

## 高強度コンクリートを用いたPRC梁の挙動に及ぼす膨張材の影響

日本大学工学部 正会員 工博 ○柳沼 善明

日本大学大学院理工学研究科 井川 貴裕

中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京(株) 正会員 工修 井口 淳

Abstract : This study investigated the influence of expansive admixture on shear behavior of externally prestressed reinforced concrete (PRC) beams and reinforced concrete (RC) beams using high-strength concrete. Beams with and without expansive admixture were named Type EX and N, respectively. Compressive strength of concrete was 130 N/mm<sup>2</sup>.

The diagonal cracking load,  $P_{dia}$ , of RC beam of Type EX was similar to that of Type N, the ultimate strength,  $P_{max}$ , of RC beam of Type EX was larger than that of Type N.  $P_{dia}$  and  $P_{max}$  of PRC beam of Type EX were larger than those of Type N. Furthermore, shear behavior of the beams were analyzed by the nonlinear FEM, and damage of bond stress of main reinforcements and shrinkage of concrete were set in this program. On the shear strength and deflection behavior, those analyzed results well agreed with those tested results.

Key words : High-strength concrete, Shrinkage, Shear strength, Deflection behavior

## 1. はじめに

近年、セメントや混和剤の高性能化により設計基準強度が 100N/mm<sup>2</sup> 以上の高強度コンクリートを用いた構造物が建設されている。コンクリートの高強度化は、橋梁の長大化や建物の高層化などの利点があり、さらにはコンクリートが密実になるため高耐久性が期待できる。しかし、高強度コンクリートは収縮量が大きくなるなどの現象が指摘されている。収縮量を低減させるために、膨張材などが使用されている。

高強度コンクリートの強度特性は、圧縮強度の増加割合に比例して引張強度などが増加しない。このため、高強度コンクリートを用いた部材の破壊性状などは十分に解明されていず、特にせん断挙動に関しては不明な点が多い。さらに収縮量が斜めひび割れ発生耐力に影響を及ぼすという研究<sup>1)</sup>もある。そこで、本研究は、高強度コンクリートを用いた外ケーブル方式 PRC 梁の荷重実験を行い、せん断挙動に及ぼす膨張材の有無により生じる収縮ひずみの影響を検討するものである。さらに、せん断挙動について非線形 FEM 解析を行い、収縮ひずみによるコンクリートと主鉄筋との間の付着劣化の影響を明らかにするものである。

## 2. 実験概要

実験に用いた供試体は表-1のように2種類のシリーズに大別される。シリーズ R は、スターラップのない供試体で、外ケーブルを配置しない RC 梁 (100x200x1800 mm) である。シリーズ P は、スターラップのない外ケーブル方式 PRC 梁である。シリーズ R と P はともにせん断挙動に及ぼす収縮ひずみの影響を明確にするため、膨張材を混入しないタイプ N と混入したタイプ EX の2種類の梁をそれぞれ作製した。膨張材の量は 30kg/m<sup>3</sup> であった。供試体の形状を図-1に示す。鉄筋は、下縁側に D16 を2本、上縁側に  $\phi 6$  を2本配置した。外ケーブルとして

表-1 供試体の種類

シリーズ	タイプ	供試体名	W/C (%)	導入力 (kN)	膨張材
R	N	RN	16.5	-	無
	EX	REX			有
P	N	PN	16.5	50	無
	EX	PEX			有

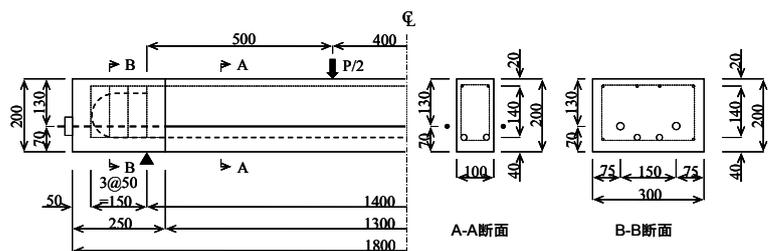


図-1 供試体の形状 (シリーズ P)

