

様々なアンボンド PC 梁部材の動の実験

鹿島建設 技術研究所 正会員 工修 ○真田暁子
 鹿島建設 技術研究所 正会員 博士(工学) 丸田 誠
 鹿島建設 建築設計本部 工修 友住博明

1.はじめに

近年、建築分野では純 PC 架構であるプレキャスト・プレストレスト (PCaPC) 架構が多く建築されるようになってきた。また、アンボンド PC 架構も耐震構造として認知される見通しとなってきた。しかしながら、アンボンド PC 部材の研究はまだ数少なく、動的性状を含む構造性能にも未解明な点が多い。そこで、アンボンド PC 架構の基本的な構造性能をボンド PC、RC 架構と比較するため、3 種類の異なる構造形式の梁部材の動の実験を行い、①動的载荷によるひずみ速度が曲げ耐力の増加に及ぼす影響の把握、②構造形式の違いが履歴特性に及ぼす影響について検討を行った。既往の研究より、アンボンド PC 部材は大変形経歴後も残留変形が残らない修復性に優れた架構であるが、他方でエネルギー吸収能力に乏しい架構になると予想される。そこで本研究では、アンボンド PC 部材に簡易に減衰を付加する手段として、①危険断面にブラケット型の制震プレートを設置する方法、②アンボンド PC 鋼材と平行にグラウトされた後挿入鉄筋を設置する方法の 2 つの方法を考案し、この方法を用いた梁の動の実験を行い、上記のアンボンド PC 梁部材との比較を行った。以上をまとめて報告する。

2.実験概要

2.1 試験体

図-1 に試験体配筋図を、表-1 に試験体一覧を、表-2 に材料強度一覧を示す。試験体は構造形式が異なる試験体として、アンボンド PC 試験体の PDU、シース管内にグラウト材としてセメントペーストを注入したボンド PC 試験体の PDB、PDU 試験体と曲げ耐力が同程度となるよう計画された RC 試験体の 3 体に、簡易に減衰を付加するための開発試験体である制震プレート付アンボンド PC 試験体の PDU-P、後挿入鉄筋付アンボンド PC 試験体の PDU-AD の 2 体を合わせた計 5 体からなる。アンボンド PC 部材では、アン

表-1 試験体一覧

試験体	B×D	M/QD	使用鋼材		横補強筋	σ_B	σ_J	σ_G	備考
						N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	
PDU	250mm × 400mm	4.0	異形 PC 鋼棒	4-D22 B種-1号	2-D10@50 SD345	76.9	97.1	—	アンボンド PC
PDB						76.8	97.1	34.3	ボンド PC
RDB			異形鉄筋	12-D19 SD345		76.8	—	—	RC
PDU-P			異形 PC 鋼棒	4-D22 B種-1号		79.2	98.2	—	アンボンド PC+制震プレート
PDU-AD			異形 PC 鋼棒	4-D22 B種-1号		2-D19 SD345	58.1	107	59.6

