

論文

[2176] 連続繊維補強材を用いた連続はりのモーメント再分配に関する実験的研究

手塚正道^{*1}・落合勝^{*2}・鳥取誠一^{*3}・佐藤良一^{*4}

1. まえがき

適切に設計された不静定コンクリート構造物では、終局に至る過程において、ひび割れによる部材剛性の低下、および鋼材の降伏に伴う塑性ヒンジの形成により、曲げモーメントの再分配が起こる。このことが構造物の終局耐力に大きな影響を与えることになる。

これに対し、連続繊維補強材（以下、FRP補強材という）を用いた不静定コンクリート構造物の設計では、FRP補強材が塑性域のない弾性体であるため、ひび割れの発生による部材の剛性低下の影響は考慮するが、塑性変形による再分配は考慮しない考え方が示されている¹⁾。繊維破断型曲げ破壊の場合には、上記の考え方が適切であると考えられる。しかし、曲げ圧縮破壊の場合には、コンクリートの塑性変形が曲げモーメントの再分配に影響を与えることも想定される。これまで、これらの点に関する研究も行われているが^{2),3)}、定量的な評価を得るには至っていない。

そこで、本研究では曲げ圧縮破壊が想定される二径間連続はりを対象として、FRP補強材のヤング係数、プレストレス量等が再分配挙動にどのように影響するかを実験的に検討することとした。

2. 実験および非線形解析の概要

供試体は、全て同一断面形状としている。用いるFRP補強材は、アラミド繊維によるFRP（以下、AFRPという）および炭素繊維によるFRP（以下、CFRPという）とし、それぞれについてRCおよびPC部材を設定した。

表-1 供試体一覧表

No.	種別	補強材構成	補強材 緊張力 (kgf)	プレストレス (kgf/cm ²)	コンクリート 強度 (kgf/cm ²)	曲げ破壊 モーメント Mu (tm)
1	RC-AF	4-AFRP-φ9	0	0	414	1.62
2	PC-AF	4-AFRP-φ9	5,000	73	416	1.97
3	RC-CF	4-CFRP-φ10.5	0	0	408	2.08
4	PC-CF	4-CFRP-φ10.5	5,500	83	480	2.26
5	PC-SW	4-SWPR7A-φ9.3	5,000	75	416	2.13

また、比較のためにPC鋼より線によるPC部材を加えて計5体で構成している。供試体の一覧表を表-1に、形状および配筋状況を図-1に示す。表中の曲げ破壊モーメントは、コンクリート強度を400kgf/cm²

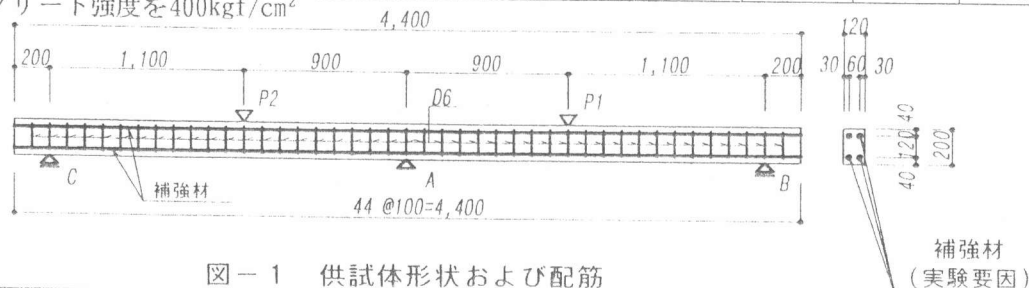


図-1 供試体形状および配筋

*1 オリエンタル建設（株）技術研究所主任研究員（正会員）

*2 オリエンタル建設（株）技術研究所研究員

*3 （財）鉄道総合技術研究所コンクリート構造研究室主任研究員（正会員）

*4 宇都宮大学助教授 工学部建設工学科、工博（正会員）

とし、有効プレストレスを用いて計算した値を示す。P C部材のプレストレス導入はプレテンション方式としている。本実験で用いたFRP補強材は、AFRPでは組み紐状に、CFRPではより線状に成形加工されたものである。その力学特性を表-2に示す。P C部材での補強材緊張力としては、メーカーが保証する引張荷重の約5割とした。コンクリートは、粗骨材の最大寸法を20mmとし、目標強度を400kgf/cm²に設定した。

