

論文 高炉スラグ微粉末を高含有した高強度コンクリートの材料特性と RC はりのせん断性状に与える影響

安田 瑛紀*1・森 香奈子*2・河野 克哉*3・多田 克彦*4

要旨: 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートを用いて RC はりの載荷実験を行い、コンクリートの材料特性や RC はりのせん断性状に与える影響を検討した。その結果、高炉スラグ微粉末の使用により自己・乾燥収縮ひずみの増加と圧縮強度の低下を確認し、材齢 91 日まで湿潤養生を行っても圧縮強度は 5%ほど低下する結果となった。RC はりの破壊形態は斜め引張破壊とせん断圧縮破壊および両者の遷移型の破壊に分類され、斜め引張破壊する場合にせん断耐力は最も低くなった。また、斜めひび割れ耐力の実験値と計算値の比は、同一の養生条件および材齢であれば高炉スラグ微粉末の使用により 1~21%の範囲で低下した。

キーワード: 高炉スラグ微粉末, 高強度コンクリート, RC はり, せん断破壊, 収縮

1. はじめに

セメントは製造過程で多くの CO₂ を排出し、その大部分は焼成工程における熱エネルギーと石灰石の熱分解 (CaCO₃→CaO+CO₂↑) に由来する。このため最近では、セメントの一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材料で置き換え、製造時の CO₂ 排出量を削減する低炭素型コンクリートに関する研究が多く行われている。ここで、主要な建設材料の CO₂ 排出原単位を表-1¹⁾に示す。高炉スラグ微粉末の排出原単位は 23.1 kg-CO₂/t ときわめて小さいが、これは高炉スラグ微粉末が鉄鋼製造における副産物であるため、資源・燃料消費における CO₂ 排出が主製品の高炉鋼に計上されるためである。加えて、高炉スラグはすでにセメント製造において原料代替として使用されており、セメントに後から高炉スラグ微粉末を混合しても高炉スラグの有効利用には直結しないことから、コンクリートの使用材料が環境に与える影響の判断には注意が必要である。

セメント産業は多量の CO₂ を排出する一方で、他産業から発生した廃棄物を原燃料として受入れており、その受入処理量は全産業で発生する廃棄物量の約 1 割に相当する²⁾。CO₂ の排出による環境への負荷と廃棄物受入れによる環境への貢献を総合的に評価する手法として、星

野ら³⁾は、日本版被害算定型影響評価手法(LIME2)によって各種セメントの環境影響評価を行っている。その結果、地球温暖化に加えて都市域大気汚染、酸性化、資源消費、廃棄物の各指標を統合評価した場合には、混合セメントよりも普通ポルトランドセメントを使用する方が環境への貢献が大きくなることが示されている。

また、低炭素型コンクリートに関する既往の研究の多くは、コンクリート単体の強度や耐久性といった材料レベルでの検討に留まっており、部材や構造レベルでの知見は少ない。しかしながら、コンクリート種類によって部材耐力が低下する場合には、補強材料の鉄筋量を増やしたり、供用後に補修補強を行ったりする等の対策が求められ、これらは当然更なるコストや環境負荷の要因となり得る。建設当初の材料による影響のみならず、供用や維持管理に関わるコンクリートの環境への影響を統括的に判断するためにも、混和材量を使用したコンクリートの構造特性の解明が求められる。

そこで本研究では、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートを用いて鉄筋コンクリート (以下、RC) はり供試体を作製し、載荷実験によってせん断性状を検討した。コンクリートの強度レベルは、既往の知見が特に少なくコンクリートの収縮による影響が顕著になる高強度コンクリートを対象にした。

2. 実験概要

2.1 実験ケース

本検討では、RC はりのせん断性状を載荷実験によって検討した。実験パラメータは、1) 高炉スラグ微粉末の有無、2) 養生条件、3) 試験材齢とし、全 8 水準の実験

表-1 各材料製造時の CO₂ 排出原単位¹⁾

材料	CO ₂ 排出原単位
普通ポルトランドセメント	765.5 kg-CO ₂ /t
高炉セメント B 種	457.7 kg-CO ₂ /t
高炉スラグ微粉末	23.1 kg-CO ₂ /t
高炉鋼 (形鋼)	1246.6 kg-CO ₂ /t

