

# 梁曲げ破壊するプレストレスト鉄筋コンクリート柱梁十字形部分架構の 梁部材における等価粘性減衰定数の定量評価

## ESTIMATION OF EQUIVALENT VISCOUS DAMPING RATIO FOR PRESTRESSED REINFORCED CONCRETE BEAM IN CRUCIFORM BEAM-COLUMN SUBASSEMBLAGES

田島 祐之\*, 北山 和宏\*\*  
Yuji TAJIMA and Kazuhiro KITAYAMA

An available expression to estimate an equivalent viscous damping ratio for a flexural beam within prestressed reinforced concrete (called as PRC) interior beam-column subassemblages is proposed empirically through regression analyses using previous test results for cruciform beam-column subassembly specimens. Energy dissipating ability in a PRC flexural beam is dominated by a contribution ratio of a tensile force in a PC tendon to an ultimate flexural moment of a beam critical section, and both bond situation along a beam bar and a PC tendon passing through a beam-column joint panel. Thus these factors are taken into account in a proposed equation. An equivalent viscous damping ratio predicted by the equation for a PRC flexural beam within interior beam-column subassemblages agreed well with that obtained by laboratory tests.

**Keywords:** Prestressed Reinforced Concrete, Cruciform Beam-Column Subassembly, Beam Flexural Failure, Equivalent Viscous Damping Ratio, Bond along PC Tendon  
プレストレスト鉄筋コンクリート, 柱梁十字形部分架構, 梁曲げ破壊, 等価粘性減衰定数, PC 鋼材付着

### 1. 研究の背景と目的

#### 1.1 研究の背景

鉄筋コンクリート(以下 RC と略記)構造断面に通し配筋された PC 鋼材にプレストレスを導入したプレストレスト鉄筋コンクリート(以下 PRC と略記)構造は, RC 構造とプレストレストコンクリート(以下 PC と略記)構造の中間的な性質を持つ。また, PRC 構造では梁の PC 鋼材量と普通鉄筋(以下梁主筋とする)量の割合により, 復元力特性及びエネルギー吸収能力は多様に变化する。PRC および PC 構造では, プレストレス導入後にシース管中の空隙にグラウトモルタルを注入して PC 鋼材とコンクリートとの間に付着を付与すると同時に, PC 鋼材を防錆保護する。グラウトを注入することで, PC 鋼材降伏時変形, 梁部材残留変形及びエネルギー吸収性能は大きく变化する。そこで本論文では RC, PRC 及び PC 構造における十字形部分架構の梁部材のエネルギー吸収性能を検討対象とした。

部材のエネルギー吸収性能を定量的に評価するには, コンクリートや鋼材の応力 ひずみ関係の履歴ループの面積を積分する原理的な方法や, 部材の復元力履歴特性をモデル化することによって履歴ループの面積を算出する方法等がある。しかし本論文では, 十字形部分架構の梁部材のエネルギー吸収性能は, 柱梁接合部内を通し配

筋される梁主筋および PC 鋼材の付着性状<sup>1)</sup>によって变化することに着目した。具体的には, これらの両者および梁の終局曲げ耐力に対する PC 鋼材の寄与率を変数として, 等価粘性減衰定数を定量評価する手法を提案した。

#### 1.2 既往の研究

a) 文献(2)に提案されている等価粘性減衰定数 $h_{eq}$ は, 断面曲げ強度に対する梁主筋の寄与率および変位の塑性率を使用し, 以下の式によって簡便に評価できる。

$$h_{eq} = (0.06 + 0.14\sqrt{\alpha}) \left(1 - \frac{1}{\mu}\right) + (0.02 + 0.03\sqrt{\alpha}) \quad (1)$$

ここで,  $\alpha$  : 部材断面曲げ強度に対する梁主筋の寄与率  
( $\alpha = 0$  は PC 部材を,  $\alpha = 1$  は RC 部材を示す)

$\mu$  : 変位の塑性率

(1)式は, PRC 建物を一質点系に縮約したときの, 地震動の非定常性を考慮した, 平均的な等価粘性減衰定数を表している。そのため PRC 建物において, 明確な梁降伏による全体崩壊形が形成されるときには, (1)式による等価粘性減衰定数と PRC 梁部材の等価粘

\*首都大学東京工学研究科建築学専攻 大学院生・修士(工学)

\*\*首都大学東京都市環境科学研究科建築学域 教授・工博

Graduate Student, Dept. of Architecture, Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan University, M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan University, Dr. Eng.