荷重は、図-2に示すように中間支点对称2点荷重とし、中間支点における圧壊の先行を想定している。本載荷の特徴は、両端支点到荷重計を配置して3支点反力を個別に測定した点と、中間支点では高さ調整して3支点の平面性を保持するようにした点である。計測項目を図-2に示す。

本研究において、実験結果との比較に用いた非線形解析手法の概要を図-3に示す。解析モデルは、荷重が中間支点对称であるので、中間支点を固定とした図に示すモデルを想定した⁴⁾。この解析の特徴は、次のような点である。

(1) 支点反力および曲げモーメントを決定する判定基準は、変形における支点の境界条件とした。

(2) 断面のひずみ分布は、平面保持を仮定した。

(3) 材料の応力・ひずみ曲線の非線形性を取り入れて変形の計算を行うために、曲げモーメント・曲率曲線（M-φ曲線）を用いる。この時に、コンクリートの限界引張ひずみは、 $\epsilon_c = -0.0001$ と仮定した。また、本実験は、主として終局状態の再分配を対象としているので、コンクリートのテンションステ

表-2 補強材の力学的特性

補強材の種類	公称径 (mm)	有効断面積 (mm ²)	引張荷重 (kgf)	ヤング係数 (kgf/mm ²)	伸び率 (%)
AFRP-φ9	9	63	9,600	7,000	2.17
CFRP-φ10.5	10.5	55.7	10,600	14,000	1.36
SWPR7A-φ9.3	9.3	51.6	9,050	19,700	6.5

(FRPの引張荷重はメーカー保証値を示す。)