σ_B : コンクリート圧縮強度、 σ_J : 目地モルタル圧縮強度、 σ_G : グラウト圧縮強度

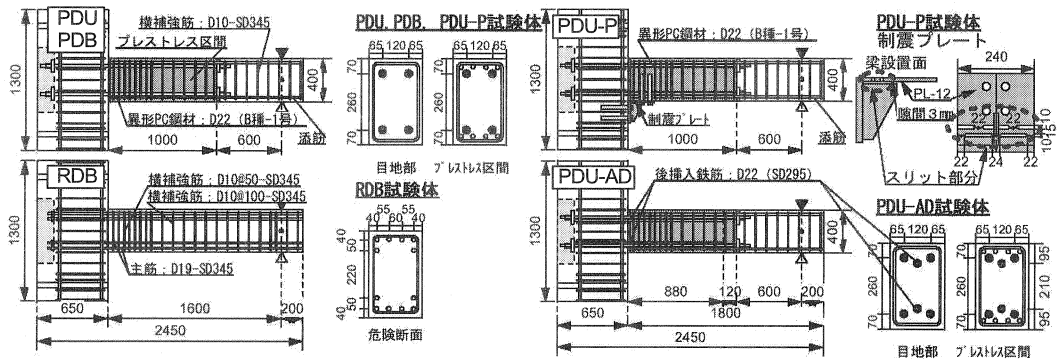


図-1 試験体配筋図

ボンド PC 鋼材の抜け出しに伴う回転変形が大きく、柱・梁接合面に大きな離間変形が集中して発生する。PDU-P 試験体ではこの離間変形を利用し、離間変形によって制震プレートが塑性化してエネルギー吸収するように、離間変形が最も大きい断面最外縁（梁下）に、制震プレートを設置した。制震プレートは、制震プレートによる付加曲げモーメントが、梁部材の曲げモーメントの 15% 程度となるよう設計した。PDU-AD 試験体ではアンボンド PC 試験体中の PC 鋼材と平行な位置にシース管を設け、プレストレス載荷後に鉄筋（2-D22 : SD295）を後挿入してグラウトを注入した。

全試験体とも形は同一で、実物の約 1/2.5 縮尺とした。PDU、PDB、PDU-P、PDU-AD 試験体は、①スタブ部、梁部を PCa 部材として製作し、②圧着部となる危険断面に目地モルタルを打設して一体化し、③異形 PC 鋼材に規格降伏強度（930N/mm²）×0.95 倍のプレストレスを導入して圧着した。その後、PDB 試験体では PC 鋼材・シース管間にグラウト材を注入し、PDU-P 試験体ではブラケット形状の制震プレートを梁下に設置し、PDU-AD 試験体では試験体内に設けたシース管内部に鉄筋を後挿入しグラウトを注入して試験体を製作した。RDB 試験体は梁部、スタブ部ともに一体打設を行った。製作手法の関係上、目地モルタルの厚さは 20mm とし、スケールエフェクトの影響は無視できると仮定した。

曲げに抵抗する鋼材として、PDU 試験体、PDB 試験体では異形 PC 鋼棒（4-D22 B 種-1 号）、RC 試験体では異形鉄筋（12-D19 SD345）、PDU-P 試験体では異形 PC 鋼棒（4-D22 B 種-1 号）+制震プレート（スリット部、最小断面積 528mm² : 2×22mm×12mm）、PDU-AD 試験体では異形 PC 鋼棒（4-D22 B 種-1 号）と後挿入鉄筋（2-D22 SD295）を用いた。PDU-AD 試験体に取り付ける制震プレートは梁設置時の仮設材としても用いられるようにブラケット形状とした。PDU-AD 試験体の後挿入鉄筋は、十分な定着長を確保するように梁部材内の埋め込み長さを 880mm（40db : db は主筋径）とした。PC 鋼材にはひずみゲージを貼付け、緊張前～実験開始直前までひずみを計測した。いずれの試験体でもプレストレスはほとんど減少せず、試験開始直前の平均プレストレスは規格降伏強度×0.85 倍程度であった。

2.2 荷重方法

図-2 に試験体の荷重方法を示す。試験体は梁端部に取り付けた動的アクチュエータを用いて繰り返し荷重を行った。制御は加力点での変位を制御した。入力波は全てサイン波とし、階高 4m、周期 T=0.025h を仮定した 4、8、16 階建ての PC 造建物を想定し、それぞれの建物の周期（0.4sec、0.8 sec、1.6sec）から周波数（2.5Hz、1.25Hz、0.625Hz）を決めた。荷重は表-3 に示すように、変形角 R=0.125～5.0% の範囲で周波数 2.5Hz、1.25Hz、0.625Hz の順で各 5 回繰り返し繰り返し荷重した。実験結果の表記は変形角・周波数・その周波数でのサイクル数を用いて R=1.0% の 2.5Hz 第 1 サイクル（2.5Hz 荷重時の最初のサイクル）のように示す。制震プレートを取り付けた PDU-P 試験体は、簡易な制震部材を取り付けた高層アンボンド PC 造建物の一部を想定し、荷重時の周波数を 16 階用の 0.625Hz とした。

