

論文 ジオポリマーコンクリートはりの曲げせん断特性

合田 寛基*1・原田 耕司*2・佐川 康貴*3・西崎 丈能*4

要旨：フライアッシュ系ジオポリマー(GP)コンクリートを用いたはり部材を対象として、曲げせん断が作用した場合の耐荷特性について実験検討した。フライアッシュ(FA)については、FAII 種ならびに強熱減量の高い FA の 2 種別とし、比較用に普通ポルトランドセメント(OPC)コンクリートを使用した。コンクリートの目標圧縮強度は 30MPa, 50MPa とした。曲げせん断を受ける GP コンクリートはりは、コンクリート標準示方書[設計編]のせん断耐力式に基づく計算値と同等以上の耐荷力を有するとともに、一部の供試体で斜め引張りひび割れ発生後も荷重が増加し、曲げ引張破壊に至ったことを確認した。

キーワード：ジオポリマー, フライアッシュ, コンクリートはり, 曲げせん断特性

1. はじめに

Davidovits が提唱したジオポリマー(以下, GP)は、フライアッシュ(以下, FA)をはじめとする活性フィラーをアルカリシリカ溶液に混和し、一定時間以上加温することで生成される縮重合体である¹⁾。GP は、セメントコンクリートと比較して、製造時における CO₂ の低減が期待できる材料であるとされる²⁾。また、活性フィラーとして、都市ゴミ焼却灰、溶融スラグ微粉末なども使用可能なことから、産業副産物の有効利用の観点からも有用な建設材料として期待されている³⁾。

GP の材料特性に関しては、既往の研究¹⁾より、(1)FA の一部を高炉スラグ微粉末(以下, BFS)に置換することにより 100MPa 程度までの圧縮強度発現が可能である、(2)同一圧縮強度の普通ポルトランドセメント(以下, OPC)コンクリートと比較して静弾性係数が小さい、といった強度特性に関する知見の他、(3)ASR に対する抵抗性が高い、(4)耐火性が高い、(5)化学的侵食の抵抗性が高い、といった耐久性に関する知見が報告されている。以上の特徴を踏まえ、すでに歩車境界ブロックをはじめとするコンクリート二次製品への適用が進められている。一方で、はりや柱、床版といった大型の建設部材への適用を念頭に置いた研究事例は稀少である。南らの研究⁴⁾では、GP をはり部材に適用した場合の曲げ特性について評価している。しかしながら、曲げせん断特性に関する報告はなく、OPC と比較して、十分な知見を得られていないのが現状である。

今後、持続可能なインフラの整備を進める上で、資源や材料の地産地消を進めることならびに要求性能に応じた材料や部材を適用することが合理的であると考えられる。一般的な建設材料として広く認知されているセメン

トコンクリートとともに、GP コンクリートの性能を活かした適切な方法を提案することで、社会インフラをはじめとする建設業界全体への貢献が期待される。

そこで本研究では、FA ならびに BFS を適用した GP の建設部材への適用を念頭に置いた基礎研究として、GP を用いた RC はり部材を作製し、曲げせん断を受けた際の耐荷特性ならびに耐荷力について実験検討を行った。

図-1 に本研究のフローを示す。GP コンクリートを用いた RC はりの作製にあたり、スランプフロー試験ならびに成型時の目視観察を基に、コンクリートの流動性、充填性ならびに作製時のひび割れ発生等について確認した。RC はりの曲げせん断載荷試験に関しては、変形特性、ひび割れ発生状況、斜め引張りひび割れ発生時の挙動、コンクリート標準示方書[設計編]⁵⁾のせん断耐力計算値にもとづいた耐荷力評価の妥当性について確認した。

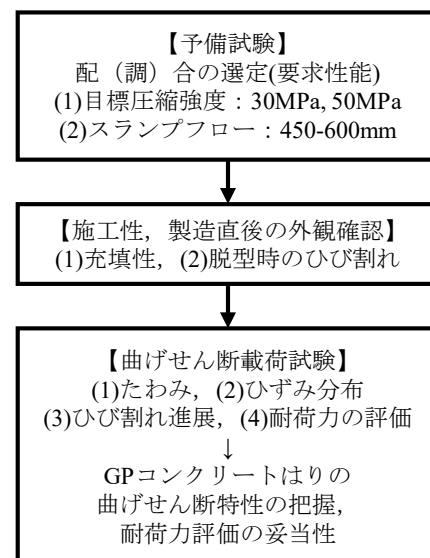


図-1 研究フロー

*1 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)