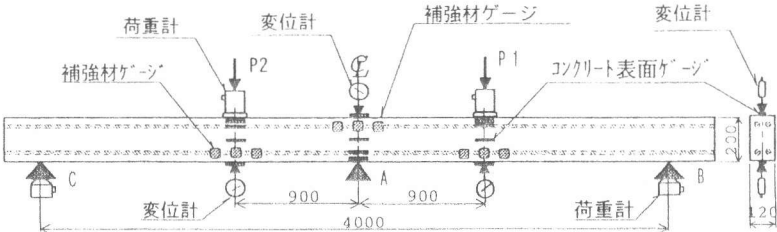


図-2 計測項目

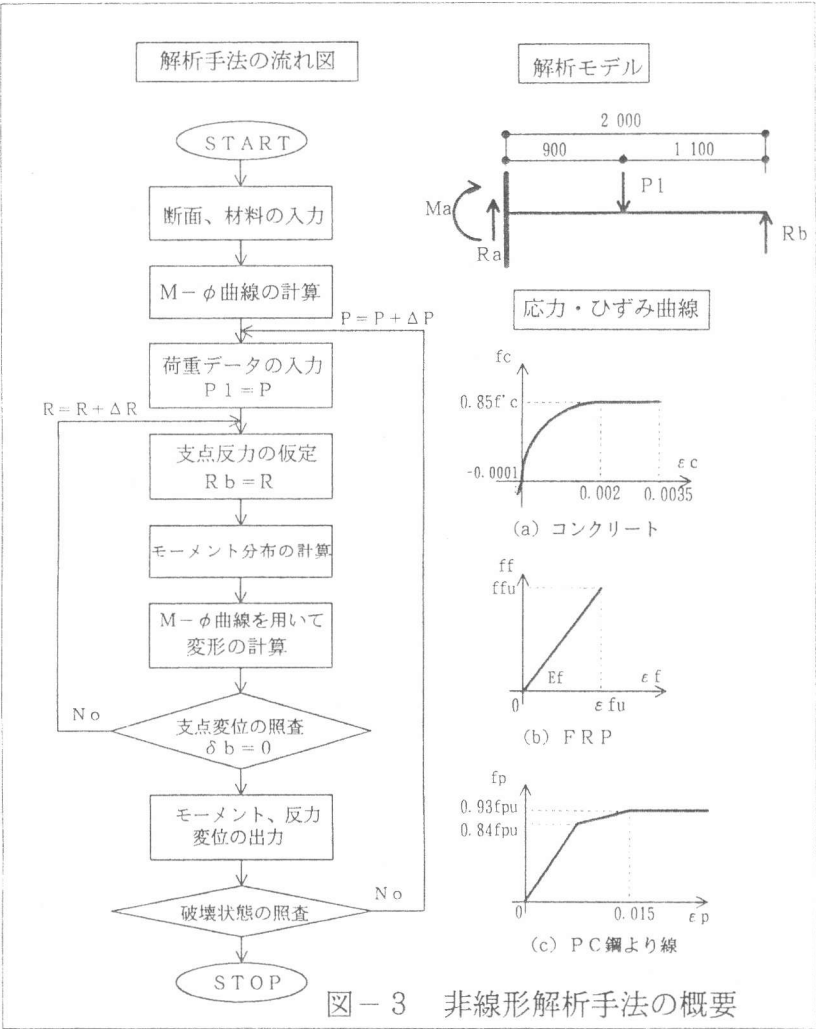


図-3 非線形解析手法の概要

ィフニングの影響を無視した。

(4) 変形の計算は、スパン方向に200分割した部材において、各部材に作用する曲げモーメントから各部材の曲率を求め、固定端より各部材変形を順次加算する方法とした。