CO₂ 排出原単位: 1t 当たりの材料製造時に排出される CO₂ 量

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 第2研究部 研究員 修(工) (正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 第2研究部 副主任研究員 修(工) (正会員)

*3 太平洋セメント(株) 中央研究所 第2研究部 主席研究員 博(工) (正会員)

*4 太平洋セメント(株) 中央研究所 第2研究部 チームリーダー (正会員)

表-2 実験ケース

No.	供試体	BS/C (%)	養生条件		試験 材齢 (日)
			材齢 7 日 まで	材齢 7 日から 載荷試験まで	
1	OPC-Wet-28	0%	湿潤養生 (20℃)	湿潤養生	28
2	OPC-Dry-28			気中養生	28
3	OPC-Wet-91			湿潤養生	91
4	OPC-Dry-91			気中養生	91
5	BFS-Wet-28	60%		湿潤養生	28
6	BFS-Dry-28			気中養生	28
7	BFS-Wet-91			湿潤養生	91
8	BFS-Dry-91			気中養生	91

BS/C : 高炉スラグ微粉末置換率 (質量比), 湿潤養生条件 : 温度 20℃, 気中養生条件 : 温度 20℃, R.H.60%

表-3 使用材料

種類	名称	記号	物性等
練混ぜ水	水	W	上水道水
セメント	普通ポルト ランドセメント	C	密度 : 3.16g/cm ³ , 比表面積 : 3150cm ²
混和材	高炉スラグ 微粉末	BS	密度 : 2.91g/cm ³ , 比表面積 : 6450cm ² /g,
細骨材	山砂	S	表乾密度 : 2.55g/cm ³ , 粗粒率 : 2.59 吸水率 : 2.14%
粗骨材	碎石	G	表乾密度 : 2.63g/cm ³ , 吸水率 : 0.78%, 最大粒径 : 20mm, 実積率 : 59.4%,
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系
	AE 剤	AE	ポリアルキレングリコール誘導体

表-4 コンクリート配合

配合	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							目標フレッシュ性状	
			W	C	BS	S	G	SP	AE	スランプ	空気量
OPC	30	46	170	567	-	734	894	B×1.1%	B×0.002%	16±2.5cm	2.5±1.5%
BFS		43		227	340	676	894	B×0.75%	B×0.006%		

B : 結合材量 (B=C+BS), s/a : 細骨材率

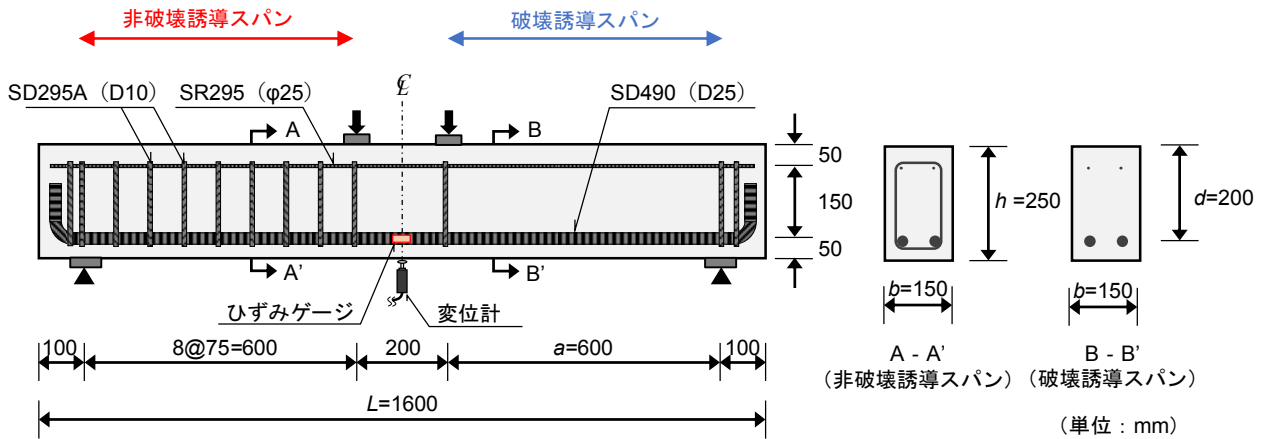


図-1 RC はり供試体概要

を行った。実験ケースを表-2 に示す。水準名はコンクリート種類と養生条件および試験材齢に対応している。コンクリートは、混和材を使用しない配合 (以下, OPC) と高炉スラグ微粉末を使用した配合 (以下, BFS) を用意した。BFS では、高炉スラグ微粉末をセメントに対して 60% 置換した。なお、60% の置換率は高炉セメント B 種と C 種の閾値に相当する。