*2 西松建設株式会社 技術研究所 土木技術グループ 上席研究員 博士(工学) (正会員)

*3 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門建設設計材料工学講座 准教授 博士(工学) (正会員)

*4 大阪ガス株式会社 エンジニアリング部 シニアエンジニア 博士(工学) (正会員)

2. 実験方法

2.1 使用材料

表-1 に使用材料の諸元ならびにフィラーにおける主要な化学成分をそれぞれ示す。GP コンクリートのジオポリマー溶液(以下、GPS)には、水ガラス、苛性ソーダならびに蒸留水を混合し、アルカリ水比の相違によって、GPS-A と GPS-B の 2 種別とした水溶液を使用した。活性フィラーである FA については、汎用品である FAII 種(以下、FAII)と強熱減量ならびに比表面積が高い FA(以下、FAL)の 2 種別とした。BFS については、FAII と同程度の比表面積を有し、石こう無添加のものをを使用した。GP 用の細骨材ならびに粗骨材には、珪砂ならびに碎石をそれぞれ使用した。比較用の OPC コンクリートについては、汎用の普通ポルトランドセメントをはじめ、陸砂、砕砂、碎石ならびに AE 減水剤(遅延型)を使用した。

表-2 に活性フィラーである FAII、FAL ならびに BFS の主な化学成分を示す。FAII では、相対的に CaO が高い。一方、FAL では CaO が低く強熱減量が高い。

表-3 に異形棒鋼の強度特性を示す。異形棒鋼には、主鉄筋に SD345-D19、圧縮鉄筋ならびに組立鉄筋に SD295A-D6 をそれぞれ使用した。

2.2 配(調)合および供試体

表-4 に GP コンクリートの配(調)合表を示す。GP コンクリートの配(調)合については、OPC の RC 部材に広く適用されている圧縮強度に注目し、施工性に配慮した配(調)合とした。ここで、表中の P は全粉体質量を示す。予備実験に基づいて、目標空気量を 2%、目標スランプフローを 400~600mm、目標圧縮強度を 30MPa ならびに 50MPa と定めた要求性能を概ね満足するものを採用した。以上を踏まえ、GP コンクリートの配(調)合は、(1)GPS に GPSII、FA に FAII を使用して目標圧縮強度を 30MPa とした GPII-30、(2)GPSII と FAL を使用して目標圧縮強度を 30MPa とした GPL-30、(3)GPS-A と FAII を使用して目標圧縮強度を 50MPa とした GPII-50 の 3 種別とした。

表-1 使用材料

種別	品名	密度	比表面積
		g/cm ³	cm ² /g
GPS-A	ジオポリマー溶液 A 種	1.40	-
GPS-B	ジオポリマー溶液 B 種	1.40	-
FAII	フライアッシュII種	2.34	4040
FAL	フライアッシュ(高強熱減量)	2.27	5480
BFS	高炉スラグ微粉末	2.90	4180
S(GP)	ジオポリマー用細骨材(珪砂)	2.60	-
G(GP)	ジオポリマー用粗骨材(碎石)	2.61	-
OPC	普通ポルトランドセメント	3.16	3310
S1	陸砂	2.56	-
S2	砕砂	2.64	-
G	OPC 用粗骨材	2.70	-
M	AE 減水剤(遅延型)	1.07	-

表-2 フィラーの主な化学成分 (%)

種別	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	強熱減量
FA-II	58.9	21.0	6.1	3.7
FA-L	61.7	19.2	1.3	7.7
BFS	33.2	13.6	44.9	0.2

