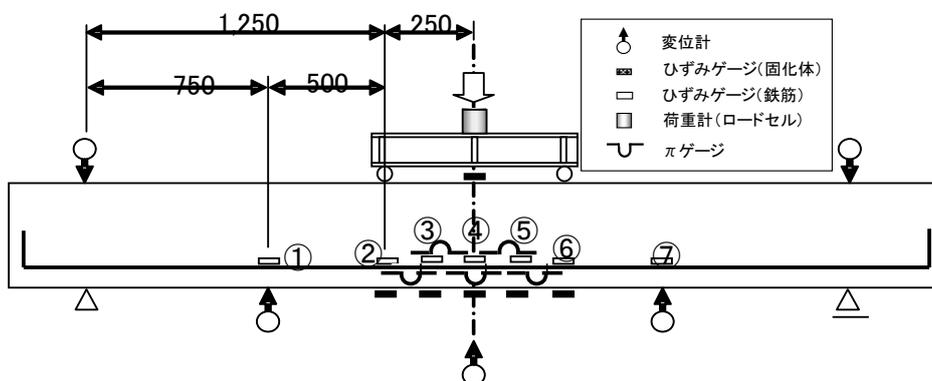


図-5 計測機器配置

表-5 曲げ試験結果一覧

試験体名	コンクリート圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	曲げ耐力時(引張鉄筋降伏)荷重 (kN)	式(3)による曲げ耐力時荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	最大荷重時変位 (mm)
S-35-B	35.2	137.5	143.3	150.1	37.3
P-35-B	40.3	133.9	145.0	150.4	29.8

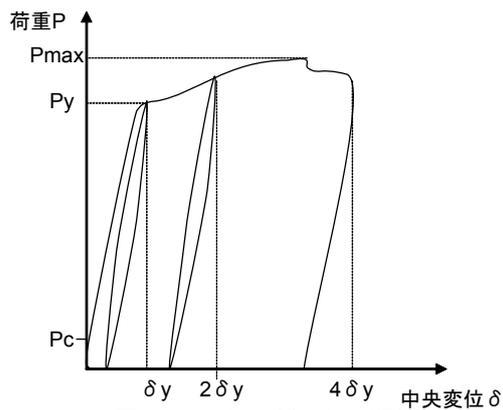


図-6 荷重制御 (曲げ耐力)

#### (2) 試験結果

試験結果として、荷重-中央点変位曲線を図-7に示す(次頁)。ひび割れ発生荷重は両者ともに  $27.4 \text{ (kN)}$  で、同一であった。引張側主鉄筋が降伏応力時(表-3の下降伏応力)の荷重は、標準で  $137.5 \text{ (kN)}$ 、高粉体で  $133.9 \text{ (kN)}$  で、若干標準配合の方が大きくなった。

さらに、最大荷重については、標準で  $150.1 \text{ (kN)}$ 、高粉体で  $150.4 \text{ (kN)}$  を示し、ほぼ同等と判断できる。

しかし、同荷重時の中央変位は標準で  $37.3 \text{ (mm)}$ 、高粉体で  $29.8 \text{ (mm)}$  で、じん性は標準配合の方が大きくなった。

表-5に曲げ試験結果一覧を示す。試験体名は表-2に準拠し、曲げ試験を示すBを最後に付記している。

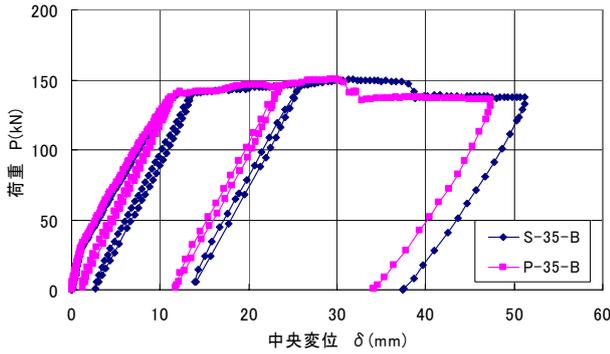


図-7 荷重-中央変位曲線

### (3) 曲げひび割れ幅および曲げ耐力の算定

本項では、試験結果と既往の文献に示される曲げひび割れ幅および設計曲げ耐力算定式とを比較し、固化体による部材の特性について記述する。

一般に曲げひび割れ幅は、以下の式(2)で算定される<sup>4)</sup>。ここでは、固化体の収縮やクリープは考慮していない。

$$w = 1.1k_1k_2k_3 \left\{ 4c + 0.7(c_s - \phi) \right\} \frac{\sigma_{se}}{E_s} \quad (2)$$