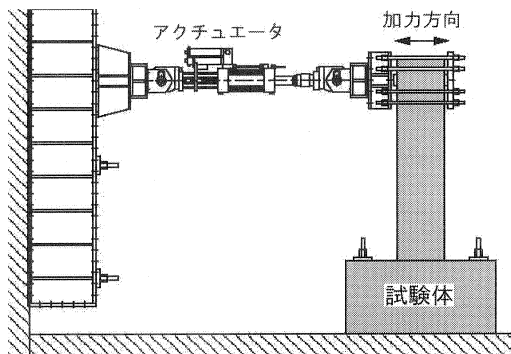


図-2 実験荷重方法

3. 実験結果

3.1 荷重-変形関係

図-3 に各試験体の荷重-変形関係、写真-1 に最終

表-2 材料強度一覧

試験体	用途	概要	強度 N/mm ²	ヤング係数 kN/mm ²
PDU	横補強筋	D10-SD345	390	189
PDB	主筋・添筋	D19-SD345	383	195
RDB	PC 鋼材	D22 B 種-1 号	1027	203
PDU-P	制震 PL	PL-12 SM490	342	—
	横補強筋	D10-SD345	395	189
PDU-AD	PC 鋼材	D22 B 種-1 号	1183	201
	後挿入鉄筋	D22-SD295	357	188

表-3 荷重方法一覧

変形角 %	変形 mm	速度 mm/sec	周波数 Hz	周期 Sec	サイクル数 回
0.125	2	5.0~20	①2.5	①0.4 ②0.8 ③1.6	①×5 ②×5 ③×5
0.25	4	10~40	②1.25		
0.5	8	20~80	③0.625		
1.0	16	40~160	※PDU-P は		
2.0	32	80~320	0.625Hz のみ		
3.0	48	120~480			
5.0	80	200~800			

破壊状況を示す。RDB 試験体を除く全ての試験体で、 $R=1.0\%$ 以降の各変形角の 2.5Hz の第 1 サイクルでコンクリートが圧壊し、その後のサイクルでの剛性が低下するため、2.5Hz の第 1 サイクルとそれ以降のサイクルでの差が顕著であった。PDU 試験体では $R=2.0\%$ で PC 鋼材のひずみが降伏ひずみを上回ったが、除荷時には $R=5.0\%$ の大変形時にも PC 鋼材の残留ひずみが残らず、原点指向型の履歴ループを示した。RDB 試験体は主筋が降伏する $R=1.0\%$ 以降、残留変形が大きくなった。PDB 試験体は PDU と RDB の中間の性状を示し、PC 鋼材が降伏する $R=1.0\%$ 以降に除荷時の PC 鋼材の残留ひずみが大きくなり、残留変形が生じる履歴ループとなった。

PDU-P 試験体では、制震プレートが負荷側で引張を、正載荷側で圧縮を受ける位置に設置したため、負荷側側の荷重、ループ面積とも正載荷側を上回った。PDU-AD 試験体では、後挿入鉄筋も曲げ耐力に寄与するため、PDU 試験体より耐力が上昇したが、同一変形時の残留変形は PDB 試験体より小さくなった。PDU-P、PDU-AD 試験体ともに PDU 試験体より履歴面積が大きくなり、開発アンボンド PC による減衰の付加効果が確認された。

全ての試験体の破壊形式は曲げ降伏型であった。PDU、PDB、PDU-AD 試験体は試験時に圧着部となる目地モルタルスタブ間が開き PC 鋼材の顕著な抜け出しが観察されたが、プレストレス導入域には $R=5.0\%$ の大変形までひび割れが入らず、危険断面近傍のコンクリート圧壊の他に目立った損傷は見られなかった。

