

論文 ジオポリマーコンクリートはりの曲げ耐荷性状に関する基礎的研究

佐川 康貴^{*1}・太田 周^{*2}・合田 寛基^{*3}・大西 俊輔^{*4}

要旨：本研究では、ジオポリマー（GP）を使用した RC はり（GP コンクリートはり）の曲げ耐荷性状を明らかにすることを目的とした。まず、鉄筋の引抜き試験を行い、GP コンクリートの付着特性を調べた結果、供試体が割裂しない条件において、普通コンクリートと比較して優れた付着特性を示した。次に、はりの曲げ載荷試験を行った結果、GP コンクリートは普通コンクリートの場合と同様の耐力算出方法が適用可能であること、普通コンクリートの場合と同程度の靱性に富んだ曲げ耐荷性状を示すことが明らかとなった。また、GP コンクリートはりは、ひび割れ分散性が高く、1 本当たりのひび割れ幅が小さくなることも分かった。

キーワード：ジオポリマーコンクリート、付着特性、RC はり、曲げモーメント、曲げひび割れ

1. はじめに

近年、フライアッシュや高炉スラグ微粉末等の副産物をセメントの代替材料として積極的に有効利用するための研究および開発が行われている。中でも、Davidovits によって提唱されたジオポリマー（GP）は、セメントを全く用いず、フライアッシュなどのアルミナシリカ粉末とアルカリシリカ溶液の縮重合反応によって固化体を作製できる技術¹⁾であり、特にオーストラリアでは実用化され始めている^{2),3)}。GP は耐酸性や耐火性に優れ、アルカリ骨材反応が生じないといった特性を持っており、従来の普通コンクリートの弱点を補完できる材料に成り得る可能性を有している。

GP は加熱養生により強度発現することから、主にプレキャスト製品としての利用が見込まれているが、近年は更なる副産物有効利用の面から、はり等の構造部材への適用に向けた実用的な研究^{4),5)}も行われている。GP は普通コンクリートと同様に圧縮強度に比べて引張強度や曲げ強度が相対的に小さいため、構造部材に適用するためには鉄筋による補強が必要となる。著者らは既往の研究⁶⁾で、GP モルタルと鉄筋との付着特性に関する検討を行い、GP モルタルがセメントモルタルよりも優れた付着特性を持つことを明らかにした。本研究では、まず、GP コンクリートと鉄筋との付着特性に関する検討を行った。次に、曲げ破壊先行型となるようスターラップを配置し、GP を用いた RC はり（GP コンクリートはり）を作製し、載荷試験を行い、耐荷性状について考察した。

2. GP コンクリートの付着特性

2.1 使用材料

使用材料を表-1 に示す。GP コンクリートの活性フィ

ラーには、フライアッシュ（FA）と高炉スラグ微粉末（BFS）を使用した。フライアッシュは JIS A 6201 の II 種に相当する FA-2（密度 2.32g/cm³，強熱減量 3.7%）および強熱減量が JIS 規準外の FA-L（密度 2.27g/cm³，強熱減量 11.6%）の 2 種類を使用した。アルカリシリカ溶液として、水ガラスと苛性ソーダを混ぜ、密度を 1.40g/cm³ に調整したものの（GPW）（東曹産業（株）製，ナトリウム系）を使用した。骨材には、細骨材として珪砂（S），粗骨材として碎石 G1（5-10mm），G2（10-20mm）を使用した。また、GP コンクリートとの比較を目的として、普通ポルトランドセメント使用の OPC コンクリートを作製した。なお、骨材は GP と同じものを使用し、混和剤には、AE 減水剤としてリグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体（Ad）と AE 剤としてアルキルエーテル系陰イオン界面活性剤（AE）を使用した。

蛍光 X 線定量分析によって得られた FA の化学成分を表-2 に示す。FA-L は、FA-2 に対して比表面積および強熱減量が大きく、未燃カーボンが多く含まれている。実際、写真-1 に示す通り、FA-L は濃い灰色を呈している。写真-2 にフライアッシュの SEM 画像を示す。FA-2 は綺麗な球形をしたものが多いが、FA-L はいびつな形のものも多く含まれていることが分かる。また、FA-2 と FA-L はともに、約 80% が SiO₂ と Al₂O₃ で構成されているものの、CaO は FA-2 の方が多い。