$k_1$ : 鋼材の表面形状による係数(=1.0)

$k_2$ : 固化体の品質による係数

$$= \frac{15}{f'_c + 20} + 0.7$$

$f'_c$ : 固化体の圧縮強度

$k_3$ : 段数による係数(=1.0)

$c$ : かぶり

$c_s$ : 鋼材の中心間隔

$\phi$ : 鋼材径

$\sigma_{se}$ : 鉄筋の応力増加量

各試験体の曲げ区間に配置した代表的な  $\pi$  ゲージによる変位と鉄筋のひずみとの関係を図-8および図-9に示す。同図には、式(2)で算定したひび割れ幅計算値も併記している。計算値は、計測値と良く整合しており、固化体による部材の曲げひび割れ幅は、普通コンクリート部材と同様、式(2)が適用可能と判断できる。

式(2)の縦軸は、右辺最終項の  $\sigma_{se}/E_s$  を鉄筋ひずみとして算定している。また、図中では弾性範囲 ( $1,948 \mu$ ) を限度として式(2)を表示している。

図-8および図-9の計測値①と②は、曲げ区間の中心下面に設置した  $\pi$  ゲージ値と中央部の図-4に示す引張主筋(①、②)のひずみに対応した結果である。

次に、材料試験で得られた圧縮強度、鋼材ヤング係数、降伏応力を基に曲げ耐力を式(3)<sup>7)</sup>から算定した結果、標準で 143.3 (kN)、高粉体で 145.0 (kN)の曲げ耐力相当荷重が得られた。なお、本試験体では引張鉄筋が降伏しても圧縮鉄筋は降伏しないので、式(3)にはその影響を考慮している。実験ではそれぞれ 137.5 (kN)、133.9 (kN)を示

し、4および7%式(3)による計算値の方が大きくなるが、概ね曲げ耐力も普通コンクリート部材と同等に取り扱えると推定できる。

$$M_u = A_{s1}f_y \left( d_1 - \frac{a}{2} \right) + A_{s2}\sigma'_{s2} \left( \frac{a}{2} - d_2 \right) \quad (3)$$

ここに、

$M_u$ : 曲げ耐力

$A_{s1}$ : 引張鉄筋断面積

$f_y$ : 引張鉄筋の降伏応力

$d_1$ : 圧縮縁から引張鉄筋までの距離

$a$ : 等価応力ブロックの高さ

$A_{s2}$ : 圧縮鉄筋断面積

$\sigma'_{s2}$ : 圧縮鉄筋の応力

$d_2$ : 圧縮縁から圧縮鉄筋までの距離

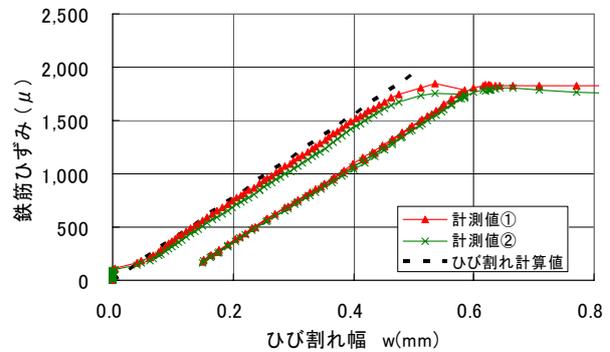


図-8 鉄筋ひずみ-ひび割れ幅関係 (標準)