φ11 の PC 鋼棒を2本用い、プレストレス力の導入量は 50kN であった。載荷実験は対称 2 点載荷で、変位制御 (0.2mm/分) により荷重を静的に載荷した。コンクリートのクリープや乾燥収縮、および PC 鋼材のリラクセーションの影響を極力少なくするために、プレストレス導入後直ちに載荷実験を実施した。載荷実験では、載荷荷重、PC 鋼棒の緊張量、スパン中央のたわみ、コンクリートならびに鉄筋のひずみを計測した。コンクリートの強度試験用供試体は円柱供試体 (φ100x200mm) で、梁と同時に作製した。それぞれの養生は、打設後約 2 週間は散水し、その後実験室内に放置した気中養生であった。コンクリートの強度試験は梁の載荷時に実施した。さらにタイプ N とタイプ EX の無筋コンクリート供試体 (100x100x400mm) は梁と同時に作製し、コンクリートの収縮ひずみを計測した。

3. 実験結果

3. 1 無筋コンクリート供試体とRC梁供試体の収縮

無筋コンクリート供試体のコンクリートの収縮ひずみは、供試体の中心で断面の中央に設置した埋め込み型ひずみゲージにより計測した。RC梁供試体 (シリーズR) の鉄筋の収縮ひずみは、主鉄筋と圧縮鉄筋とに貼付したひずみゲージにより計測した。無筋コンクリート供試体の収縮ひずみを図-2 に示す。図-2 から、日数の経過にともない収縮ひずみが増加し、梁供試体の載荷直前の収縮ひずみは、タイプEXで約-156μ, タイプNで約-232μ であり、膨張材を混入したタイプEXの収縮ひずみは混入しないタイプNの約0.67倍で、膨張材の有無による違いが表れている。

次に、RC梁供試体 (シリーズR) の主鉄筋のひずみを図-3 に示す。図-3 から主鉄筋の収縮ひずみはばらつきが大きい、無筋コンクリート供試体と同様に日数の経過とともに収縮ひずみが増加し、RC梁載荷直前における主鉄筋の収縮ひずみは、REXで約-170μ, RNで約-240μ で、タイプEXの主鉄筋の収縮ひずみはタイプNの約0.71倍であった。図-3 で、経過日数が30日前後で収縮ひずみが小さくなっているのは、実験室内の湿度が上昇したのと、載荷準備のため梁を動かしたためと思われる。

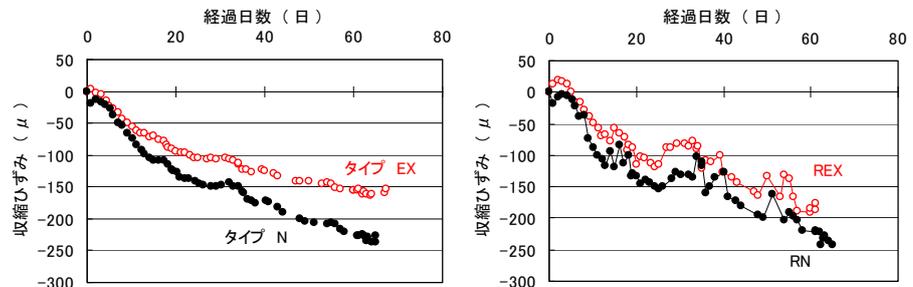


図-2 無筋コンクリート供試体の収縮ひずみ 図-3 RC 梁供試体 (シリーズ R) の主鉄筋のひずみ

図-2 から、日数の経過にともない収縮ひずみが増加し、RC梁載荷直前における主鉄筋の収縮ひずみは、REXで約-170μ, RNで約-240μ で、タイプEXの主鉄筋の収縮ひずみはタイプNの約0.71倍であった。図-3 で、経過日数が30日前後で収縮ひずみが小さくなっているのは、実験室内の湿度が上昇したのと、載荷準備のため梁を動かしたためと思われる。

3. 2 材料強度と梁供試体の実験結果

梁載荷時のコンクリートの力学的性質を表-2 に示す。ここに、 $f_c'$  は圧縮強度、 $f_t$  は引張強度、 $\epsilon_{cy}'$  は圧縮強度時の圧縮ひずみである。タイプNとEXはコンクリートの圧縮強度がほぼ同値であるが、タイプNはタイプEXと比較して $f_c' / f_t$ が大きく、より脆性的な破壊となっている (表-2 参照)。使用した鋼材の力学的性質を表-3 に示す。