性減衰定数とは密接な関係にある。

b) RC構造では文献(3)に、梁曲げ降伏する十字形部分架構における柱梁接合部内の梁主筋付着性状から、エネルギー吸収量(等価粘性減衰定数  $h_{eq}$ )を(2)式で示した。

$$h_{eq} = 0.09 + \frac{0.1}{B_l^2} \cdot \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right) \quad (2)$$

ここで、 $B_l$ とは梁主筋の接合部内付着性状を表す付着指標で、柱梁接合部内の梁主筋に沿って存在し得る仮定の最大付着応力度に対する付着強度の比であり、以下による。

$$B_l = \frac{u_{b,av}}{u} \quad (3)$$

$u_{b,av}$  : 接合部内梁主筋が柱面の一端で引張降伏し、他端ではコンクリートの負担圧縮力を0として断面での力の釣り合いから定まる圧縮力を負担するときの接合部内平均付着応力度で以下によって計算する。

$$u_{b,av} = \frac{3 + \gamma \sigma_y \cdot d_b}{8 D_c} \quad (4)$$

: 梁断面の複筋比で1以下

$\sigma_y$ : 梁主筋の降伏応力度(N/mm<sup>2</sup>)

$d_b$ : 梁主筋径

$D_c$ : 柱全せい

$u$ : 梁主筋の柱梁接合部内での付着強度で以下による。

$$u = 0.7 \left( 1 + \frac{\sigma_0}{\sigma_B} \right) \sigma_B^{2/3} \quad (\text{単位: N/mm}^2) \quad (5)$$

$\sigma_0$ : 柱の圧縮軸応力度(N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_B$ : コンクリート圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

$\mu$ : 変位の塑性率

また、内田・浜原等<sup>4)</sup>は、PRCとPC構造の梁部材における復元力特性の除荷剛性を梁主筋の接合部内での付着劣化に依存しているとして、柱梁接合部内の梁主筋平均付着応力度やコンクリートの引張強度等をパラメータにして、梁部材の履歴形状を評価し、RC~PRC~PC構造における梁部材の復元力モデルを提案した。このモデルが履歴形状および等価粘性減衰定数において実験値と比較的一致していることを示した。しかしさらなる精度向上のためにはPC鋼材周りの付着性状を考慮すべきである。

c) 足立・西山<sup>5)</sup>は、PC鋼材まわりの付着性状に注目し、PC構造ト形圧着柱梁骨組を対象とした梁部材の履歴形状の検討を行った。PC鋼より線の付着特性を考慮した分割要素法に基づく解析によって、ループの形状を求めた。梁荷重-部材角の骨格曲線について解析結果と実験結果を比較して、両者は良く一致したことを示した。

隅田・岸本等<sup>6)</sup>はPRC及びPC構造において梁部材の荷重-変形関係における残留変形に着目し、PC鋼材種別(異形PC鋼棒、PC鋼より線、丸形PC鋼棒)の残留変形率算定式を提案した。この算定式は簡便であり、梁部材の履歴性状を定め、等価粘性減衰定数  $h_{eq}$  を求めるには非常に有用である。しかし、梁主筋付着強度(もしくは付着性状)について考慮して無いこと、PC鋼材の付着性状はPC鋼材-コンクリート間の付着強度として表しており、グラウト強度やシース管の表面形状を考慮していない等の問題が残されている。

### 1.3 研究の目的

本研究では既発表のPRCおよびPC造の実験結果<sup>7)~9)</sup>を用いてRC~PRC~PC構造を包括し、十字形部分架構の梁部材を対象とした等価粘性減衰定数  $h_{eq}$  の評価手法を提案することを目的とする。その際、PC鋼材周りの付着性状を評価する付着指標( $B_{lp}$ )も提案した。なお、梁部材の終局曲げ耐力に対する梁主筋およびPC鋼材の寄与の程度は、PC鋼材周りのグラウトの有無や断面内のPC鋼材位置によって

表1 試験体諸元

試験体名	N-4 <sup>8)</sup>	N-5 <sup>8)</sup>	M-2 <sup>8)</sup>	M-5 <sup>8)</sup>	UB-1 <sup>9)</sup>	GB-2 <sup>9)</sup>	SB-3 <sup>9)</sup>	GBS-4 <sup>9)</sup>	BNN2 <sup>7)</sup>	WNN <sup>7)</sup>	BNU <sup>7)</sup>
コンクリート圧縮強度(MPa)	63.4		58.8			77.2			76.1		
コンクリート割裂引張強度(MPa)	3.49		3.76			4.29			4.45		
グラウト材圧縮強度(MPa)	56.4		無			65.3			54.0		
梁PC鋼材	4- 10.7 (細径異形PC)		2- 9.2 (細径異形PC)		2- 12.6 (細径異形PC)		2-D22 (異形PC)		2-D22 (異形PC)		3- 12.6 (細径異形PC)
有効引張応力度/材料試験降伏強度 <sup>%)</sup>	0.55	0.50	0.61	0.54	0.53	0.51	0.51	0.51	0.29	0.56	0.57
梁上端筋	4-D13	2-D13	3-D13	2-D19	2-D13	2-D13	2-D13	3-D13	梁組立筋 4-D13(SD345)		
鉄筋材種	SD345	SD295A	SD345	SD345	SD295A	SD295A	SD295A	SD490			
梁下端筋	2-D19	2-D13	3-D13	2-D19	2-D13	2-D13	2-D13	3-D13			
鉄筋材種	SD345	SD295A	SD345	SD345	SD295A	SD295A	SD295A	SD490			
プレストレス率	0.51	0.71	0.36	0.43	0.74	0.80	0.80	0.69	1		
シース管	#1026			#1028	#1040		#3040	#1028	#1049	#1056	#1049
柱主筋	12-D22(SD345)								4-D32(SBPR 930/1080)		
断面	梁断面250(mm)×400(mm)、柱断面350(mm)×350(mm)										
梁せん断補強筋	2-D13@100								2-D10@100		
柱せん断補強筋	2-D10@100										
軸力(kN)	930										
破壊モード <sup>*)</sup>	BY	BY	BY	BY	B	BY	BY	BY	B	B	B
梁断面詳細図											