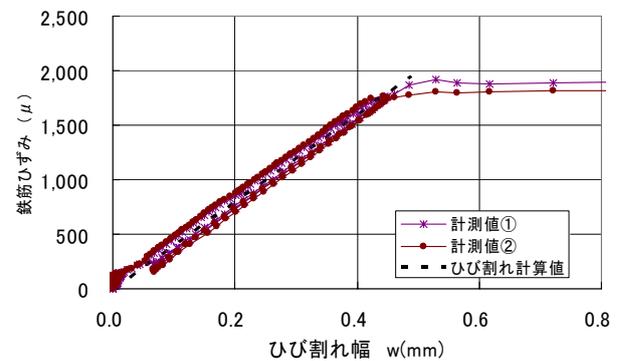


図-9 鉄筋ひずみ-ひび割れ幅関係 (高粉体)

## 3.2 セン断耐力

### (1) 実験方法および検討ケース

せん断耐力については、固化体の圧縮強度の他にせん断スパン比をパラメータとした。図-10に載荷パターンを示す。なお、 $P_{ud}$  は、せん断補強鉄筋を用いない棒部材の設計せん断耐力で次頁の式(4)で算定する<sup>4),6)</sup>。

また、 $a/d$  が 2.0 のせん断スパン比の試験体は別途検討したので、他のスパン比の試験体と寸法が異なる。検討ケースと併せて表-6にその詳細を示す。図-11に

a/d を 4.0 とした場合の構造図を示す。なお、本試験では試験体両端部に 12(mm) の鋼板を取り付け、引張鉄筋の定着を確保する方法を採用した。

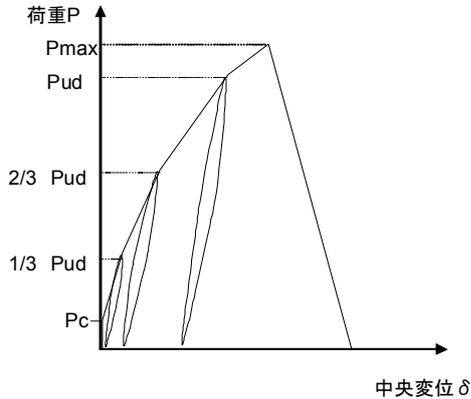


図-10 荷重制御 (せん断耐力)

$$V_{cd} = k \times \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vyd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b \quad (4)$$

$$k = 0.75 + 1.4 / (a/d)$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{(1/d)}$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{(100 \cdot P_V)}$$

$$\beta_n = 1.0$$

$$P_V = A_s / (b_w \cdot d)$$

$$f_{vyd} = 0.2 \times \sqrt[3]{f'_{cd}}$$

a: 支点-荷重点間距離

d: 有効高

b<sub>w</sub>: 幅

A<sub>s</sub>: 引張鉄筋断面積

f'\_{cd}: 固化体設計圧縮強度

γ<sub>b</sub>: 部材係数

V<sub>cd</sub>: せん断補強鉄筋を用いない棒部材の

設計せん断耐力

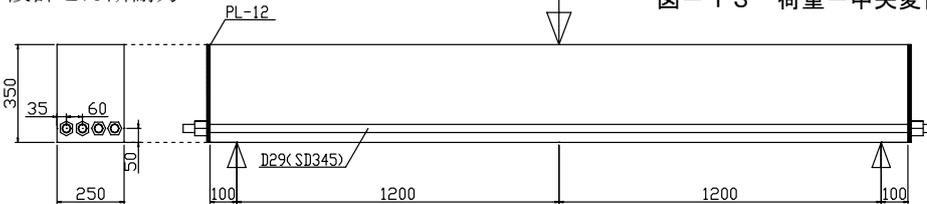


図-11 せん断試験体構造図 a/d=4.0 (単位: mm)

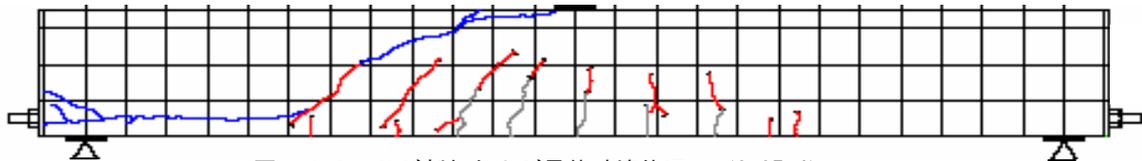


図-14 ひび割れおよび最終破壊状況 (S-35-4)