3. 実験結果および考察

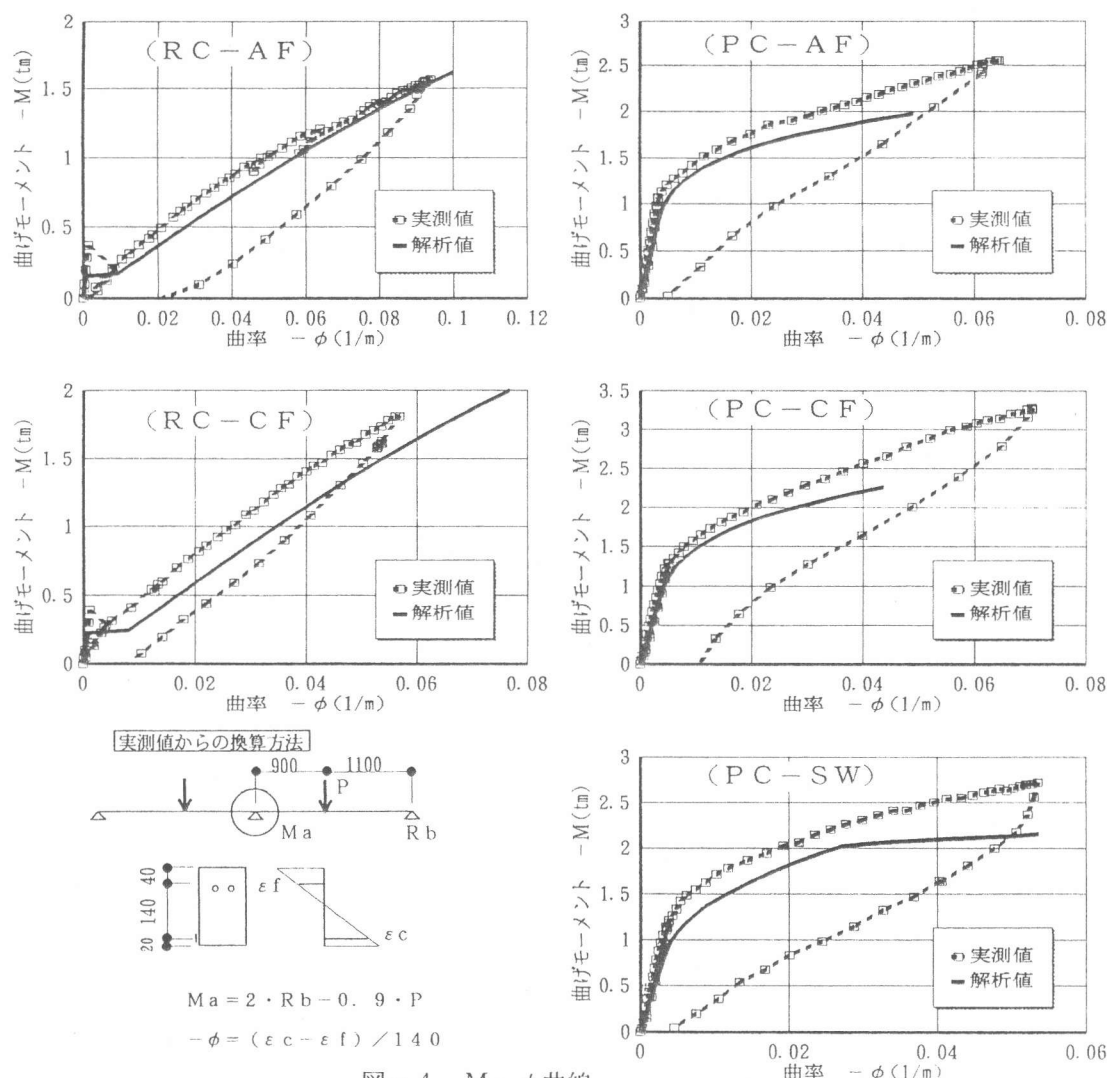
3. 1 M- ϕ 曲線

本研究の非線形解析において最も精度に影響があるM- ϕ 曲線の計算結果について、実測された支点反力とひずみ分布から得られた実験値との比較を図-4に示す。対象としたひずみ測定位置は、中間支点における上縁側補強材ひずみと下縁側コンクリートひずみである。

この図によると、計算値は実験値に比べ同一モーメントに対して曲率は大きい傾向を示している。

PC-AF, PC-CF供試体では、ひび割れ発生後の第二勾配で計算値と実験値に相違が見られるが、これは、ひび割れが中間支点から4cm程度離れた位置に発生し、ひずみ分布の測定位置と異なったことによって実験値が過小評価されたことによるものと考えられる。

実験値における終局状態では、曲率は中間支点が圧壊を開始した後も、その前の状態と傾きの変化は小さく、部材剛性の大きな低下は見られていない。



M- ϕ 曲線に用いた中間支点における補強材とコンクリートの実測ひずみの履歴を図-5に示す。この図によると、PC部材のコンクリートの圧縮限界ひずみは、 $\epsilon'_{cu}=0.0040$ を超えるものであり、計算で仮定した圧縮限界ひずみ ($\epsilon'_{cu}=0.0035$) より大きい値であった。

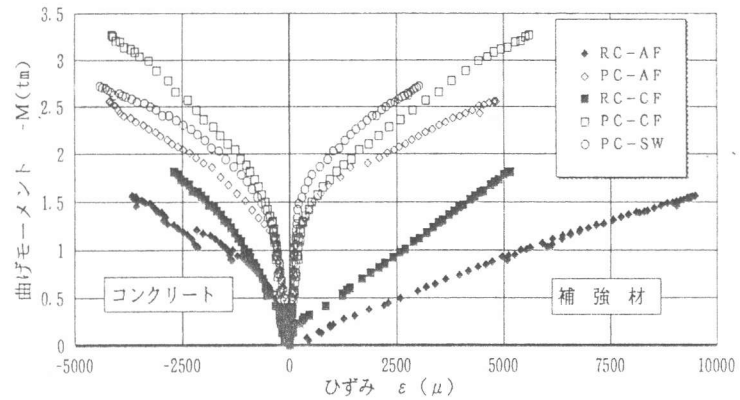


図-5 曲げモーメント-ひずみの関係

3. 2 曲げモーメントの再分配

終局状態における曲げモーメントの再分配に関する実験結果を表-3に示す。この表には、非線形解析による中間支点におけるコンクリートが圧縮限界ひずみに達した時点のモーメント再分配の結果を合わせて示す。また、荷重と中間支点および載荷点におけるモーメント再分配の関係を図-6に示す。この図のX軸は、弾性解で求めた曲げモーメントを1.0とした場合の比率を表す。