いずれの水準もコンクリートの打込み後材齢 1 日で脱型を行った後、材齢 7 日まで湿潤養生を行った。材齢 7 日から載荷試験日までの養生条件を変動させ、No.1,3,5,7

の供試体は材齢 7 日からも継続して湿潤養生を行った。一方、No.2,4,6,8 の供試体は材齢 7 日から室温 20℃, R.H.60% の試験室にて気中養生を行った。

2.2 コンクリートの材料および配合

使用材料を表-3 に、コンクリートの配合および目標フレッシュ性状を表-4 に示す。コンクリートの配合は、水結合材比を 30%, 単位水量を 170kg/m³, 粗骨材の絶対容積を 340L/m³ でそれぞれ一定とし、スランプと空気量を混和剤の添加量によって一定範囲内に調整した。

2.3 コンクリートの材料試験

(1) 力学特性

φ100×200mm の供試体を用いて、コンクリートの圧縮強度を JIS A 1108 に準じて、静弾性係数を JIS A 1149 に準じて測定した。また、φ100×100mm の供試体を用いて、コンクリートの割裂引張強度を JIS A 1113 に準じて測定した。

(2) 収縮ひずみ

コンクリートの収縮ひずみは 100×100×400mm 供試体の中心部に設置した埋込みひずみゲージ(弾性係数 39N/mm², 標点距離 100mm)を用いて測定した。測定は凝結の始発に達した時点から開始した。収縮ひずみの算出では、熱電対によって水和発熱にともなう温度を実測し、線膨張係数を OPC の場合 10×10⁻⁶/°C, BFS の場合 12×10⁻⁶/°C と仮定して、長さの補正を行った。

2.4 RC はりの載荷実験

(1) RC はり供試体概要

図-1 に供試体概要を示す。供試体は、せん断スパン有効高さ比 $a/d = 3.0$, 全長 1600mm, 断面幅 200mm, 高さ 250mm の RC はりとした。主鉄筋には異形鉄筋 SD490 (D25) を、組み立て鉄筋には SR295 (φ10) を、せん断補強鉄筋には SD295A (D10) をそれぞれ使用した。また、片側のスパン(非破壊誘導スパン)のみにせん断補強鉄筋を配置することで、反対側スパン(破壊誘導スパン)でのせん断破壊を誘導した。

(2) 載荷方法と測定項目

コンクリートの打込み後から載荷試験までの間、等曲げ区間の主鉄筋に貼付したひずみゲージにより鉄筋ひずみを測定した。また、収縮によるひび割れの有無を確認するため、載荷実験直前に供試体表面の観察を行った。観察者による差を低減するため、クラックゲージを用いて幅 0.1mm 以上のひび割れの有無を確認した。

載荷は、油圧式 2000kN 耐圧機を用いて静的 4 点曲げ載荷とした。載荷点には幅 50mm の鋼板を、支点には幅

75mm の鋼板を設置した。支点の鋼板と供試体との間にはグリスを 2 枚のテフロンシートで挟んだ減摩パッドを配置して水平方向の摩擦力を軽減した。載荷点の鋼板と供試体との間には石膏を塗布して鋼板の不陸を防止した。

載荷実験中の測定項目は、荷重、スパン中央におけるたわみ、主鉄筋ひずみとした。荷重は耐圧機の出力電圧を、たわみは供試体中央にした変位計を、主鉄筋ひずみはひずみゲージのひずみをデータロガーによりそれぞれ測定した。

3. 実験結果

3.1 コンクリートの材料特性

(1) 力学特性

載荷実験時のコンクリート圧縮強度 (f_c'), 静弾性係数 (E_c), 割裂引張強度 (f_t) および収縮ひずみ (ϵ_{cs}) を表-5 に示す。

圧縮強度発現履歴の一例を図-2 に示す。BFS は OPC に比べて圧縮強度は小さく、特に材齢初期の差は顕著である。材齢 7 日以降に湿潤養生を行うことで徐々に強度差は縮まるものの、材齢 28 日において 16%ほど、材齢