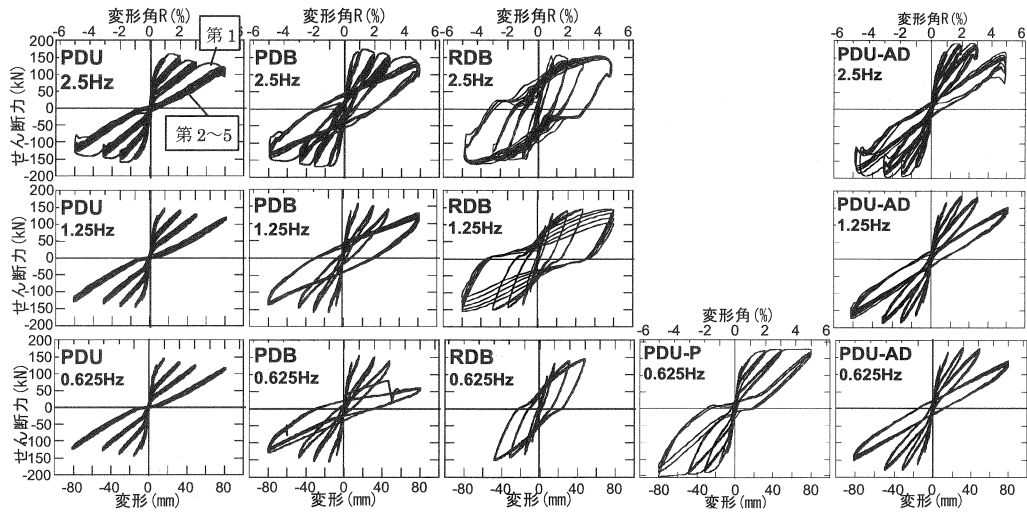


図-3 荷重-変形関係

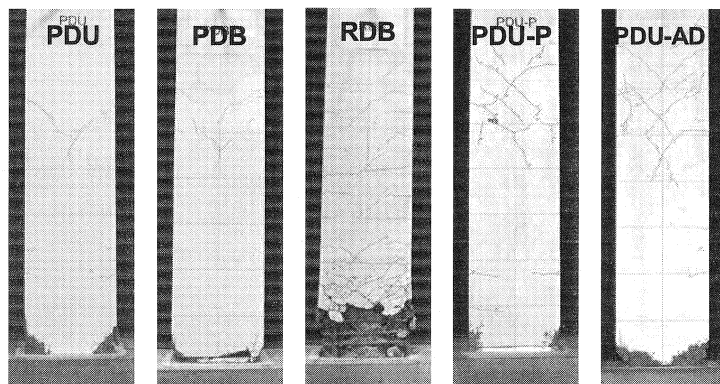


写真-1 最終破壊状況 (R=1/20 載荷後)

PDU-P 試験体に取り付けた制震プレートは R=5.0%の大変形時にプレートが破断して耐力が若干低下した。RDB 試験体は R=3.0%まで曲げ耐力を保持したが、R=5.0%で主筋の座屈・コアコンクリートの損傷を伴い耐力低下した。PDU-P、PDU-AD 試験体は制震プレート、後挿入鉄筋により PDU 試験体より曲げ耐力が上昇した影響で、プレストレス導入域に曲げひび割れが多く見られた。

3.2 ひずみ速度を考慮した曲げ耐力

表-4に実験値、計算値一覧を示す。表中には、危険断面位置の鋼材ひずみ計測値から得られた、最大荷重近傍 (R=1.0%~2.0%) の平均ひずみ速度 ϵ_d (PDU、PDU-P、PDU-AD : 荷重0~荷重ピーク点、PDB、RDB : 荷重0~鋼材降伏点) と、この ϵ_d を用いて細矢ら¹⁾ による鋼材降伏強度-ひずみ速度関係式から求めた動的な鋼材強度 $d\sigma_y$ 、 ϵ_d 算出時の変形角・周波数も併せて示す。PDU 試験体のアンボンド PC 鋼材のひずみ速度は、PDB 試験体のボンド PC 鋼材、RC 試験体の異形鉄筋のひずみ速度の 1/2 程度となった。アンボンド PC 鋼材は鋼材が全長で平均的に伸び、局部的にひずみが増加しづらいため、ひずみ速度も小さくなったと思われる。

動的載荷によるひずみ速度の上昇が部材の曲げ耐力に及ぼす影響を検討するため、PC 規準²⁾ による曲げ終局強度計算式を用いた曲げ強度計算値 Q_m と、ひずみ速度の影響を考慮した曲げ強度計算値 Q_{md} を算定した。 Q_m 算定時の鋼材強度には表-2中の材料試験値を用いた。 Q_{md} 算出時の鋼材強度には $d\sigma_y$ を用い、コンクリートの材料強度の動的効果は無視した。PC 規準の曲げ終局強度計算式はボンド PC 部材を対象とした計算式であるため、アンボンド PC 部材に使用する場合には実験値を過大評価する。そこで、PDU、PDU-P、PDU-AD 試験体のアンボンド PC 鋼材の降伏強度には、最上ら³⁾ による終局モーメント時のアンボンド PC 鋼材の緊張力 σ_{apy} を用いて曲げ強度を算定した。ひずみ速度を考慮した動的な鋼材強度 $d\sigma_y$ を用いた曲げ耐力計算値 Q_{md} は、 Q_m と比較すると最大荷重時のひずみ速度が小さな PDU-P 試験体では 4.5%、それ以外の試験体では 6.8%~12.1%上昇した。ひずみ速度を考慮した鋼材強度を用いることで、曲げ耐力計算値 Q_{md} は実験値を精度良く評価できた。すなわち動的載荷を受ける PC 部材の曲げ耐力は、RC 部材と同様の手法で、ひずみ速度を考慮した鋼材強度を用いた曲げ耐力計算値で評価できた。