表-3 異形棒鋼の強度特性

種別	降伏強度	引張強度	静弾性係数
	MPa	MPa	GPa
D16	388	570	178
D19	384	570	186
D6	364	574	175

表-5 に OPC コンクリートの配(調)合表を示す。同コンクリートについては、GP コンクリートと同程度の目標圧縮強度を有する配(調)合を採用した。

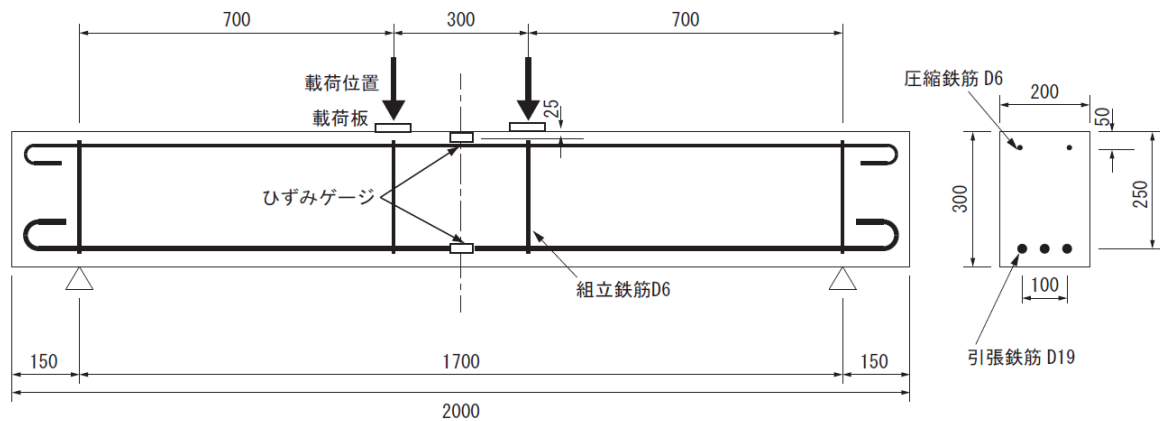
図-2 に、浜田らの研究⁶⁾を参考にした曲げせん断載荷試験供試体の構造一般図を示す。供試体は、幅 200mm × 高さ 300mm × 長さ 2000mm のはり形状とした。主鉄筋として D19 を 3 本、有効高さが 250mm となるように単

表-4 GP コンクリートの配(調)合

種別	GPS/P	BFS/P	GPS-A	GPS-B	FAII	FAL	BFS	S(GP)	G(GP)
	%		kg/m ³						
GPII-30	65	30	0	330	353	0	152	559	846
GPL-30	80	30	0	379	0	331	145	533	807
GPII-50	54	20	281	0	418	0	105	564	328

表-5 OPC コンクリートの配(調)合

種別	W/C	s/a	W	OPC	S1	S2	G1	M
	%		kg/m ³					
OPC-30	58	48	183	313	589	251	940	3.13
OPC-50	39	48	175	455	558	240	923	5.46



図－2 曲げせん断載荷試験用供試体の構造一般図（単位：mm）

段配筋した。圧縮鉄筋として D6 を 2 本配筋した。圧縮鉄筋を配筋するために、載荷点直下ならびに支点直上に組立鉄筋を配筋した。

2.3 GP コンクリートの練混ぜ、打設および養生

GP コンクリートの練混ぜには、供試体 1 体作製につき、容量 80L の強制二軸ミキサならびに 120L のパン型強制ミキサを併用した。練混ぜは、最初に粗骨材、細骨材、FA、BFS を入れて空練りを 30 秒間実施した後、GPS を入れて練混ぜを 1 分間実施した。練混ぜが十分行われていることを確認した後、バケットに排出した。練上り直後のコンクリートのスランプフローは、いずれも 480 ～600mm の範囲に収まっていることを確認した。

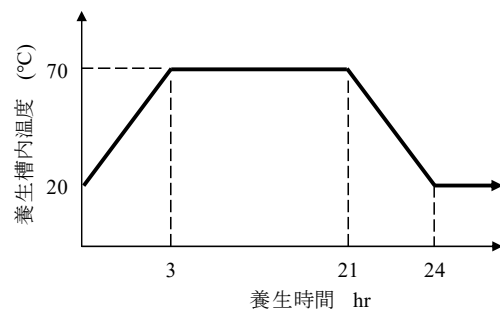
排出された GP コンクリートを高さ方向に 3 層に分けて充填し、各層につき 30 秒間、大型テーブルバイブレータを用いて加振した。コンクリートの充填完了後、3 時間の室温前置きを挟み、蒸気槽内で図－3 に示す加温履歴に従い養生した。