表-5 載荷実験時のコンクリート特性

水準名	材齢 (日)	f_c' (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)	f_t (N/mm ²)	ϵ_{cs} (×10 ⁻⁶)
OPC-Wet-28	28	94.7	37.4	6.40	-137
OPC-Dry-28	28	92.1	35.5	5.54	-564
OPC-Wet-91	91	101	39.6	6.46	-145
OPC-Dry-91	91	93.7	38.2	5.50	-742
BFS-Wet-28	28	79.6	35.6	5.90	-379
BFS-Dry-28	28	74.8	31.1	4.96	-656
BFS-Wet-91	91	95.4	39.3	6.20	-325
BFS-Dry-91	91	84.4	33.5	5.80	-736

f_c' : 圧縮強度, E_c : 静弾性係数, f_t : 割裂引張強度,

ϵ_{cs} : 収縮ひずみ (-: 収縮, +: 膨張)

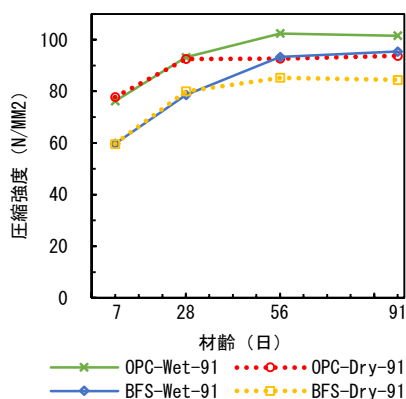


図-2 強度発現履歴
(載荷試験材齢: 91 日)

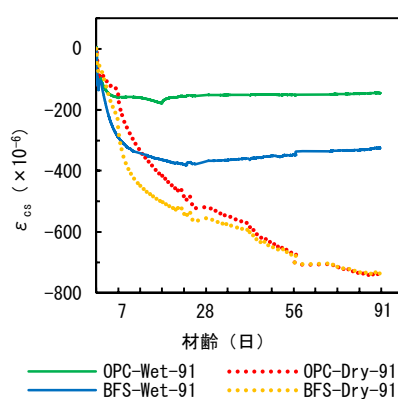


図-3 コンクリートひずみ履歴
(載荷試験材齢: 91 日)

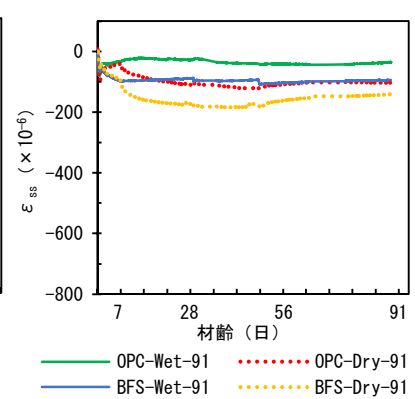


図-4 主鉄筋ひずみ履歴
(載荷試験材齢: 91 日)

91 日においても 5%ほど BFS は OPC より圧縮強度が低下する結果となった。BFS と OPC に共通して、材齢 7 日以降に湿潤養生を行わない場合には、材齢 28 日以降の長期強度はほとんど増進しない。なお、図には材齢 91 日で試験を行った 4 水準の結果のみを示しているが、コンクリート種類および養生条件が同一であれば材齢 28 日までの傾向は、材齢 28 日で試験を行った 4 水準と概ね同様であった。静弾性係数と割裂引張強度は圧縮強度に伴い増加し、コンクリート種類・養生方法によらず、強度レベルが同一であれば概ね同程度の値であった。

以上より、同一条件での力学特性を比較すると BFS は OPC よりも低下しており、OPC の 28 日強度と同等の圧縮強度を発現するためには、BFS は最低 91 日以上湿潤養生を継続する必要がある。