2.2 配合および加熱養生条件

GP コンクリートの配合を表-3 に示す。2-7018 は FA-2 を用い、最高温度 70℃で 18 時間保持の加熱養生を行ったもの、L-7024 は FA-L を用い、最高温度 70℃で 24 時間保持の加熱養生を行ったものである。全粉体に対する BFS 置換率は 2-7018 で 30wt%，L-7024 で 40wt%とした。

*1 九州大学大学院 工学研究院社会基盤部門准教授 博士（工学）（正会員）

*2 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻修士課程（学生会員）

*3 九州工業大学大学院 工学研究院建設社会工学研究系准教授 博士（工学）（正会員）

*4 大阪ガス（株） エンジニアリング部土木技術チーム課長（正会員）

種類	種類	記号	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)
GP	FAⅡ種	FA-2	2.32	4310
	JIS 外 FA	FA-L	2.27	4860
	高炉スラグ 微粉末	BFS	2.92	4090
	アルカリ溶液	GPW	1.40	—
	珪砂	S	2.60	—
	碎石	G1	2.61	—
G2		2.61	—	
OPC	普通 セメント	C	3.16	3310
	水道水	W	1.00	—
	珪砂	S	2.60	—
	碎石	G1	2.61	—
		G2	2.61	—
	AE 剤	AE	1.04	—
AE 減水剤	Ad	1.06	—	

	FA-2	FA-L
SiO ₂	58.94	59.36
Al ₂ O ₃	21.00	17.03
Fe ₂ O ₃	3.73	3.47
CaO	6.07	1.61
MgO	1.29	0.88
SO ₃	0.50	0.35
Na ₂ O	0.42	0.66
K ₂ O	1.75	1.09
TiO ₂	0.83	0.81
P ₂ O ₅	0.74	0.18
MnO	0.04	0.03
強熱減量	3.7	11.6
計	99.0	97.1



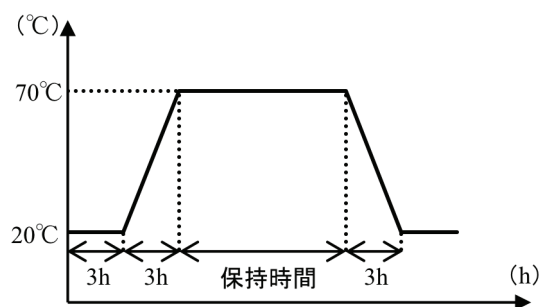
図-1 に加熱養生の条件を示す。なお、打設面をプラスチックフィルムで保護し、加熱養生中の乾燥を防いだ。OPC コンクリートの配合を表-4 に示す。28 日圧縮強度が GP コンクリートと同程度になるように、水セメント比 W/C を 60%とした。また、OPC コンクリートは加熱養生を行わなかった。脱型後、全ての供試体を 20℃、60%R.H.の恒温恒湿室で気中養生し、材齢 28 日で試験に供した。また、表-5 に材齢 28 日におけるそれぞれの強度特性を示す。GP コンクリートの静弾性係数が OPC コンクリートと比較して小さいことが分かる。

活性フィラーと細骨材をパン型強制練りミキサーに投入後、30 秒間空練りし、GPW を添加し 1 分間練り混ぜた。掻き落とし後、粗骨材を投入し更に 1 分間練り混ぜた。なお、使用した材料は、事前に 20℃の室内で保管しておいた。

付着強度試験は土木学会規準 JSCE-G 503「引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法（案）」を参考にして行った。供試体は一辺の長さ 100mm の立方体（以下、C1 供試体と呼ぶ）とし、鉄筋は D16 (SD295A)

	單位量(kg/m ³)					
	GPW	FA	BFS	S	G1	G2
2-7018	330	353	152	559	329	517
L-7024	379	281	191	536	318	501

水セメント比	単位量(kg/m ³)					Ad	AE
	W	C	S	G1	G2	(g)	(ml)
60%	170	283	850	375	587	885	8.5