この図から、実験結果は全ての供試体において、荷重の増加に対して、中間支点ではモーメントの比率が弾性解に対して小さくなり、載荷点ではモーメントの比率が大きくなる傾向を示し、モーメントの再分配が生じているのがわかる。定量的には、表-3によると、中間支点において、PC部材で-11%、RC部材で-14~ -30%、載荷点において、PC部材で8%、RC部材で10~ 23%程度であった。

RC部材では、解析値に比べ実験値が大きなモーメントの再分配が見られる。これは、解析では曲げモーメントによる部材剛性の変化を考えているが、本実験のRC部材は、せん断補強筋が少なかったため、中間支点上に発生する曲げひび割れに比べ、その両側に発生するせん断ひび割れが大きくなり、中間支点と載荷点との剛比が大きく変化したことが、モーメントの再分配につながったものと思われる。図-7に RC-AF供試体における終局状態のひび割れ状況を示す。

これに対して、PC部材では、解析値と実験値が比較的良く一致した。これは、プレストレスがせん断ひび割れを抑制し、曲げひび割れが卓越したことによって、計算の仮定と一致したことによるものと考えられる。しかしながら、本解析では部材の破壊段階までは評価できておらず、今後、コンクリートの応力-ひずみ関係を含めさらに検討する必要がある。

PC部材の実験値は、終局に至る過程において、モーメントの再分配の比率は徐々に増加しており

表-3 実験結果および解析結果

No.	種 別	実 験 結 果							非 線 形 解 析 結 果						
		最大 耐力 (tf)	中間支点曲げモーメント Ma (tm)			載荷点曲げモーメント Mp (tm)			中間支点 破 壊 荷 重 (tf)	中間支点曲げモーメント Ma (tm)			載荷点曲げモーメント Mp (tm)		
			実測値	弾 性 計算値	再分配率 (%)	実測値	弾 性 計算値	再分配率 (%)		非線形 解析値	弾 性 計算値	再分配率 (%)	非線形 解析値	弾 性 計算値	再分配率 (%)
1	RC-AF	4.78	-1.58	-1.84	-14.1	1.50	1.36	10.3	4.23	-1.61	-1.62	-0.6	1.21	1.20	0.8
2	PC-AF	7.44	-2.54	-2.86	-11.2	2.29	2.11	8.5	5.69	-1.97	-2.18	-9.6	1.72	1.61	6.8
3	RC-CF	5.79	-1.56	-2.22	-29.7	2.01	1.64	22.6	5.50	-2.09	-2.11	-0.9	1.57	1.56	0.6
4	PC-CF	9.29	-3.17	-3.57	-11.2	2.86	2.64	8.3	6.46	-2.26	-2.47	-8.5	1.95	1.83	6.6
5	PC-SW	7.91	-2.72	-3.04	-10.5	2.42	2.25	7.6	6.04	-2.12	-2.31	-8.2	1.81	1.71	5.8