(2) 収縮特性

埋込みひずみゲージにより測定したコンクリートひずみ (ϵ_{cs}) 履歴の一例を図-3 に、主鉄筋に貼付したひずみゲージにより測定した主鉄筋ひずみ (ϵ_{ss}) 履歴の一例を図-4 に示す。BFS は OPC よりコンクリートの収縮ひずみが大きくなり、湿潤養生においては材齢 91 日時点で 124%ほど大きな値を示した。これは、乾燥収縮の影響を受けず自己収縮の影響が卓越する場合において、高炉スラグ微粉末の含有により自己収縮ひずみが増大することを示している。また、コンクリート種類によらず材齢 7 日以降の自己収縮ひずみの増加はわずかであり、特に材齢 28 日以降の長期材齢では膨張方向にひずみが回復する場合もあった。

材齢 7 日以降に気中養生を行った場合には、乾燥収縮の影響を受け材齢に伴いひずみが増加し、特に気中養生開始後の初期時点で大きなひずみ増加を示す。その後も材齢に伴いひずみが増加し、材齢 91 日時点では OPC と BFS は同程度の収縮ひずみを示した。

RC はりの主鉄筋ひずみは、コンクリートひずみに従

い増加・減少する傾向を示したが、その値はコンクリートひずみより小さく、配合による差も小さい。特に乾燥収縮ひずみが卓越する気中養生の場合には、材齢 28 日以降においてもコンクリートひずみが増加するにもかかわらず、鉄筋ひずみはほとんど横ばいとなっている。これはコンクリートのクリープ係数による影響に加え、引張強度の発現が十分でない状態で気中養生を開始することにより鉄筋との付着を阻害するひび割れが発生したためと考えられる。後述するように、実際これらの供試体では載荷実験前時点で主鉄筋近傍のひび割れを確認した。載荷実験前時点での主鉄筋ひずみを表-6 に示す。

3.2 RC はりのせん断性状

(1) 試験結果概要

試験結果の概要を表-6 に示す。いずれの供試体も破壊誘導スパンにおいて斜めひび割れが発生し、主鉄筋の降伏前に最大荷重を迎えてせん断破壊した。

本検討において、最大荷重に至るまでの破壊形態は以下の 3 つに分類された。1) 斜め引張破壊：斜めひび割れの発生後、直ちに荷重が低下し破壊に至る、2) 遷移型破壊：斜めひび割れの発生後荷重が低下するものの、載荷を続けると荷重が回復し、最終的には斜めひび割れの開口により破壊に至る、3) せん断圧縮破壊：斜めひび割れ発生後も荷重がほとんど低下せず、最大荷重においてひびわれ近傍のコンクリート圧壊とともに破壊に至る。供試体毎の破壊形態を表-6 に、破壊形態別の荷重-ひび割れ関係を図-5 に示す。遷移型破壊およびせん断圧縮破壊の供試体では、斜めひび割れが発生後即座に部材上縁まで貫通せずに部材としての耐荷力が保持されたことに加えて、斜めひび割れ上部でタイドアーチ機構を形成することにより、斜めひび割れ発生後も荷重に抵抗したものと考えられる。河金ら⁵⁾は、せん断スパン有効高さ比の大きいスレンダービームにおいても高強度コンクリートを用いた場合には斜め引張破壊とせん断圧縮破壊の

表-6 載荷試験結果の概要

水準名	ϵ_{cs} ($\times 10^{-6}$)	V_c (kN)	V_{max} (kN)	V_{ca11} (kN)	V_{ca12} (kN)	破壊 モード	V_c/V_{ca11}	V_{max}/V_{ca12}
OPC-Wet-28	-46	65.6	110.9	74.6	79.1	せん断圧縮破壊	0.88	1.40
OPC-Dry-28	-103	75.8	76.8	73.9	77.6	遷移型破壊	1.03	0.99
OPC-Wet-91	-53	65.5	88.2	76.2	82.8	遷移型破壊	0.86	1.07
OPC-Dry-91	-104	62.0	62.0	74.7	78.5	斜め引張破壊	0.83	0.79
BFS-Wet-28	-96	59.3	65.3	70.6	70.4	遷移型破壊	0.84	0.93
BFS-Dry-28	-126	55.8	70.2	68.9	67.5	遷移型破壊	0.81	1.04
BFS-Wet-91	-82	63.7	94.2	74.9	79.5	せん断圧縮破壊	0.85	1.18
BFS-Dry-91	-103	55.0	55.0	71.4	73.2	斜め引張破壊	0.77	0.75