3.3 等価粘性減衰定数

図-4 に等価粘性減衰定数 heq -変形関係を示す。構造形式の違いにより、等価粘性減衰定数に差が出た。構造形式が異なる PDU、PDB、RDB 試験体では、同一変形時の heq を比較すると付着性状が良い PDU < PDB < RDB の順に heq が大きくなり、特に鋼材が降伏する R=1.0%以降、その差が大きくなった。PDU-P 試験体では制震プレートが引張を受ける負荷側のみ履歴ループが大きくなるため、鋼材が降伏する R=2.0%以降の負荷側側の heq が、PDU 試験体より 3~4%程度増加した。後挿入鉄筋を配した PDU-AD 試験体では、アンボンド PC 鋼材・後挿入鉄筋が降伏する R=2.0%以降の heq が、PDU 試験体より 2~4%程度増加した。アンボンド PC 部材への減衰の付加を目標とした PDU-P、PDU-AD 試験体ともに、PDU 試験体より減衰は増加したが、PDU-AD 試験体の減衰は PDB 試験体よりも小さかった。更に大きな減衰を付加するには、制震プレートの形状、後挿入鉄筋の量と断面内配置に対する工夫が必要となる。

表-4 実験値、計算値一覧

試験体	Q_{max}^{*1} (kN)	Q_c^{*2} (kN)	Q_m^{*3} (kN)	Q_{md}^{*4} (kN)	ひずみ速度		鋼材強度 $d\sigma_y$ (N/mm ²)	
					ϵ_d (μ /sec)	変形角・周波数		
PDU	161	73.8	146 [1.10]	161 [1.00]	アンボンド PC 鋼材	1.51×10^4	R=1.0% 2.5Hz	1139 (1.11)
PDB	174	73.8	154 [1.14]	172 [1.02]	ボンド PC 鋼材	3.48×10^4		1158 (1.13)
RDB	-162	26.2	141 [1.15]	158 [1.02]	異形鉄筋	3.55×10^4		432 (1.13)
PDU-P	-203	75.2	178 [1.14]	186 [1.10]	アンボンド PC 鋼材	8.14×10^2	R=2.0% 0.625Hz	1073 (1.05)
					制震 PL	—		402 (1.05)
PDU-AD	-199	72.9	178 [1.12]	197 [1.01]	アンボンド PC 鋼材	2.72×10^4	R=2.0% 2.5Hz	1326 (1.12)
					後挿入異形鉄筋	3.12×10^4		401 (1.12)

*1: 実験値、*2: PC 規準によるひび割れ強度 *3: PC 規準による曲げ終局強度計算値 (材料試験値使用)

*4: PC 規準による曲げ終局強度計算値 (ひずみ速度を考慮した動的な鋼材強度 $d\sigma_y$ 使用)

[]内は実験値/計算値を、() はひずみ速度を考慮した動的な鋼材強度/表-2 中材料強度を示す。

3.4 PC 共研モデルによる履歴復元力特性・等価粘性減衰定数

構造形式の異なるアンボンドPC、ボンドPC、RC部材の履歴復元力特性を、PC鋼材の曲げ耐力寄与率 λ (純PC： $\lambda=1$ 、PRC： $\lambda<1$)、PC鋼材の付着強度による影響を考慮できる付着係数 ω (付着が良いほど小さい、異形PC鋼棒 $\omega=0.4$)のみを用いて簡易に評価できるモデルとして、PC共研モデル⁴⁾が提案されている。PC共研モデルを用いて構造形式が異なるPDU、PDB、RDB試験体の履歴復元力特性及び等価粘性減衰定数 heq を算定し、このモデルと実験結果を比較検討する。

曲げひび割れ強度、曲げ降伏強度には、PC規準計算式を用いた曲げひび割れ強度、曲げ終局強度計算値を使用した。曲げ降伏強度には、ひずみ速度の影響を考慮した曲げ強度計算値 Qmd を用いた。また、降伏点剛性は全てPC共研の降伏点剛性低下率 α_y を用いて算定した。PC共研モデルによる履歴復元力特性は、定常ループを比較できるように、同一変形を2サイクル分算定した。