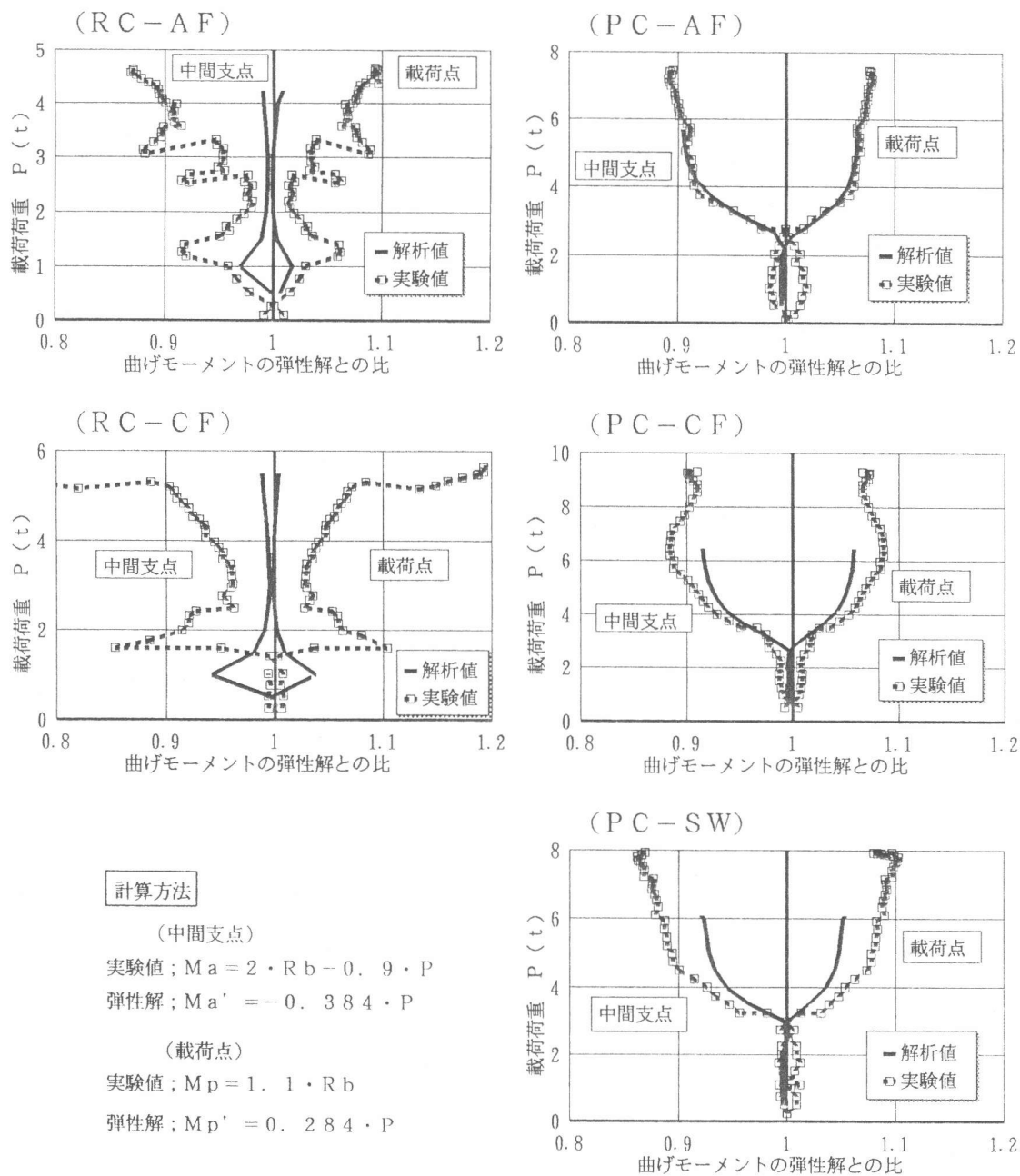


図-6 荷重-モーメント再分配の関係

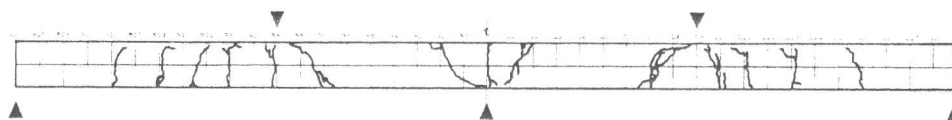


図-7 ひび割れ状況 (RC-AF供試体)

特に大きなモーメントの再分配は起きていない。これは、 $M-\phi$ 曲線実験値における終局時の曲率の変化状況からも推測できる現象である。FRP補強材を用いた場合には、このように鋼材を補強材として用いた場合と異なり、鋼材の降伏に伴うような大きな部材剛性の変化は無いものと思われる。

ここで用いた非線形解析が適用できる条件としては、せん断ひび割れの影響がでないように、せん断補強を行った部材であることが必要である。さらに、解析精度を上げるためには、終局時の $M-\phi$