ϵ_{ss} : 載荷実験開始前の主鉄筋ひずみ (- : 収縮, + : 膨張), V_c : 斜めひび割れ耐力の実験値 (=斜めひび割れ発生荷重 $P_c/2$),

V_{max} : せん断耐力の実験値 (=最大荷重 $P_{max}/2$), V_{ca11} : 斜めひび割れ耐力の計算値⁴⁾, V_{ca12} : せん断圧縮耐力の計算値⁶⁾

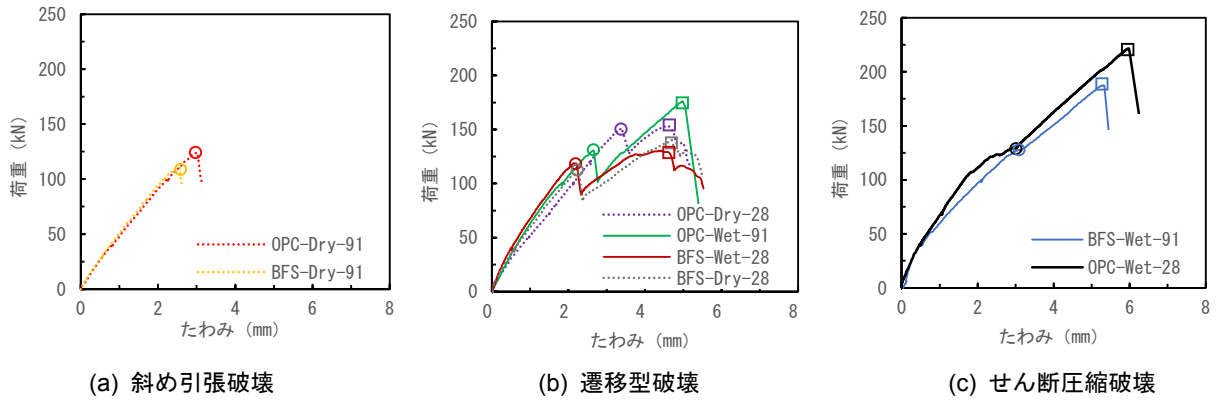


図-5 荷重-たわみ曲線

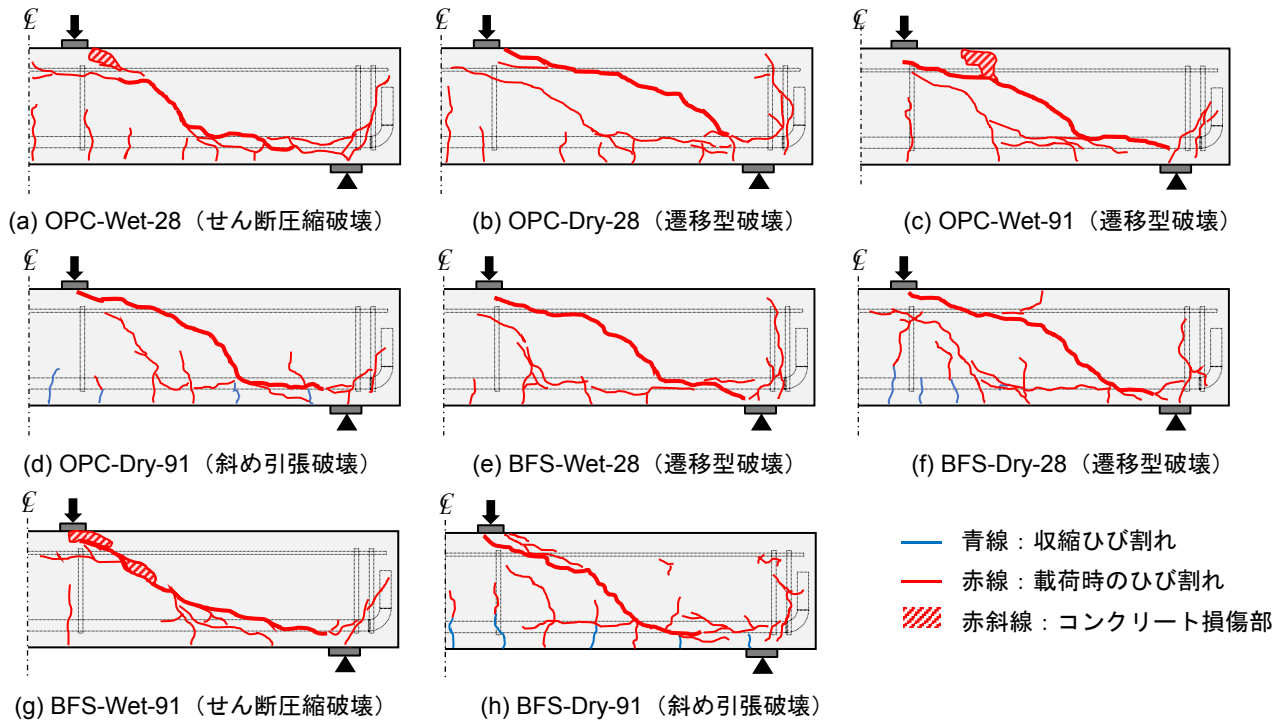


図-6 ひび割れ図

2つの破壊形態が存在することを報告している。本検討でもせん断スパン有効高さ比が $a/d=3.0$ と比較的大きいものの、全ての供試体が斜め引張破壊には至らなかったものと考えられる。

(2) 斜めひび割れ耐力への影響

斜め引張破壊から遷移型破壊やせん断圧縮破壊への破壊形態の移行によりせん断耐力は増加するものの、斜めひび割れの発生はコンクリート構造物の供用時においては重要な限界状態になると考えられ、以下では斜めひび割れ耐力について考察を行う。

表-6 より斜めひび割れ耐力 V_c をコンクリート種類で比較すると、養生条件および材齢が同一であれば、斜めひび割れ耐力は BFS の方が低下した。これには第一にコンクリート強度差による影響が考えられるので、斜めひび割れ耐力の実験値と計算値の比 V_c/V_{cal1} を表-6 に示す。計算には二羽ら⁴⁾の提案している式(1)を使用し、

せん断補強鉄筋を配置しない破壊誘導スパンを対象に、式(1)によって計算した。

$$V_{cal1} = 0.2f'_c{}^{1/3}p_w^{1/3}\left(\frac{d}{1000}\right)^{-1/4}\left(0.75 + \frac{1.4}{a/d}\right)b_wd \quad (1)$$