表-2 コンクリートの力学的性質

タイプ	$f_c'$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon_{cy}'$ (μ)	ポアソン比	$f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_c' / f_t$
N	129	57	2480	0.24	4.4	29.3
EX	130	55	2560	0.24	5.8	22.4

表-3 鋼材の力学的性質

種類	呼び名	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
鉄筋	D16	359	519	188	21
	φ6	504	561	201	17
PC鋼棒	φ11	1231	1283	200	12

表-4 供試体の実験結果

シリーズ	供試体名	$f_c'$ (N/mm <sup>2</sup> )	導入量 (kN)	$P_c$ (kN)	$P_{dia}$ (kN)	$P_{max}$ (kN)	破壊形式
R	RN	129	-	12.3	55.5	55.8	斜め引張破壊
	REX	130	-	20.8	55.7	98.1	曲げせん断圧縮破壊
P	PN	129	50.8	31.5	65.8	133.5	曲げせん断圧縮破壊
	PEX	130	52.2	40.3	80.9	153.8	曲げせん断圧縮破壊

梁供試体の載荷実験結果を表-4 に示す。ここに、 $P_c$  はひび割れ発生荷重、 $P_{dia}$  は斜めひび割れ発生荷重、 $P_{max}$  は最大荷重である。梁の破壊形式は、シリーズRでは、膨張材を混入しないRNは斜め引張破壊で、膨張材を混入したREXは

主鉄筋が降伏した後の曲げ破壊とせん断圧縮破壊との複合した破壊で、ここでは曲げせん断圧縮破壊と呼ぶ。シリーズPでは膨張材の有無によらず、PNとPEXはともに主鉄筋が降伏した後の曲げせん断圧縮破壊であった。

### 3. 3 変形性状とひび割れ状況

梁の変形性状を図-4に示す。図中の縦軸はせん断力 $V$  (すなわち $P/2$ ) で表示している。図-4 (a) のシリーズRのRC梁において、タイプNのRNでは、初期ひび割れが入ると梁の曲げ剛性が低下してたわみが大きくなり、 $V$ が約25.3kNで主

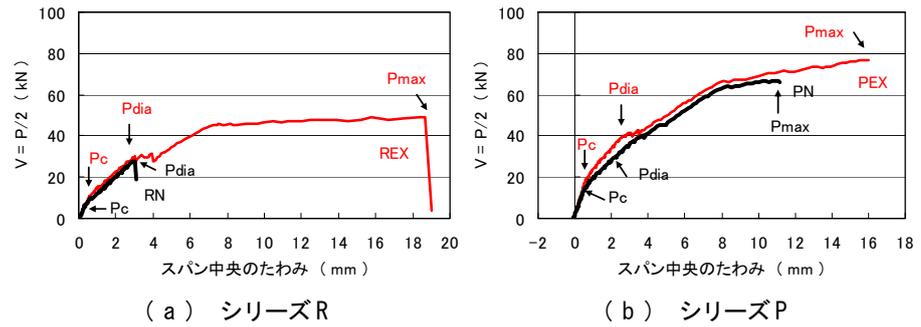


図-4 変形性状

鉄筋に沿ったひび割れ (長さ約15mm) が荷重点間に生じ、 $V$ が約27.7kNで斜めひび割れが発生し、同時に斜めひび割れの下部で主鉄筋位置付近に支点に向かうひび割れ (長さ約40mm) が発生した。その後荷重をわずかに増加させると、約27.9kNで斜めひび割れが荷重点と支点とに進展し荷重が急激に低下して斜め引張破壊した。破壊後のひび割れ状況は図-5 (a) のようである。一方、膨張材を混入したタイプEXのREXでは、 $V$ が約27.8kNで斜めひび割れが発生するまでの変形性状はタイプNと同様な傾向を示し、その後荷重を増加させたが荷重の値が大きくなり斜めひび割れの進展や新たに斜めひび割れが発生して、たわみが増加した。さらに荷重を増加させると主鉄筋が降伏し、さらに荷重を増加させると大きくたわんで上縁コンクリートが圧壊して曲げせん断圧縮破壊した (図-5 (b) 参照)。