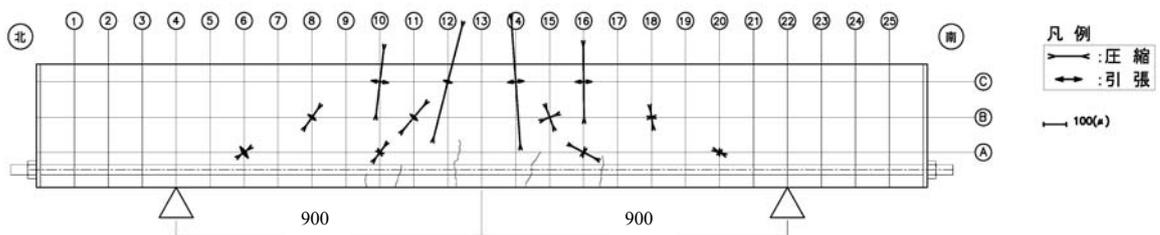


図-15 主ひずみ分布 (S-35-3)

## (2) 試験結果

図-12および図-13に荷重・中央変位関係例を示す。固化体圧縮強度に関わらず、最大荷重以降せん断力が低下する脆性挙動を示すことがわかった。a/dが4.0の場合、ピーク値での中央変位は、3.0の場合に比べて1.6~2.0倍程度大きくなる傾向を示した。図-14および図-15には、破壊状況と主ひずみ方向の例を示す。

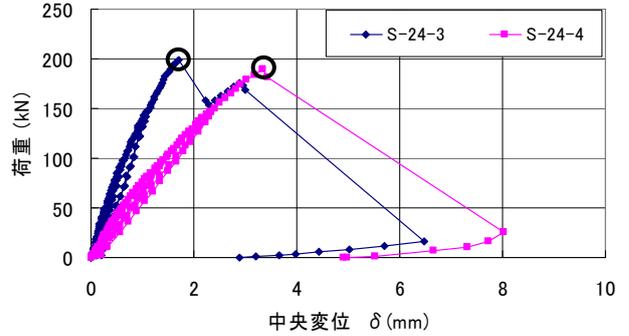
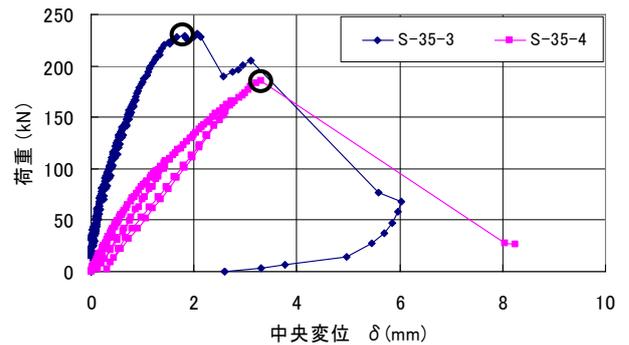


図-12 荷重-中央変位関係①



※) 図中の○は最大値を示す。

図-13 荷重-中央変位関係②

表-6 セン断試験結果一覧

試験体名	せん断スパン比 a/d	コンクリート圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	設計せん断耐力 $P_{sd}$ から 算定した荷重 (kN)	最大値(実験) $P_{uexp}$ (kN)	せん断耐力①から 算定した荷重 (kN)	せん断耐力②から 算定した荷重 (kN)	最終破壊モード	備 考
S-24-2	2.0	28.7	190.0	310.2	202.2	292.4	斜めひび割れ後、主筋の付着により、曲げ変形に移行した。	幅300mm,高さ400mm 主筋D22の試験体
P-24-2	2.0	27.1	190.0	277.0	197.4	284.8	同 上	同 上
S-24-3	3.0	37.2	146.8	199.0	204.2	282.4	せん断引張破壊が卓越 <sup>9)</sup>	載荷点から支持点への1本の斜めひび割れが発生。
P-24-3	3.0	28.4	146.8	210.6	186.4	226.2	せん断引張破壊が卓越	斜めひび割れが1本生じた後鉄筋付着による荷重が増加。
S-35-3	3.0	35.9	165.8	231.8	201.8	245.4	せん断引張破壊が卓越	載荷点から支持点への1本の斜めひび割れが発生。
S-24-4	4.0	31.9	146.8	189.4	193.8	213.2	斜め引張破壊とせん断引張破壊の混合	載荷点から支持点への斜めひび割れが2本発生。
P-24-4	4.0	28.1	146.8	173.8	185.8	204.4	せん断引張破壊が卓越	載荷点から支持点への1本の斜めひび割れが発生。
S-35-4	4.0	37.5	165.8	185.6	204.4	225.0	斜め引張破壊とせん断引張破壊の混合	載荷点から支持点への1本の斜めひび割れが発生。