	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
2-7018	33.6	15.4	2.12
L-7024	27.8	12.7	2.03
OPC	31.1	30.1	2.46

を使用した。また、既往の研究⁶⁾において、ジオポリマーモルタルで同様の付着強度試験を行った際、割裂引張破壊により終局に至ったため、本研究では、鉄筋の種類および付着長（4D=64mm。Dは鉄筋の直径（mm）。）はそのままにし、供試体の一边の長さを200mmにしたもの（以下、C2供試体と呼ぶ）を追加で作製し、破壊性状や最大付着応力度に及ぼす影響を調べた。供試体の数は、C1供試体、C2供試体ともに3個である。

引抜き試験は図-2に示すようにセンターホールジャッキを用いて行い、非付着長部分には軟質ビニール管（ホース）を使用した。また、鉄筋のすべり量は、自由端に設置したダイヤルゲージによって測定した。なお、付着応力度は式(1)によって算出した。式中の補正係数 α は、セメントコンクリートに対して適用されると考えられるが、GPコンクリートに対してもそのまま適用した。

$$\tau = \frac{P}{4\pi D^2} \times \alpha \quad (1)$$

ここに、 τ ：付着応力度(N/mm²)

P ：引張荷重(N)

D ：鉄筋の直径(mm)

α ：コンクリートの圧縮強度に対する補正係数

$$\alpha = 30/f'_c$$

f'_c ：同時に作製した円柱供試体の材齢28日における圧縮強度(N/mm²)

2.5 実験結果および考察

表-6に引抜き試験結果（供試体3個の平均）を、図-3に付着応力度とすべり量の関係を示す。まず、C1供試体とC2供試体の結果を比較すると、GPコンクリート

およびOPCコンクリートともに、C2供試体の最大付着応力度が大きくなった。この理由として、まず、供試体のかぶり厚さが大きくなったことが挙げられる。また、C1供試体では、コンクリートの割裂破壊が先行したためであり、これは、図-3に示すように、破壊時のすべり量が小さい結果と一致する。C1供試体ではGPコンクリートおよびOPCコンクリートともに全ての供試体で写真-3(a)に示すような割裂破壊が確認されたが、C2供試体では割裂破壊は生じず、鉄筋の引抜けによって終局に至った（写真-3(b)）。

次に、GPコンクリートとOPCコンクリートの結果を比較すると、C1供試体では最大付着応力度がOPCコンクリートの方が大きくなったが、C2供試体ではGPコンクリートの方が大きくなった。これは、表-5に示すように、GPコンクリートの割裂引張強度がOPCコンクリートと比較して小さいことに起因すると考えられる。そのため、割裂が先行して起きたC1供試体では、GPコンクリートの方がOPCコンクリートよりも早く終局を迎え、最大付着応力度が小さくなったと考えられる。また、割裂破壊を起こさなかったC2供試体では、GPコンクリートの方が最大付着応力度が大きいことから、鉄筋との付着特性はGPコンクリートの方がOPCコンクリートよりも優れていると考えられる。著者らが既往の研究⁶⁾においてGPモルタルと鋼板の直接引張試験（建研式）を行った結果、付着強度を測定できたことから、GPと鋼材との間には何らかの化学的付着が生じていると考えられる。しかし、その大きさおよび影響度については、検討の余地が残る。

また、すべり量が0.002D（=0.032mm）における付着応力度は、C1供試体でL-7024>OPC>2-7018、C2供試体で2-7018>L-7024>OPCの順となった。C1供試体とC2供試体での順序が異なったが、すべり量が0.1mmの時の付着応力度を比較すると、C1供試体およびC2供試体ともにGPコンクリートの方がOPCコンクリートと比較して大きい結果となった。表-5に示したように、GPコンクリートの静弾性係数は、OPCコンクリートの半分程度しかないにも関わらず、GPコンクリートの付着剛性が大きくなった理由として、両者での付着応力-すべり