なお、開口部の大きい大型はりを作製した研究事例が稀少であったことから、複数の表面被覆方法を試行し、表面ひび割れの抑制効果を検討した。パラメータは、(1) 無塗布、(2) 湿布被覆、(3) 湿布+ポリエチレンラップ併用、(4) パラフィン系初期養生剤、(5) パラフィン系初期養生剤+ポリエチレンラップとし、GP コンクリートの可使用時間到達前後に各種被覆方法を試行した。その結果、(5) のパラフィン系初期養生剤の塗布後、ポリエチレンラップで被覆したケースにおいて、脱型時の表面ひび割れを最も低減できることを確認した。供試体種別間では、GPII シリーズと比較して GPL-30 のひび割れ本数が少なかった。

全ての供試体は、脱型後、曲げせん断載荷試験開始まで室内で気中静置とした。

2.4 はりの曲げせん断載荷試験

はりの曲げせん断載荷試験は、脱型後に生じる収縮挙動の影響を考慮して、収縮が収束する材齢 28 日以降に実施した。載荷方法は、図－2 に示す通り、載荷スパンを 300mm(載荷板幅 80mm)とする 2 点線載荷とし、載荷



図－3 加温養生時の温度履歴

開始から終局まで荷重を単調増加させた。計測内容は、支間中央のたわみ、支間中央側面の軸方向ひずみ、支間中央の主鉄筋ひずみ、側面のひび割れ観察とした。

同一種別の供試体数は、GPII-30、GPL-30、GPII-50 を各 4 体、OPC-30 を 3 体、OPC-50 を 2 体とした。

3. 曲げせん断載荷試験結果ならびに考察

3.1 荷重たわみ関係

図－4 に各供試体における荷重と支間中央のたわみとの関係を示す。ここで、供試体名における括弧内の数字は、各種別の供試体番号を示す。同図(a)より、GPII-30 では、各供試体でばらつきがあるものの、107～124kN まで荷重の増加にともないたわみも単調増加した。その後、斜めひび割れ発生とともに一旦 20kN 程度の荷重低下と 0.2～0.8mm のたわみ増加がみられた。GPII-30(2)以外の 3 体では再度荷重が増加し、GPII-30(1)、GPII-30 (4)では低下前の荷重を超過した。終局時におけるたわみの最大値は、GPII-30(4)の 6.6mm であった。同図(b)より、GPII-30 と同様に GPL-30 においても、103～120kN で一旦荷重が低下した。このときの荷重低下は 10kN 程度であるが、たわみ増加は 1.0～1.4mm を示した。全供試体で再度荷重が増加し、低下前の荷重を超過した。特に GPL-30(1)は、終局時に最大荷重 204kN とたわみ 13.1mm を示した。同図(c)より、GPII-50 では 160～166kN で一旦荷重低下するが、その後大幅な荷重の増加が見られ、全供試体で鉄