ここに、 f'_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)、 p_w : 主鉄筋比 (%), d : 有効高さ (mm), a : せん断スパン (mm), b_w : ウェブ幅 (mm)

この結果、実験値と計算値の比は BFS の方が小さく、同一の養生条件および材齢であればこの比は 1~21% の範囲で低下した。式(1)は普通強度のコンクリートを対象としているが、本検討においては骨材のかみ合わせ抵抗の減少など⁵⁾によるコンクリートの高強度化によるせん断強度への影響は一律であると仮定し、式(1)による計算を行い、実験値との比の大小関係を比較した。

(3) せん断圧縮耐力

せん断圧縮破壊するディープビームやショートビーム

の耐力算定式として、二羽⁶⁾は式(2)を提案している。

$$V_{cal2} = \frac{0.24f'_c(\sqrt{1+p_w})\left(1 + \frac{3.33r}{d}\right)}{1 + (a/d)^2} bd \quad (2)$$

ここに、 r ：載荷板の幅 (mm)

表-6 にせん断圧縮耐力の計算値 V_{cal2} を示すが、遷移型破壊およびせん断圧縮破壊した供試体において、過度に安全側の評価となった OPC-Wet-28 を除けば、せん断耐力 V_{max} と計算値 V_{cal2} の比は 0.93~1.18 の範囲であり、概ね精度よく評価できている。高強度および高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの場合にも、既往のせん断圧縮強度算定式によってせん断耐力を予測できることが示唆された。これは、圧縮応力の影響が卓越するせん断圧縮破壊においては、斜め引張破壊に比べて収縮ひずみに伴うコンクリートの引張応力やひび割れの影響を受けづらいためと考えられる。