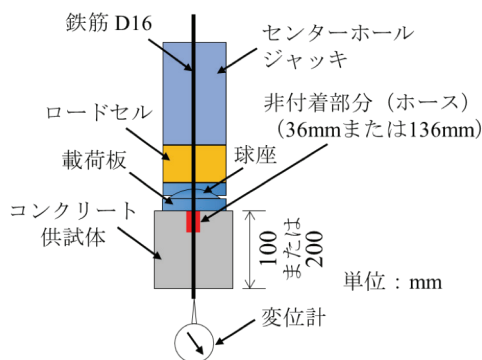


図-2 引抜き試験概略図

表-6 試験結果

	C1 供試体			C2 供試体		
	2-7018	L-7024	OPC	2-7018	L-7024	OPC
すべり量が0.002Dにおける付着応力度(N/mm ²)	5.26	5.72	5.37	5.75	4.83	3.49
最大付着応力度(N/mm ²)	9.70	10.5	12.6	16.4	15.6	13.9
終局時のすべり量(mm)	0.215	0.229	0.433	0.662	0.862	1.009

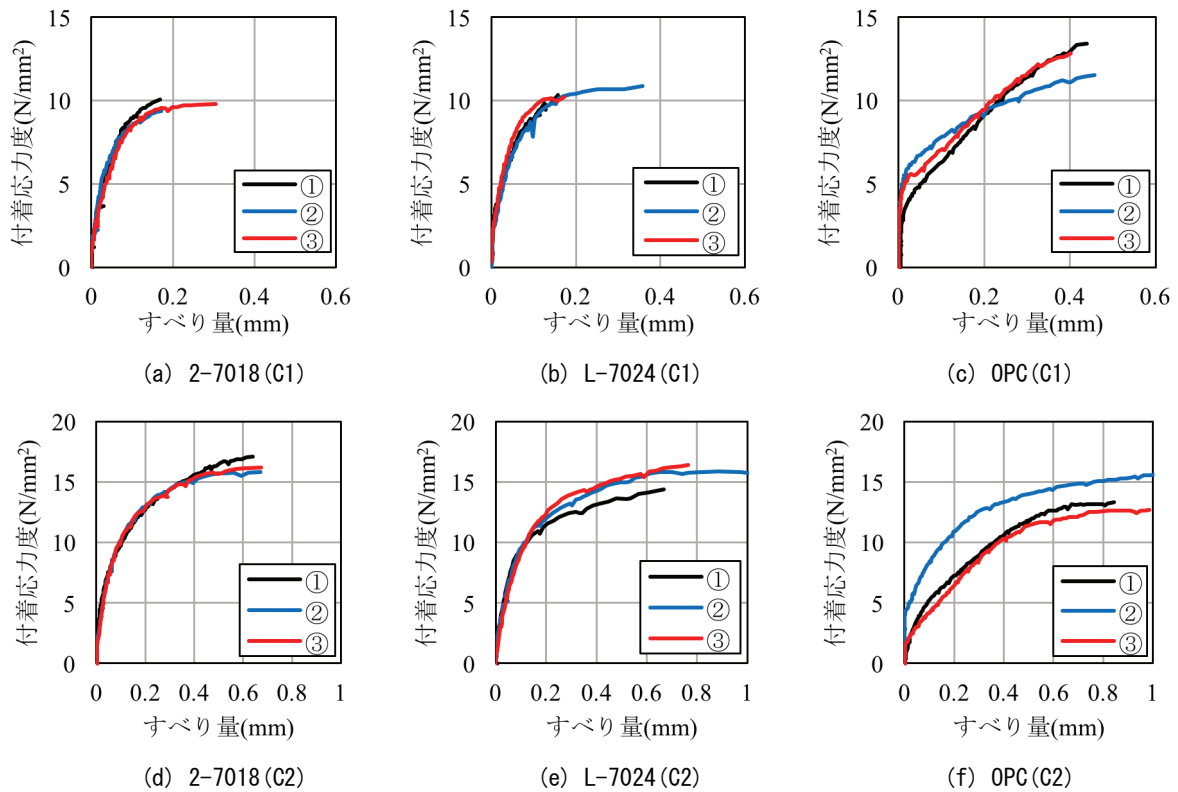


図-3 付着応力度とすべり量の関係



写真-3 終局時の状況

表-7 コンクリートの使用材料

分類	種類	記号	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)
GP	FAⅡ種	FA-2	2.34	4040
	低品質 FA	FA-L	2.27	4860
	高炉スラグ微粉末	BFS	2.90	4180
	GP 溶液	GPW	1.40	—
	珪砂	S	2.60	—
	碎石	G1	2.61	—
G2		2.61	—	
OPC	普通セメント	C	3.16	3310
	水道水	W	1.00	—
	陸砂	S1	2.56	—
	砕砂	S2	2.64	—
	碎石	G	2.70	—
	AE 減水剤	Ad	1.07	—