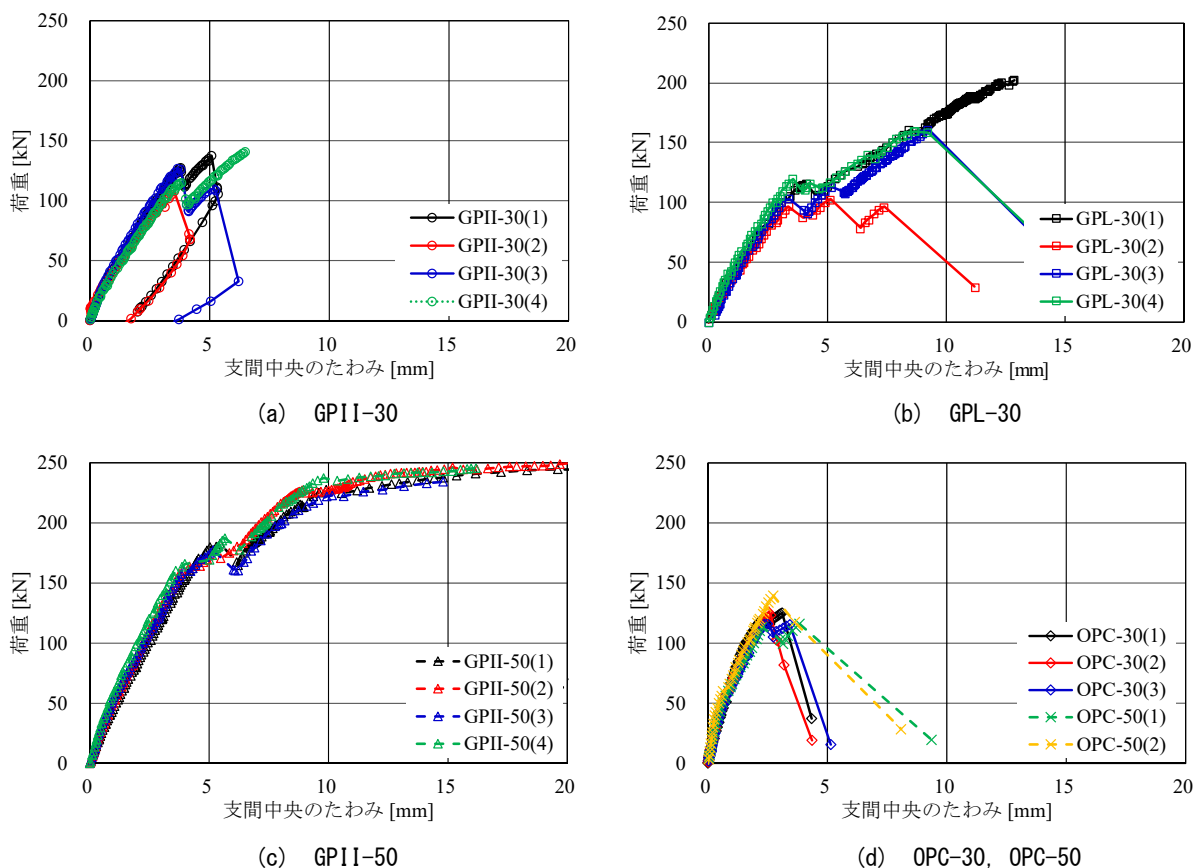


図-4 荷重－支間中央たわみの関係

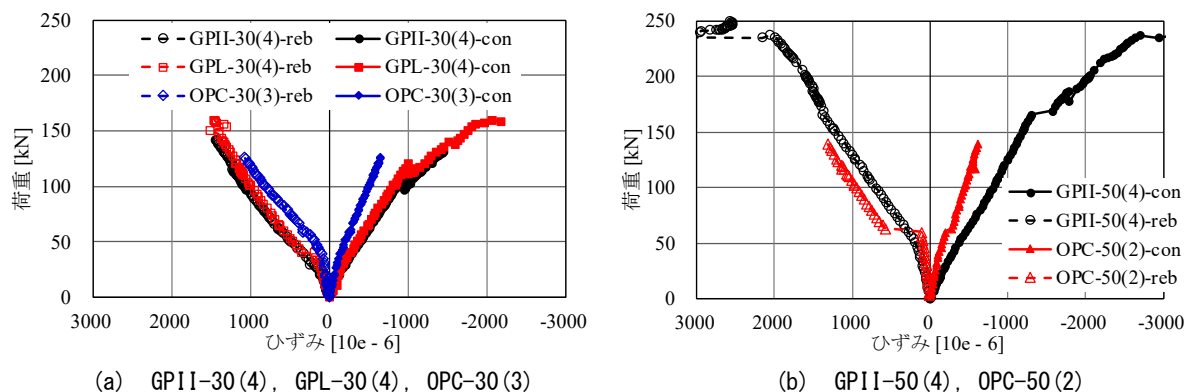


図-5 荷重－支間中央断面のひずみ関係(コンクリート上縁近傍、主鉄筋)

筋の降伏後に見られる靱性に富んだ挙動を示した。終局時には、いずれも荷重 234kN 以上、たわみ 14.8mm 以上を示した。同図(d)より、OPC-30、OPC-50 では、斜め引張りひび割れの発生時に荷重が大幅に低下、もしくは 15kN 程度の荷重低下の後に再度荷重増加を示すものの、低下前の荷重を超過せず終局状態に至った。終局時におけるたわみの最大値は OPC-50(1) の 3.9mm であった。