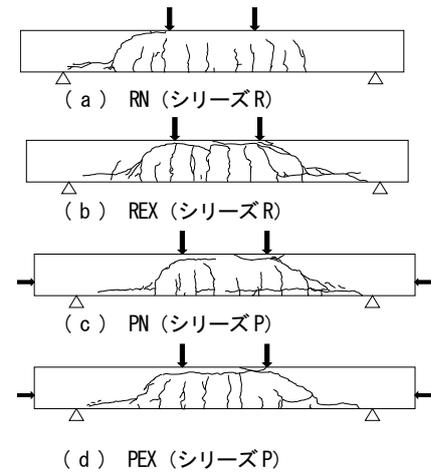


図-5 破壊後のひび割れ状況

次に、図-4 (b) のシリーズP (PRC梁) のPNでは、初期ひび割れ発生後、 $V$ が約27.9kNで主鉄筋に沿ったひび割れ (長さ約15mm) が荷重点位置から支点側に約100mm離れた付近に生じ、 $V$ が約32.9kNで斜めひび割れが発生した。さらに荷重を増加させると上部コンクリートと主鉄筋ならびに外ケーブルとでタイドアーチ的な耐荷機構を形成し、さらに大きな荷重に耐えて主鉄筋の降伏後に曲げせん断圧縮破壊した (図-5 (c) 参照)。膨張材を混入したタイプEXのPEXの変形性状は、タイプNのPNとほぼ同じ変形性状であった。なお、主鉄筋に沿ったひび割れは $V$ が約35.3kNで生じた。破壊後のひび割れ状況は図-5 (d) のようである。

## 4. 梁のFEM解析結果

### 4. 1 FEM解析概要

本研究では2次元有限要素解析プログラム「ATENA」を用いて解析した。本 FEM 解析での荷重は変位制御で行い、修正 Newton-Raphson 法により節点力、節点変位ならびにエネルギーの残差が所定の収束判定値を満足するまで繰り返し計算を行った。本 FEM 解析では、収束判定値を 0.5%とし、繰り返し計算の回数は 200 回とした。所定の繰り返し回数を超えて収束判定値内に入らなかった場合には、強制的に FEM 解析を終了させた。これは、収束しない場合には、誤差を次のステップに持ち越すため、解の精度が保持できないと判断したためである。コンクリートの構成則は、圧縮、引張ともに破壊エネルギーモデルで、鉄筋の構成則は弾塑性である。コンクリートは4節点アイソパラメトリック要素を用い、鉄筋はバー要素でモデル化した。外ケーブルとしての PC 鋼棒はバー要素でモデル化し、両端部や偏向部の固定点のみでコンクリート要素と接合した。コンクリート要素のひび割れは分散ひび割れモデルで、固定ひび割れモデルによるせん断剛性モデルは Kolmar によるもの<sup>3)</sup>を用いた。FEM 解析に用いた分割要素は四角形で、その寸法は 25mm である (図-6 参照)。FEM 解析は、表-5 に示すように、コンクリートの圧縮強度  $f_c'$  と引張側の破壊エネルギー  $G_F$  の値を変化させて行った。さらに、高強度コンクリートの収縮ひ



図-6 要素分割図

ずみ量が大きく、高強度コンクリート内部の鉄筋周囲に微細なひび割れが生じる<sup>2)</sup>ことから、高強度コンクリートと鉄筋との付着特性が収縮ひずみ量の大きさによって変化することが推察される。そのため、コンクリートと鉄筋との付着劣化の程度を付着強度  $\tau_{max}$  の値の低下と仮定して解析した(表-6参照)。付着応力と滑りの関係は「ATENA」に組み込まれている CEB-FIP Model code 1990 の付着応力-滑り関係<sup>3)</sup>(図-7参照)を用いた。解析ケース B(表-6参照)において、コンクリートと主鉄筋との付着強度  $\tau_{max}$  の値を4種類(B80 から B50)に変化させ、BP はコンクリートと主鉄筋とは完全に付着しているもので、B80 の付着強度の値は  $f_c'$  が  $130\text{N/mm}^2$  のときの約 0.8 倍である。FEM 解析は、解析ケース N(表-5参照)と解析ケース B(表-6参照)とを組み合わせを行い、解析名は供試体名と解析ケース N と解析ケース B を組み合わせで表示した。破壊エネルギー  $G_F$  の値は、用いた粗骨材の最大寸法  $20\text{mm}$  と  $f_c'$  の実験値から HPC 規準<sup>4)</sup>の算定式で計算した。 $G_F$  の値を変化させたのは、 $f_c' / f_t$  の値が大きくなりコンクリートがかなり脆性的に破壊する場合には、 $G_F$  の値が低下するものと考えられ、脆性的に破壊する超軽量コンクリートを用いた PRC 梁において  $G_F$  の値を低下させた FEM 解析が行われている<sup>5)</sup>ためである。コンクリートの収縮ひずみ量は、図-2と図-3を参考にタイプ EX では  $-120\mu$ 、タイプ N では  $-240\mu$  として FEM 解析を行った。