量関係の違いや、応力伝達特性の違いが考えられるが、本研究の範囲内では明らかにすることはできなかった。

GP コンクリートの 2-7018 と L-7024 を比較すると、最大付着応力度はほぼ同程度であることから、強熱減量が高いフライアッシュを使用しても、GP コンクリートの付着特性に与える影響は小さいことが明らかとなった。

3. GP コンクリートはりの曲げ耐荷性状

3.1 使用材料

使用材料を表-7 に示す。FA-2 と高炉スラグ微粉末は 2. で使用したもの（表-2）と産地は同じであるが、ロットが異なる。また、OPC コンクリートは、骨材の種類および AE 減水剤の種類と添加量が 2. で使用したものと異なる。

3.2 配合および加熱養生条件

GP の配合を表-8 に示す。蒸気養生の設備の都合上、加熱温度と保持時間を GP コンクリートと OPC コンクリートとで同じ条件の 70℃、18 時間とした。なお、BFS 置換率は 2-7018 および L-7018 とともに 30 wt% とした。まず、2-7018 を作製したが、加熱養生時終了後に打設面に収縮が原因と考えられるひび割れが確認された。そのため、次に作製した L-7018 では、加熱養生開始前に打設面へパラフィン系初期養生剤を適量塗布したところ、加熱養生後の収縮ひび割れは抑制された。OPC の配合を表-9 に示す。水セメント比 W/C は 58% とした。全ての供試体

は、脱型後、曲げ荷重試験開始まで室内で気中静置とした。

3.3 はり曲げ荷重試験方法

供試体は、200×300×2000mm の矩形梁とし、支間長 1700mm、荷重スパン 300mm で左右対称となるよう 2 点単調荷重した。主筋 (D16-SD345) は単段配筋とし、せん断補強筋 (D6-SD295A) はせん断スパン内に 100mm 間隔で配筋した。主筋の降伏強度および静弾性係数の実験値はそれぞれ、388N/mm²、178kN/mm²であった。材齢約 4 週で曲げ荷重試験に供した。図-4 にはり供試体概略図を示す。

3.4 実験結果および考察

(1) 荷重-たわみ関係

表-10 に材齢 28 日における円柱供試体の強度特性を示す。2-7018 と OPC-7018 は 30N/mm² 程度の圧縮強度が発現しているが、L-7018 はそれよりも低くなっている。

図-5 に 50kN まで、図-6 に全体の荷重-たわみ関係を示す。図中に示す破線は、全断面有効として求めた荷重-たわみ関係である。供試体は全ての水準において、引張側の主鉄筋が降伏した後にコンクリート上縁が圧壊する曲げ引張破壊で終局を迎えた。

まず、図-5 を見ると、荷重初期段階は計算値と実験値が精度よく一致しており、GP コンクリートの材料特性は円柱供試体の強度特性を反映させて支障ないことが確認された。次に、図-6 より、曲げひび割れ発生前は、GP コンクリートの静弾性係数が小さいことが影響し、剛性が低くなっている。しかし、曲げひび割れ発生後は、OPC コンクリートと同程度の傾きで荷重-たわみ曲線が推移し、同程度の荷重で鉄筋の降伏を迎えた後、最大荷重に達した。この結果から、GP コンクリートは OPC コンクリートに比べて静弾性係数が 1/3~1/2 程度であるにもかかわらず、靱性に富んだ曲げ耐荷性状を有することが明らかとなった。