※) 試験体名のSは標準配合、Pは高粉体配合を示し、ハイフオン以後の数字は設計基準強度およびせん断スパン比を表す。

### (3) セン断耐力の算定

表-6に結果一覧を示す。表中のせん断耐力①は式(4)の係数kを考慮しない算定値、同②は係数を考慮した算定値を示し、a/dが2.5程度以下から、普通コンクリート部材では、②が実験と良く整合する傾向がある<sup>6)</sup>。

実験値とせん断耐力①および②を比較すると、せん断スパン比a/dが2.0の場合、係数kを考慮した②と実験結果は整合しており、S-24-3は①に、S-35-3は②と整合した。さらに、同比が4.0の場合は、①と整合すると判断できる。P-24-3は、荷重-中央変位曲線が他と異なったので考察から除外した。

結果は、式(4)から得られたせん断耐力から算定した荷重と実験での最大荷重を対比できるようにまとめた。

以上から、せん断スパン比a/dが3.0程度以下から普通コンクリート部材同様、同スパンの影響が、せん断補強筋を用いない棒部材のせん断耐力に影響を与えると判断でき、固化体による構造部材のせん断耐力についても、同じ算定式(4)が適用可能と考えられる。

### 4. まとめ

本研究によって以下の知見または課題が得られた。

- ① 曲げ試験では、普通コンクリート部材に適用する曲げひび割れ幅および曲げ耐力算定式が固化体による部材にも適用可能である。
- ② セン断耐力についても、既往の評価式が適用でき、ひび割れ分布、主ひび割れ方向および最終破壊モードも普通コンクリートによる部材と同等であると推定できる。
- ③ セン断試験において、特にa/dが2.0の場合に鉄筋の付着によって斜めひび割れ後に曲げ変形に移行し、最終破壊モードの推定も含めて他のケースと対比できなかったため、追加検討してa/dの影響を確認する必要がある。
- ④ 今回の静的載荷と併せて、疲労や地震による動的な力学挙動を調査し、さらに数値解析による評価と実験結果との比較を行うことで、水和固化体の特性を把握することも課題のひとつと考えられる。

なお、本研究は、(社)日本鉄鋼連盟が経済産業省補助事業として実施した「スラグ利用に係わる研究開発」の中で実施したものである。

### 謝辞

本報告に当たり、耐力試験の実施およびデータのまとめに関して、日鉄環境エンジニアリング(株)にご協力して頂きました。ここに深謝致します。

### 参考文献

- 1) 伊藤正憲ほか：RC構造物への適用を目指したFSコンクリートの開発，コンクリート工学，Vol.38，No.10，pp.10-21，2000.10
- 2) 鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル，(財)沿岸開発技術センター，沿岸開発技術ライブラリーNo.16，pp.20-29，2003.3
- 3) 赤本淳ほか：鉄鋼スラグ水和固化体の変形特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.493-498，2007.7
- 4) コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，土木学会，pp.67-102，2002.3
- 5) Okamura,H.and Higai,T.:Proposed design equation for shear strength of reinforced concrete beams without web reinforcement,Proc.of JSCE No.300，pp.131-141，Aug.1980
- 6) 二羽淳一郎ほか：せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，第372号/V-5，pp.167-176，1986.8
- 7) 吉川弘道：鉄筋コンクリートの解析と設計，丸善株式会社，pp.72-92,1995.5
- 8) コンクリート構造物のポストピーク挙動解析研究委員会，コンクリート構造物のポストピーク挙動評価と設計への応用，日本コンクリート工学協会，pp.20-112,2003.