表-5 解析ケース N

解析ケースN	圧縮強度	引張の破壊エネルギー
N10	$1.0f_c'$	$1.0G_F$
N76	$1.0f_c'$	$0.76G_F$
N5	$1.0f_c'$	$0.5G_F$
N2	$1.0f_c'$	$0.2G_F$

表-6 解析ケース B

解析ケースB	$\tau_{max}$ ( $\text{N/mm}^2$ )
BP	完全付着
B80	12.5
B70	11.2
B65	10.1
B50	8.1

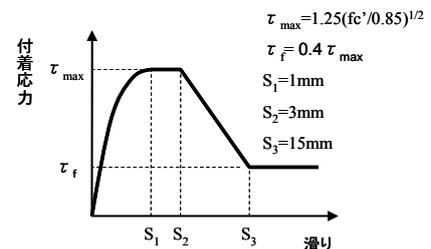


図-7 付着応力-滑り関係<sup>3)</sup>

4. 2 シリーズRにおける実験結果とFEM解析結果との比較

シリーズRのRN (タイプN) とREX (タイプEX) について、 $P_{max}/2$ の実験値とFEM解析値との比較を図-8に、 $P_{max}/2$ とその時のたわみ  $\delta_{max}$ の実験値とFEM解析値との比較を図-9に示す。ここに、 $P_{max}$ は最大荷重である。図-8から、タイプNとタイプEXはともに、解析ケースNにより  $G_F$  の値を小さくすると  $P_{max}/2$  が小さく解析される傾向にある。これは、 $G_F$  の値が小さくなると、ひび割れが梁上縁に向かって一気に長く進展しやすくなるためと考えられる。解析ケースBにより付着強度の値を小さくした  $P_{max}/2$  の解析値は、完全付着のBPと比較するとタイプNとEXでは逆の傾向となっている。これは、 $G_F$  値の大きさはひび割れの発生位置や長さに影響し、それにともない鉄筋の付着特性にも影響を与える。そのため鉄筋の付着強度の大きさもまたひび割れ状況に影響を与える。したがって、 $G_F$  値と付着劣化の程度との相乗作用が梁のひび割れ状況や鉄筋に生じるひずみ分布に影響を与えた結果によるものと推察される。次に、図-9から  $P_{max}/2$  と  $\delta_{max}$  の実験値がともにFEM解析値とよく一致するのは、タイプNでは解析名 RN-N2-B65で、タイプEXではREX-N76-B70である。

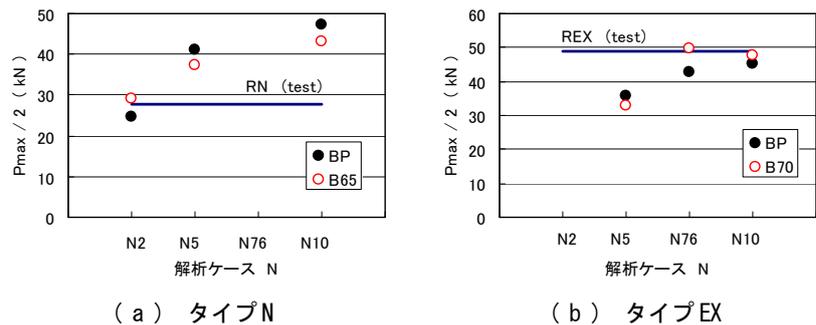


図-8 解析ケース N と  $P_{max}/2$  との関係 (シリーズ R)