以上より、OPC-30、OPC-50 では斜め引張りひび割れの発生とともに荷重が大きく低下する傾向が見られた。一方、GPII-30、GPL-30、GPII-50 では、斜め引張りひび割れ発生時に荷重低下した後、再度荷重が増加する傾向が確認された。

3.2 コンクリート上縁近傍ならびに主鉄筋のひずみ

図-5 に、各種別の代表供試体における上縁近傍のコンクリートならびに主鉄筋のひずみと荷重の関係を示す。図中の con は圧縮縁近傍のコンクリートひずみを、reb は主鉄筋のひずみをそれぞれ示す。同図(a)より、目標強度を 30MPa とした GPII-30、GPL-30、OPC-30 では載荷開始から終局状態に至るまで概ね直線的なひずみの増加を示した。OPC-30 と比較すると、GPII-30 ならびに GPL-30 では、荷重の単位増加に対するひずみの増加量が多い。同図(b)より、目標強度を 50MPa とした OPC-50 については 60kN 前後でひずみが急増したが、その後、ひずみは再度直線的な増加を示した。一方、GPII-50 では、230kN

前後まで他種別と同様にひずみが直線的に増加していたが、その後、主鉄筋のひずみが急増し、降伏状態に至った。GP11-50では、全供試体で同様に降伏状態を示した。

3.3 ひび割れ状況

図-6に、各種別の代表供試体における終局状態のひび割れ図を示す。同図(a)より、GP11-30(4)では他種別と比較して斜め引張りひび割れとともに、多くの曲げひび割れがみとれる。斜め引張りひび割れについては、載荷点側に進展した1mm以上のひび割れの他に、圧縮側に配筋された軸方向鉄筋に沿って載荷点内側に進展しているものもみられる。同図(b)より、GPL-30(1)では、前述のGP11-30(4)と同様に、斜め引張りひび割れの一部分が圧縮側軸方向鉄筋付近から載荷点内側へと進展していることがわかる。GP11-30とGPL-30は同様のひび割れ進展性状を示した。一方、同図(c)より、OPC-30では、GPを用いたGP11-30(4)やGPL-30と比較して、斜め引張りひび割れが載荷点外側に向かって進展している。同図(d)、(e)より、GP11-50(2)とOPC-50(1)を比較すると、GP11-30、GPL-30とOPC-30と同様に、GPコンクリートとOPCコンクリートでひび割れ性状に相違がみられる。特に、GP11-50(2)では、全ての斜め引張りひび割れが載荷点内側へと進展している。

3.4 GPはりの曲げせん断特性の傾向

図-7に、OPC-50(1)とGP11-50(2)における斜めひび割れ発生過程を示す。斜め引張りひび割れについて、本論ではひび割れ発生部位でのひび割れと軸方向とのなす角をひび割れ角とした。ひび割れ角は、OPC-50で 47° 、 42° 、GP11-50で 37° 、 35° 、 41° 、 28° を示した。同一水準間でのひび割れの特徴は概ね同様であった。

同図(a)より、OPC-50(1)の場合、40kN前後で曲げひび割れが発生し始め、約0.1mmのひび割れが4本程度発生した後に、片側で斜め引張りひび割れが発生し、直ちに載荷点外側まで到達した。これにより、部材が分断され、終局状態に至った。一方、同図(b)より、GP11-50(2)の場合、30~40kNで曲げひび割れが発生し、0.05mmのひび割れが5本程度発生した後に、片側で斜め引張りひび割れが発生した。同ひび割れについては、ひび割れ角がOPCと比較して相対的に小さい傾向が見られた。同ひび割れの進展は圧縮側に配筋された軸方向鉄筋付近で一旦停止した。このとき、OPC-50(1)と異なり、斜め引張りひび割れにより圧縮縁周辺のコンクリートが分断されることなく連続していることを確認した。荷重の再増加に従って、上縁コンクリートの圧壊もしくは斜め引張りひび割れの再進展により、上縁にひび割れが到達し終局状態に至った。