曲線の適切な設定、およびテンションスティフニングの影響を考慮することが必要であると思われる。

本研究で用いた非線形解析で、AFRPの補強材量の違いについて、シュミレーションした結果を図-8に示す。この図のY軸は、解析による中間支点におけるコンクリートが圧縮限界ひずみに達した点の荷重(P_u)との比を表している。この結果によると、RC部材では、終局時においてモーメントの再分配はわずかである。PC部材では、終局に至る過程において違いはあるものの、補強材量を本実験に用いた供試体の3倍配置したもの($p_w=1.97\%$)を除いて、終局時ではほぼ一定の値に収れんしている。

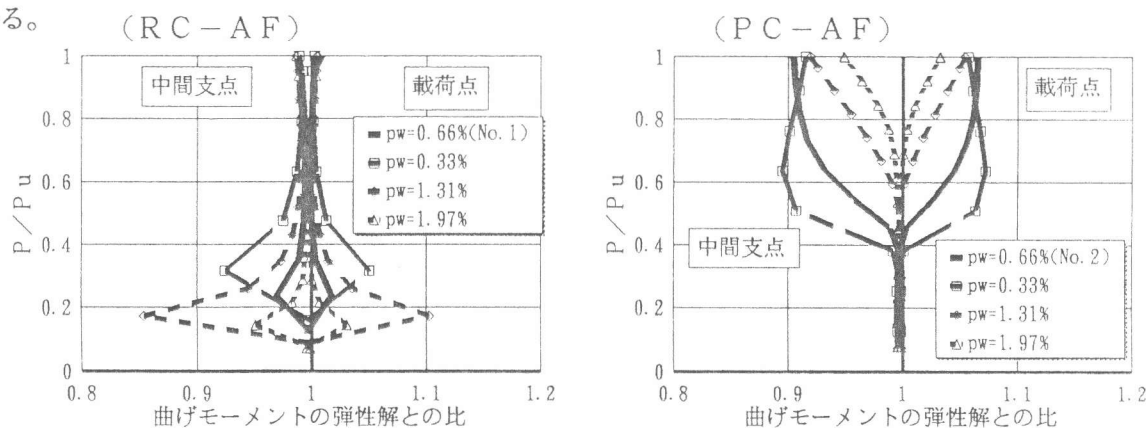


図-8 モーメント再分配の補強材量による影響

4. まとめ

本研究で得られた結果は、次の通りである。

- (1) FRP補強材を用いたPC部材において、通常の設計で用いるコンクリートの応力-ひずみ関係を用いて、曲げモーメントの再分配挙動を解析した結果と実験結果は、ある載荷段階までは比較的良く一致した。しかしながら、部材の破壊段階までは評価できず、今後、コンクリートの応力-ひずみ関係を含めさらに詳細な検討の必要性が認められた。

実験結果からは、FRP補強材のヤング係数の影響はなく、中間支点において、-11 %の曲げモーメントの再分配が生じた。この場合の終局に至る挙動は、鋼材を補強材として用いた場合と異なり、大きな部材剛性の変化はなかった。

- (2) FRP補強材を用いたRC部材では、せん断ひび割れの影響により、解析結果と実験結果は大きく相違した。せん断ひび割れが生じる場合には、この影響を考慮して曲げモーメントの再分配挙動を検討することの必要性が認められた。

[謝辞]

本実験に用いたFRP補強材に関して、材料の提供および適切な助言をして頂いた神鋼鋼線工業(株)および東京製綱(株)に感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 土木学会：連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用、コンクリートライブラリー72、1992.4
- 2) 高橋義裕ほか：FRPロッドを用いたPC不静定梁の断面力に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15, No. 2, pp. 289-292, 1993
- 3) 細井良二ほか：FRPで補強したRC連続はりのモーメントの再分配について、土木学会第48回年次学術講演会、V-157, pp. 340-341, 1993.5
- 4) 豊福俊泰ほか：コンクリート構造物の非線形解析による曲げ耐力の算定法に関する研究、プレストレストコンクリート、Vol. 31, No. 5, pp. 15-24, Sept. 1989