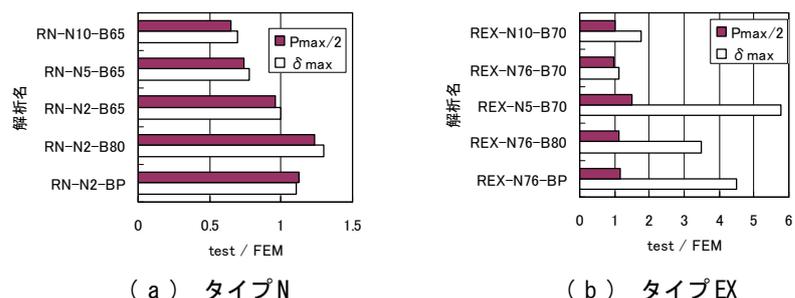


図-9  $P_{max}/2$  と  $\delta_{max}$  の実験値と FEM 解析値の比較 (シリーズ R)

変形性状の実験結果とFEM解析結

果との比較を図-10に示す。鉄筋を完全付着とした解析名RN-N2-BP (タイプN) とREX-N76-BP (タイプEX) の変形性状は $P_{max}/2$ と $\delta_{max}$ の解析値がそれぞれ実験値よりも小さく、鉄筋の付着劣化を考慮した解析名RN-N2-B65 (タイプN) とREX-N76-B70 (タイプEX) の変形性状は実験結果と概ね一致している。さらに、変形性状が実験結果と一致する解析ケースBはタイプNがB65, タイプEXがB70であり、鉄筋の付着劣化の程度はタイプNの方がタイプEX

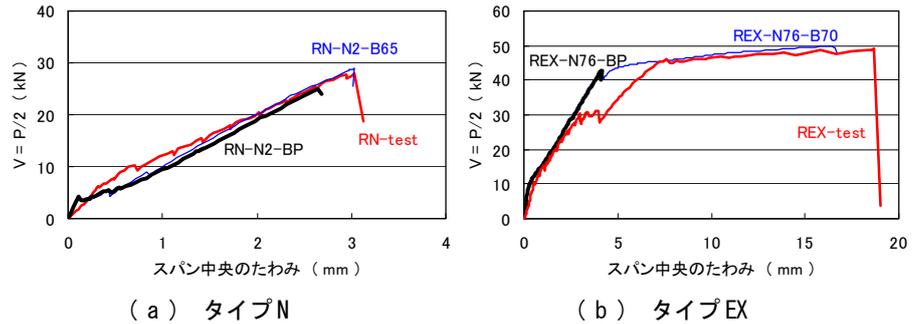


図-10 変形性状の実験結果とFEM解析結果の比較 (シリーズR)

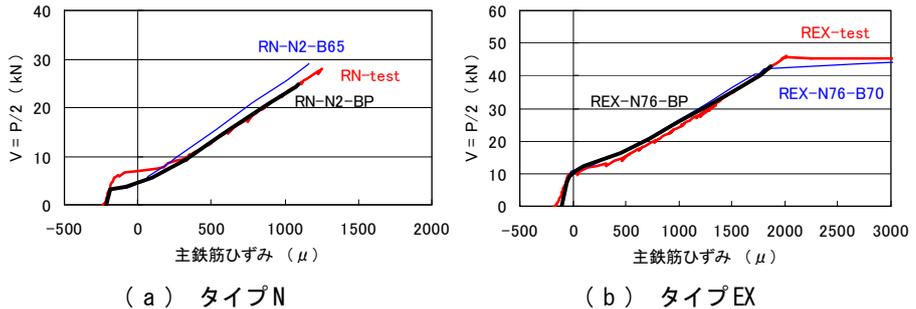


図-11 主鉄筋ひずみの実験結果とFEM解析結果の比較 (シリーズR)