図-5にPC共研モデルによる履歴復元力特性と2.5Hz载荷時の実験結果を示す。PDU試験体の曲げひび

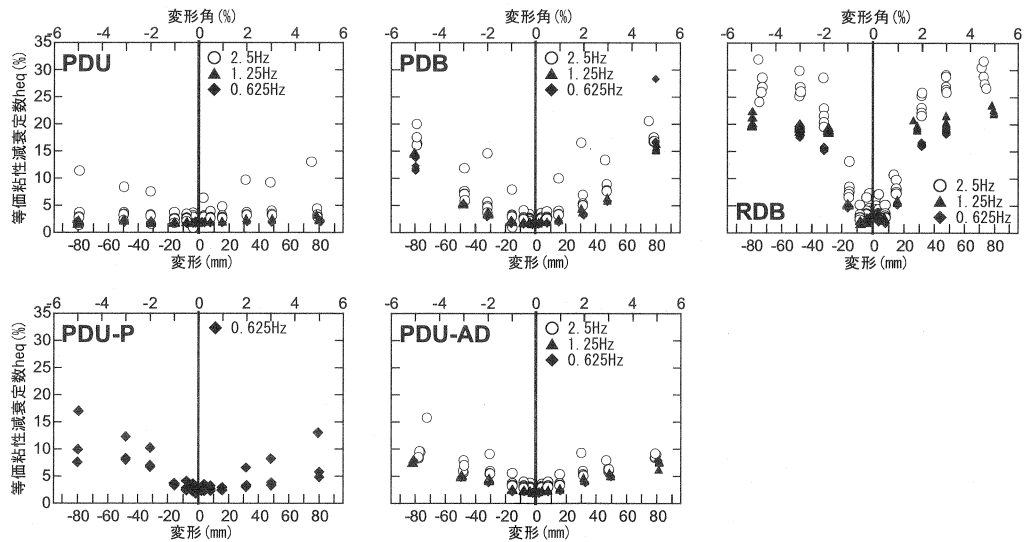


図-4 等価粘性減衰定数 heq

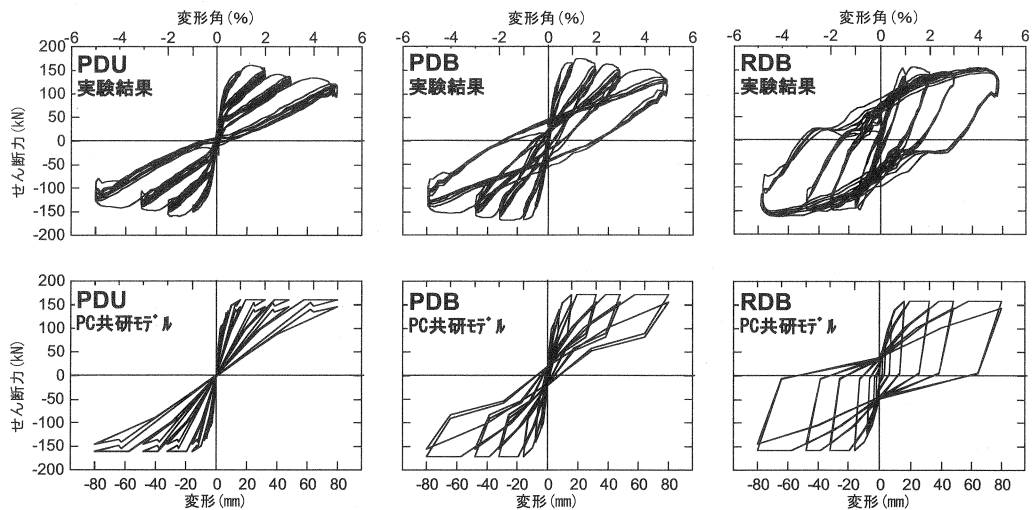


図-5 PC共研モデルによる履歴復元力特性

割れ強度後の第二剛性、PDB 試験体、RDB 試験体の残留変形等、若干実験値と異なる点はあるが、いずれの試験体でも PC 共研モデルによる履歴復元力特性は実験の荷重-変形関係と概ね適合している。PC 共研モデルでは、載荷曲線は全ての構造形式で同じとし、荷重ピーク後の除荷曲線を3直線で表し、 $\lambda \times \omega$ が大きな部材では残留変形・履歴面積が小さく、 $\lambda \times \omega$ が小さな部材では残留変形・履歴面積が大きくなるように除荷曲線の特性点を設定している。アンボンド PC 部材では $\lambda \times \omega = 0.9$ となり、荷重-変形関係上で除荷曲線が載荷曲線を上回る場合があった。この点を解決するため、実際の PDU 試験体の実験結果を参考に、アンボンド PC 部材の除荷曲線は特性点を無くし、荷重ピーク点と原点を結んだ直線でモデル化するような改善が必要なが分かった。