表-11 に各段階における荷重について実験値と計算値を比較した結果を示す。ひび割れ発生荷重は、下縁応

力が圧縮強度の 1/15 となるときの荷重とした。また、主鉄筋降伏荷重は、圧縮側を弾性体とし、主鉄筋が降伏強度に達する時の荷重とし、最大荷重は、等価応力ブロックを用いて算出した。なお、2-7018 のみ打設面に深さ 30mm の収縮ひび割れが生じていたため、有効高さを 270mm と仮定した。主筋降伏荷重および最大荷重は、GP コンクリートおよび OPC コンクリートともに計算値と実験値が概ね同じである。よって、普通コンクリートを用いた場合と同様に、平面保持の仮定や、等価応力ブロック法を用いた設計が可能であると考えられる。

表-8 GP コンクリートの配合

	単位量(kg/m ³)					
	GPW	FA	BFS	S	G1	G2
2-7018	330	353	152	559	329	517
L-7018	379	331	145	533	314	493

表-9 比較用 OPC コンクリートの配合

	単位量(kg/m ³)					
	W	C	S1	S2	G	Ad
OPC-7018	183	313	589	251	940	3.13

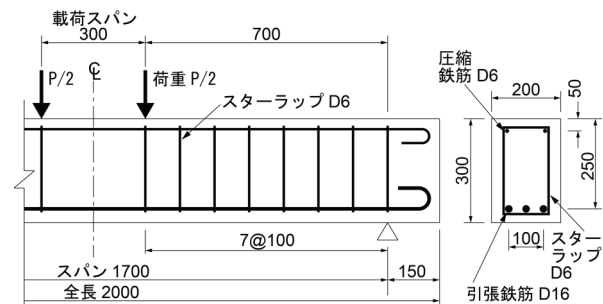


図-4 はり供試体概略図

表-10 強度特性 (材齢 28 日)

	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
2-7018	34.0	15.6
L-7018	22.6	10.0
OPC-7018	30.0	30.0

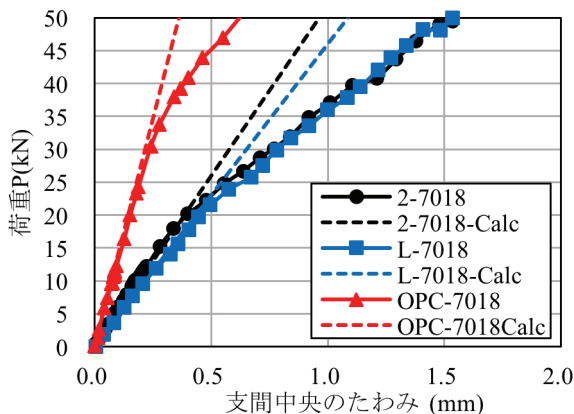


図-5 荷重-たわみ関係 (50kN までを拡大)

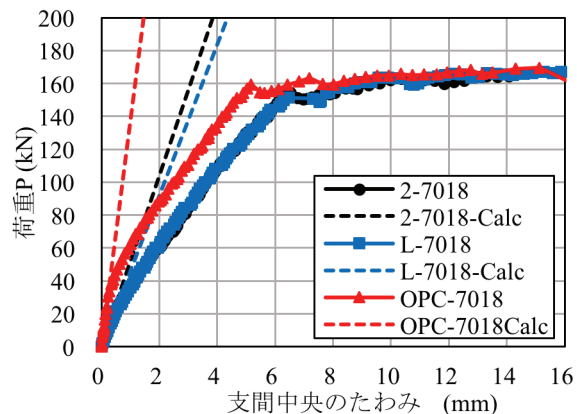


図-6 荷重-たわみ関係 (全体)

表-11 各段階における荷重の比較

	ひび割れ発生荷重			主筋降伏荷重			最大荷重		
	計算値	実験値	実/計	計算値	実験値	実/計	計算値	実験値	実/計
	kN	kN	-	kN	kN	-	kN	kN	-
2-7018	20	30	1.50	143	154	1.08	151	178	1.18
L-7018	14	24	1.71	139	153	1.10	145	175	1.21
OPC-7018	18	40	2.22	148	160	1.08	150	169	1.13