よりも劣っているものと思われる。ところで、タイプEXの場合 (図-10 (b) 参照) 斜めひび割れが発生したVが約30kNからはFEM解析結果が実験結果よりも剛に解析されている。これは、実験では単一の斜めひび割れの発生ばかりでなく、ほかの位置での新たなひび割れの発生やひび割れの進展などに起因してたわみが大きくなっていることを、FEMでは十分に解析できていないためと思われる。さらに斜めひび割れ面では骨材が割れて平滑な面であり、骨材の噛み合せ効果が減少していることが考えられ、ひび割れ間のせん断剛性が低下し、たわみに影響を与えたことが推察される。次に、RC梁のスパン中央における主鉄筋ひずみの実験結果とFEM解析結果の比較を図-11に示す。付着劣化を考慮した解析名RN-N2-B65とREX-N76-B70のFEM解析結果は実験結果と概ね一致している。

### 4.3 シリーズPにおける実験結果とFEM解析結果との比較

シリーズPのPN (タイプN) とPEX (タイプEX) について、 $P_{max}/2$ の実験値とFEM解析値との比較を図-12に、 $P_{max}/2$ とその時のたわみ $\delta_{max}$ の実験値とFEM解析値との比較を図-13に示す。図-12と図-13から、 $P_{max}/2$ と $\delta_{max}$ の実験値がFEM解析値と概ね一致するのは、タイプNの場合では解析名PN-N76-B50で、タイプEXの場合ではPEX-N76-B70である。

変形性状の実験結果とFEM解析結果との比較を図-14に示す。図-14から鉄筋を完全付着とした解析名PN-N76-BP (タイプN) とPEX-N76-BP (タイプEX) の変形性状は $P_{max}/2$ と $\delta_{max}$ の解析

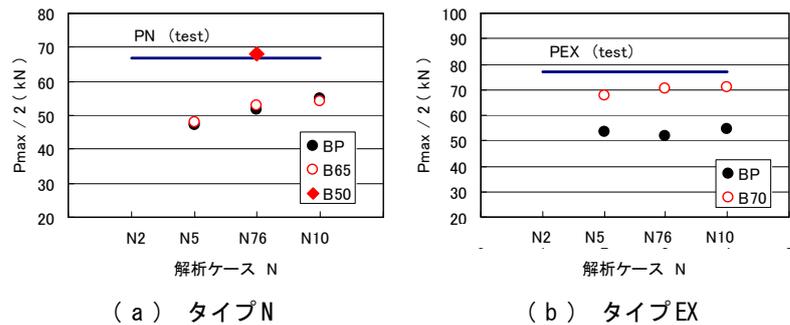


図-12 解析ケースNと $P_{max}/2$ との関係 (シリーズP)

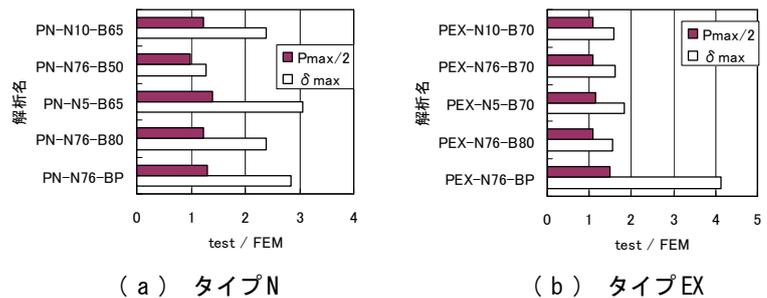


図-13  $P_{max}/2$ と $\delta_{max}$ の実験値とFEM解析値の比較 (シリーズP)

値がそれぞれ実験値よりも小さく、鉄筋の付着劣化を考慮した解析名PN-N76-B50 (タイプN) とPEX-N76-B70 (タイプEX) の変形性状は実験結果と概ね一致している。しかし、タイプNとEXはともに斜めひび割れが発生したと思われるVからはFEM解析結果が実験結果よりも剛に解析されている。これについては、シリーズR (4. 2) で述べたようにひび割れ間のせん断剛性の低下について検討する必要があるものと考えられる。さらに、変形性状が実験結果と概ね一致する解析ケー