図-6 に PC 共研モデルによる履歴復元力特性から得られた PDU、PDB、RDB 試験体の heq を示す。PDB、RDB 試験体では、 $R=1.0\%$ 以前の PC 共研モデルによる heq は実験結果を過大に評価したが、鋼材降伏後に残留変形が大きくなる $R=2.0\%$ 以降、第2サイクルでは両者の差は小さくなった。PDU 試験では、PC 共研モデルによる heq は、第1サイクルは実験結果と適合したが、定常ループとなる第2サイクルの heq はマイナスの値となった。

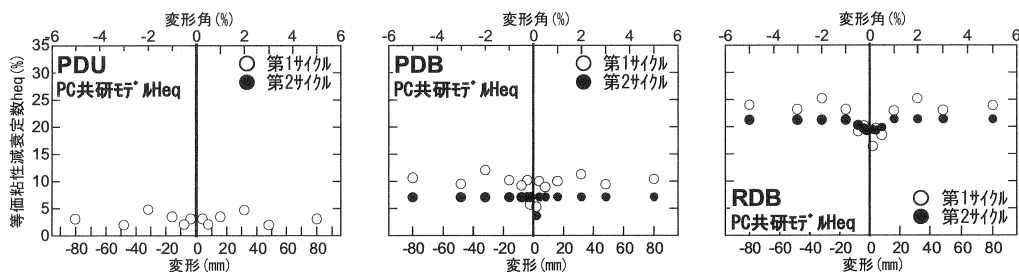


図-6 PC 共研モデルによる等価粘性減衰定数 heq

4.まとめ

アンボンド PC 試験体、ボンド PC 試験体、RC 試験体の基本構造的な性能の比較し、減衰を付加する2種類の方法を用いたアンボンド PC 試験体への動的載荷試験を行い、下記の知見を得た。

- 1) アンボンド PC、ボンド PC、RC 梁試験体への動的載荷を行い、履歴面積、残留変形、ひずみ速度等の構造性能が大きく異なることが確認された。
- 2) アンボンド PC 部材に減衰を付加するため、①制震プレートを危険断面に設置する方法、②後挿入鉄筋を定着させる方法の2種類を考案した。動的載荷による実験結果から、 $R=2.0\%$ 以降、アンボンド PC 試験体と比較して①は3~4%、②は2~4%程度の減衰を付加できることが分かった。
- 3) ひずみ速度の影響を考慮した鋼材強度を用いた PC 規準による曲げ強度計算値は、全ての試験体の実験値を精度良く評価した。
- 4) 構造形式の異なる PDU、PDB、RDB 試験体の履歴復元力特性を、PC 共研モデルを用いてモデル化した。PC 共研モデルによる履歴復元力特性は概ね実験で得られた荷重-変形関係と適合したが、アンボンド PC 部材では除荷曲線の特性点の改良が必要であることが分かった。履歴復元力特性から得られる heq は $R=2.0\%$ 以降の第2サイクルでは、概ね実験値と良く対応した。

【謝辞】

本実験の実施に際して、株式会社ピーエス三菱の福井剛氏、神鋼鋼線工業株式会社の由利隆之氏、高周波熱錬株式会社の田中典男氏に多大なるご協力をいただいた。ここに謝意を表する。

【参考文献】

[1]細矢他：ひずみ速度を考慮したファイバー解析による鉄筋コンクリート部材の断面解析，日本建築学会構造系論文集，第482号，1996.4，pp.83-92.[2]日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説，1998年11月.[3]最上他：逆対象曲げを受けるアンボンド PC 梁のモーメント-変形関係に関するパラメトリック解析，日本建築学会論文報告集，第428号，1991年10月，pp.79-88. [4]建設省建築研究所等：共同研究 PC 構造設計・施工指針の作成-最終年度研究報告書，平成11年3月