3.5 耐力評価

表-6に、各供試体における耐力結果等一覧を示す。曲げ耐力ならびにせん断耐力は、土木学会コンクリート標準示方書[設計編]⁹⁾に準じて算出した。部材係数は1と

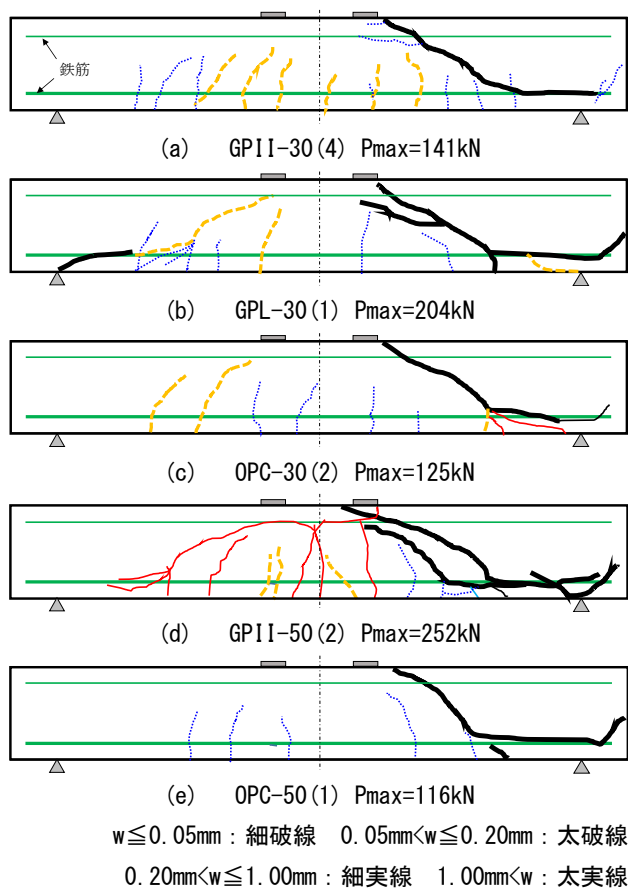


図-6 終局状態におけるひび割れ状況

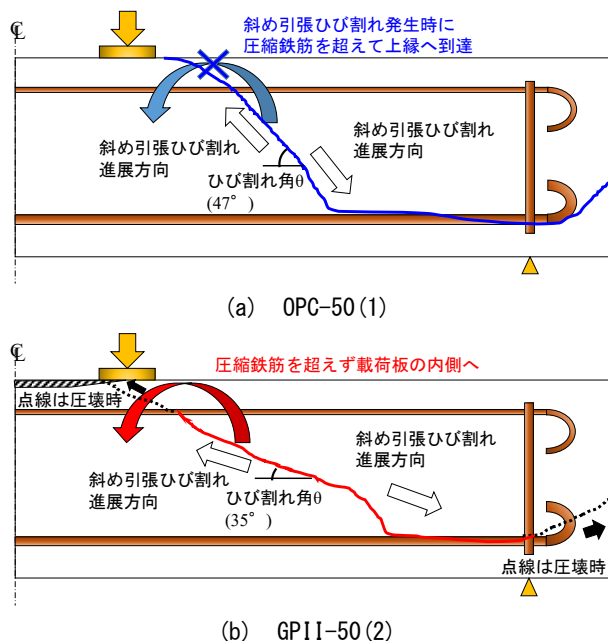


図-7 斜め引張りひび割れ発生後の進展状況

した。GPの曲げ耐力については、静弾性係数が小さいことから $\epsilon = 0.0035$ とみなさず、終局状態即ち等価応力ブロック法を適用可能な応力状態であると仮定して算出した。同表より、GPL-30ならびにGP11-50では、193~236kNで鉄筋の降伏が確認された。OPC-30ならびにOPC-50では、斜め引張りひび割れ発生荷重と最大荷重が概ね一致するとともに、せん断耐力の計算値に対して概ね1以上と