(4) ひび割れ性状への影響

コンクリートの収縮ひずみが 600×10^{-6} 以上であった OPC-Dry-91, BFS-Dry-28, BFS-Dry-91 において、載荷実験前時点でひび割れが生じていた。これらのひび割れは図-6 中の青線で示す通り、主鉄筋と直行方向に生じており、載荷時にはそのまま曲げひび割れとして開口、進展した。これはコンクリートの収縮を主鉄筋が拘束することにより引張応力を生じたためと考えられる。載荷実験においては、斜め引張破壊の供試体では斜めひび割れが即座に部材上縁まで貫通したが、遷移型破壊およびせん断圧縮破壊の供試体においては、斜めひび割れはまず圧縮鉄筋位置近傍まで進展するものの、即座に上縁を貫通することはなかった。これにより、斜めひび割れ上部でのコンクリートによる抵抗力が保たれ、タイドアーチ機構の形成により更なる荷重に抵抗できたものと考えられる。

(5) 破壊形態への影響

コンクリートの収縮ひずみが 740×10^{-6} 程度と最も大きかった OPC-Dry-91 および BFS-Dry-91 において、斜めひび割れ発生後、即座に耐荷力を失い斜め引張破壊を生じた。また、これらの供試体は同一のコンクリート種類の中では最も小さい斜めひび割れ耐力を示した。これは、先述したように収縮に対する内部鉄筋の拘束力としてコンクリートに引張応力が生じ、曲げひび割れおよび斜めひび割れ幅が増大したためと考えられる。河金ら⁵⁾は、自己収縮が卓越する高強度コンクリートにおいて、収縮によるひび割れ幅の増大がひび割れ先端部のコンクリート応力負担を低下させ、圧縮部コンクリートによるせん断抵抗が低下するために斜めひび割れ耐力が低下することを報告している。本検討においては、自己収縮に加えて乾燥収縮の影響が加わり、また、混和材に高炉スラグ微粉末を使用した場合にも同様の現象が生じることが示

唆された。なお、収縮量の低下に伴い破壊形態はせん断圧縮破壊に近づく傾向を示したものの、同程度のコンクリート収縮ひずみを示していた OPC-Wet-28 と OPC-Wet-91 において破壊形態が異なること等からも、破壊形態に及ぼす影響については更なる検討が求められる。

4. まとめ

本検討で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 水結合材比 30%の高強度コンクリートにおいて、養生条件や材齢が同一であれば、BFS の圧縮強度は OPC と同程度かそれ以下である。特に、BFS が OPC と同等の強度を発現するためには材齢 91 日以上長期にわたる湿潤養生が不可欠である。
- 2) コンクリートの自己・乾燥収縮ひずみは、BFS の方が OPC より大きくなる。ひずみやコンクリートの引張強度によっては、内部鉄筋の拘束により、載荷実験前においても鉄筋近傍にひび割れが発生する。
- 3) 比較的スレンダーな $a/d=3.0$ の RC はりにおいても、高強度コンクリートや高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートを用いることで、破壊形態は斜め引張破壊とせん断圧縮破壊および両者の遷移型の破壊に分類される。
- 4) 斜めひび割れ耐力の実験値と計算値の比は同一の養生条件および材齢であれば BFS の方が 1~21% の範囲で低下し、圧縮強度差による影響を補正しても斜めひび割れ耐力が低下する傾向を確認した。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートの環境影響評価（その 2）、コンクリート技術シリーズ 62, p.39, 2004
- 2) 一般社団法人セメント協会ホームページ参照：
<http://www.jcassoc.or.jp/seisankankyo/seisan01/seisan01a.html> (閲覧日：2017 年 12 月 21 日)
- 3) 星野清一、河合研至、久保田修、平尾宙：セメントの廃棄物・副産物の資源化をあらゆる環境指標による各種セメントの評価、セメント・コンクリート論文集, Vol.69, pp. 679-680, 2015
- 4) 二羽淳一郎、山田一字、横沢和夫、岡村 甫：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, V-5, 第 372, pp.167~176, 1986
- 5) 河金甲、佐藤良一：高強度 RC はりの斜めひび割れ発生強度に及ぼす収縮の影響評価、土木学会論文集 E, Vol.65, No.2, pp.178-197, 2009
- 6) 二羽淳一郎：FEM 解析に基づくディーブームのせん断耐力に関する研究、第 2 回 RC 構造のせん断問題に対するコロキウム論文集, pp. 167-176, 1986