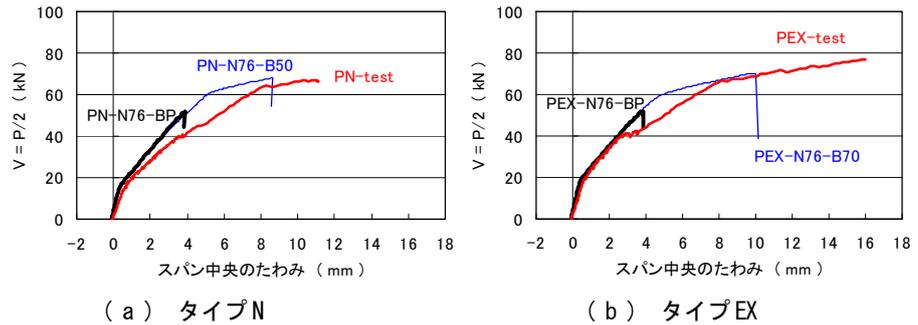


図-14 変形性状の実験結果とFEM解析結果の比較 (シリーズP)

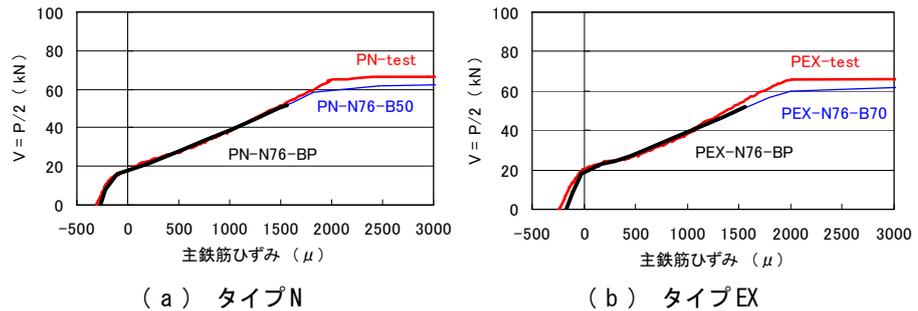


図-15 主鉄筋ひずみの実験結果とFEM解析結果の比較 (シリーズP)

スBはタイプNがB50、タイプEXがB70であり、いずれも鉄筋に付着劣化を考慮した解析となり、鉄筋の付着劣化の程度はタイプNがタイプEXよりも劣っているものと考えられる。

次に、PRC梁のスパン中央における主鉄筋ひずみの実験結果とFEM解析結果の比較を図-15に示す。付着劣化を考慮した解析名PN-N76-B50とPEX-N76-B70のFEM解析結果は実験結果と概ね一致している。

### 5. まとめ

本研究の範囲内で以下のことが言える。

- 1) せん断補強鉄筋のないRC梁 (シリーズR) について、収縮ひずみ量が小さいタイプEXの最大荷重 $P_{max}$ は、収縮ひずみ量が大きいタイプNよりも増大した。しかし、斜めひび割れ発生荷重 $P_{dia}$ は収縮ひずみ量の大きにかかわらずほぼ同じ値であった。
- 2) せん断補強鉄筋のない外ケーブル方式PRC梁 (シリーズP) について、タイプEXの $P_{max}$ と $P_{dia}$ はともにタイプNよりも増大した。
- 3) FEM解析結果について、コンクリートの引張の破壊エネルギー $G_f$ の値を小さくし、さらに鉄筋の付着特性を劣化させることにより、シリーズRとシリーズPとの変形性状、 $P_{max}/2$ と $\delta_{max}$ のFEM解析結果は実験結果と概ね一致した。

以上により、膨張材の有無によりコンクリートの収縮ひずみ量を変化させたRC梁とPRC梁の挙動は、破壊エネルギー $G_f$ の値を小さくし、鉄筋の付着特性を劣化させて概ねFEM解析できるものと思われる。

最後に、本研究を行うに当たり、実験の実施ならびに資料の整理に協力してくれた日本大学理工学部社会交通工学科の伊藤輝政君 (当時4年生) に感謝する。

参考文献 1) 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, Vol. 65, No. 2, pp. 178-197, 2009. 4. 2) 丸山一平, 亀田昭一, 鈴木雅博, 佐藤良一: RCプリズムにおける自己収縮による微細ひびわれ発生と収縮応力挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 587-592, 2006. 3) ATENA : Theory manual. 4) プレストレストコンクリート技術協会: 高強度コンクリートを用いたRC構造物の設計施工規準, 2008. 5) 井口 淳, 柳昭善明: 超軽量コンクリートを用いた外ケーブル方式R形はりのせん断挙動とFEM解析, 第16回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 147-152, 2007.