表-6 各供試体の耐荷力評価一覧

種別	No.	圧縮強度 f_c (MPa)	静弾性係数 E_c (GPa)	主鉄筋降伏荷重 P_y (kN)	斜め引張ひび割れ発生荷重 P_{sc} (kN)	最大荷重 P_{max} (kN)	せん断耐力計算値 P_{cal} (kN)	P_{sc}/P_{cal}	P_{max}/P_{cal}	曲げ耐力計算値 P_u (kN)
GPII -30	1	34.9	16.2	-	124	137	111	1.12	1.23	210
	2	34.7	17.0	-	107	107	111	0.96	0.96	209
	3	34.1	14.1	-	126	125	110	1.15	1.14	209
	4	31.6	15.0	-	114	141	107	1.07	1.32	207
GPL -30	1	25.7	11.4	193	104	204	96	1.08	2.13	196
	2	22.8	10.1	195	103	103	100	1.03	1.03	200
	3	26.0	11.3	195	103	158	100	1.03	1.58	201
	4	25.9	11.0	195	120	160	100	1.20	1.60	200
OPC -30	1	30.0	30.0	-	120	125	105	1.14	1.19	205
	2	30.0	30.0	-	122	125	105	1.16	1.19	205
	3	30.0	30.0	-	115	115	105	1.10	1.10	205
GPII -50	1	50.3	23.2	228	160	247	125	1.28	1.98	218
	2	47.3	23.1	227	164	252	123	1.33	2.05	216
	3	59.9	24.6	234	160	234	133	1.20	1.76	220
	4	58.3	23.4	236	166	255	131	1.27	1.95	220
OPC -50	1	62.3	37.4	-	113	116	132	0.86	0.88	220
	2	62.3	37.4	-	139	139	132	1.05	1.05	220

※無着色細字セルの供試体は主鉄筋降伏前にせん断破壊、着色細字セルの供試体は主鉄筋降伏後にせん断破壊
着色太字セルの供試体は曲げ引張破壊直後にせん断破壊も併発

なった。GPII-30, GPL-30, GPII-50 では、斜め引張ひび割れ発生荷重よりも最大荷重が大きい。これらは、最大荷重はもとより斜め引張ひび割れ発生荷重においてもせん断耐力の計算値を上回っている。GPII-50(1), (2), (4)では、最大荷重が曲げ耐力の計算値を上回った。同供試体では、主鉄筋降伏後、上縁コンクリートの圧壊が認められたことから、曲げ引張破壊したことが確認された。但し、直後に圧壊部のひび割れと斜め引張ひび割れがつながり、せん断破壊も生じた。

せん断耐力評価においては、せん断スパン比を考慮した二羽の棒部材式をはじめ複数の算定式による適用性について検討する方針である。

4. まとめ

本研究では、ジオポリマーを用いた RC はりの曲げせん断特性ならびに耐荷力の評価について実験検討した。本研究条件下において得られた知見を示す。

- (1) ジオポリマーコンクリートはりは、斜め引張ひび割れ発生後に明らかな荷重増加を示すケースがあった。
- (2) 圧縮強度が約 50MPa の場合、ジオポリマーコンクリートはりに発生する斜め引張ひび割れは普通コンクリートはりよりもひび割れ角が小さい傾向にあった。
- (3) 圧縮強度が約 50MPa の場合、ジオポリマーコンクリートはりの斜め引張ひび割れは直ちに上縁まで到達せず、圧縮縁周辺のコンクリートが連続しているこ

とで継続して荷重に抵抗するケースがあった。

- (4) コンクリート標準示方書[設計編]のせん断耐力式に基き部材係数を 1 とした計算値に対し、ジオポリマーコンクリートはりの実験値は概ね 1 以上を示した。

【謝辞】

本研究の一部は、科学研究費助成事業(課題番号：16K06441)の助成をもとに実施しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) John L.Provis, et al: Geopolymers Structure, processing, properties and industrial applications, CRC Press, 2011
- 2) 建設分野におけるジオポリマーの適用に関する研究委員会中間報告書、日本コンクリート工学会、2016
- 3) Norio, Y., et al: Preparation of geopolymeric materials from sewage sludge slag with special emphasis the matrix compositions, Journal of the Ceramic Society of Japan, 118[2], pp.107-112, 2010
- 4) 南浩輔ら：ジオポリマー硬化体の物性と構造利用に関する基礎的研究、前田技術研究所報, Vol.53, 2012
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編], 2012
- 6) 浜田秀則ら：酒田港および鹿児島港に暴露しコンクリート梁の耐海水性、港湾技研資料, No.614, 1988