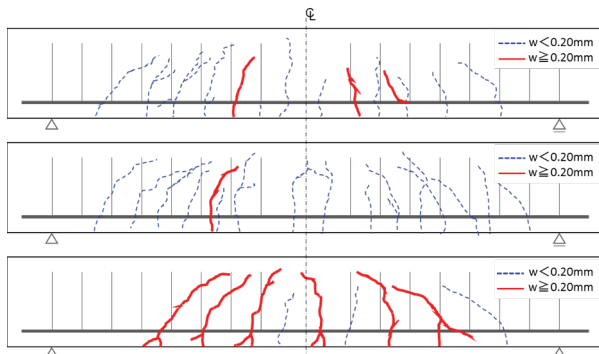


図-7 主筋降伏時のひび割れ図 (w: ひび割れ幅)
(上段: 2-7018 中段: L-7018 下段: OPC-7018)

(2) ひび割れ性状

図-7に主筋降伏時のひび割れ図を示す。GPコンクリートのひび割れ本数は、OPC-7018と比較して、2-7018が約1.5倍、L-7018が約2倍となった。さらに、GPコンクリートのひび割れ幅はOPCコンクリートと比較して小さいことから、GPコンクリートは優れたひび割れ分散性を有することが明らかとなった。これは、前述の2.で行った引抜き試験の結果と関連して考察することができる。曲げ載荷試験におけるひび割れ発生時の鉄筋とコンクリートの付着状況が、引抜き試験におけるすべり量が小さい時の付着状況に相当すると考えると、鉄筋のすべり量が0.1mm程度の付着応力度はGPコンクリートの方がOPCコンクリートよりも優れていることから、GPコンクリートはひび割れ幅が進展せず、ひび割れが分散すると考えられる。一方、OPCコンクリートはひび割れ発生後、GPコンクリートに比べ付着特性に劣るので、ひび割れが分散せず、ひび割れ幅のみが増加すると考えられる。

4. まとめ

本研究では、ジオポリマーを使用したRCはりの曲げ耐荷性状を明らかにすることを目的とし、鉄筋の引抜き試験およびはりの曲げ載荷試験を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 引抜き試験において供試体が割裂しない場合は、GPコンクリートはOPCコンクリートと比較して付着特性が優れる。
- (2) フライアッシュの強熱減量がGPコンクリートの付着特性に与える影響は小さい。

- (3) GPコンクリートはOPCコンクリートの場合と同様の設計が可能であると考えられる。
- (4) GPコンクリートはOPCコンクリートと比較して静弾性係数が1/3～1/2程度であるにもかかわらず、OPCコンクリートと同程度の靱性に富んだ曲げ耐荷性状を示すことが分かった。
- (5) GPコンクリートはOPCコンクリートと比較して、特に鉄筋の引抜き初期の付着特性が優れるため、ひび割れ分散性が高く、1本あたりのひび割れ幅も小さい。

参考文献

- 1) J. Davidovits: Geopolymer chemistry and applications. Saint-Quentin, France Institut Géopolymère, 2008
- 2) Jannie S. J. van Deventer and John L. Provis: Low Carbon Emission Geopolymer Concrete: from Research into Practice, Proceedings of 27th Biennial National Conference of the Concrete Institute of Australia in Conjunction with the 69th RILEM Week, pp.12-21, 2015
- 3) Tom Glasby, John Day, Russell Genrich and James Aldred: EFC Geopolymer Concrete Aircraft Pavements at Brisbane West Wellcamp Airport, Proceedings of 27th Biennial National Conference of the Concrete Institute of Australia in conjunction with the 69th RILEM Week, pp.1051-1059, 2015
- 4) 河尻留奈, 国枝稔, 上田尚史, 中村光: ジオポリマーの基礎物性と構造利用に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1943-1948, 2011
- 5) 松林卓, 南浩輔, 梶田秀幸, 舟橋政司: ジオポリマーコンクリートを用いた鉄筋コンクリートはりの曲げ挙動, 第69回土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.69, V-051, pp.101-102, 2014
- 6) 太田周, 佐川康貴, 原田耕司, 西崎丈能: ジオポリマーモルタルと鉄筋との付着特性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2313-2318, 2016