\*1 BYは引張側梁主筋およびPC鋼材共に降伏したもの、BはPC鋼材が降伏せずに梁付け根の圧縮側コンクリートが圧壊したものを示す。

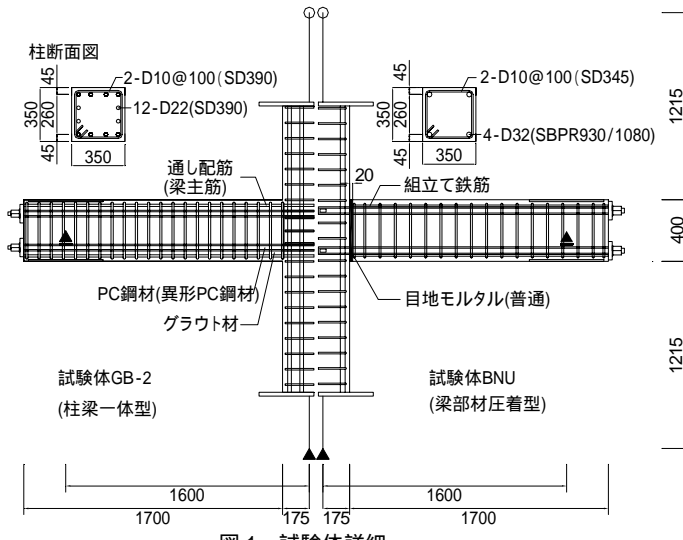


図1 試験体詳細

表2 使用鋼材の材料特性

		降伏応力度 MPa	ヤング係数 GPa	降伏時 ひずみ%	引張強度 MPa	弾性限界 ひずみ%
異形鉄筋	D10(SD345)	400	184	0.22	552	
	D10(SD390)	444	199	0.22	635	
	D13(SD295A)	356	175	0.20	494	
	D13(SD345)	376	180	0.21	547	
	D13(SD490)	564	186	0.30	717	
	D13(USD685A)	724	190	0.42	937	
	D19(SD345)	380	182	0.21	574	
	D22(SD345)	373	186	0.20	503	
細径異形 PC鋼棒	9.2	1375	186	0.95	1456	0.66
	10.7	1350	199	0.91	1450	0.59
	12.6	1420	195	0.92	1471	0.60
異形 PC鋼棒	D22(SBPR930/1080)	1042	200	0.73	1166	0.46
	D32(SBPR930/1080)	1014	195	0.72	1164	0.33
PCより線	12.4A(SWPR7A)	1795	220	1.02	1901	0.36

変化する。本論文では、これらを考慮するためにプレストレス率を使用した。プレストレス率は、終局曲げ耐力に対するPC鋼材の寄与率であり、以下で表される。

$$\lambda = \frac{M_p}{M_p + M_r} \quad (6)$$

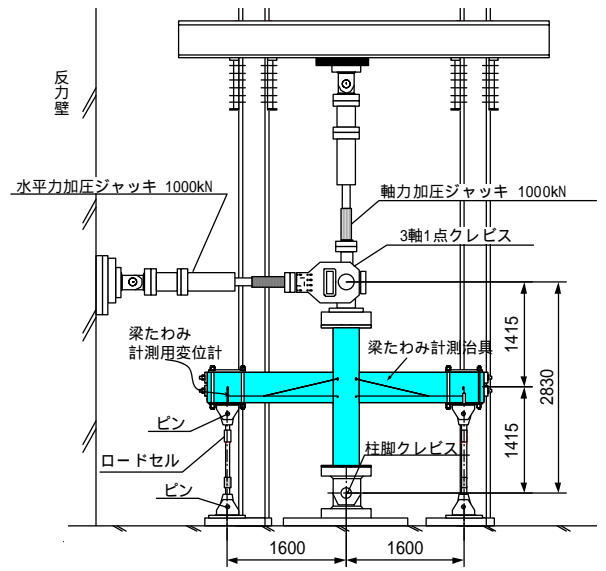
ここで、 $M_p$ ：終局曲げ耐力のPC鋼材負担分

$M_r$ ：終局曲げ耐力の梁主筋負担分

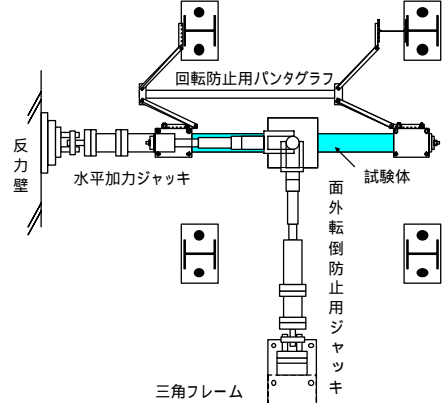
## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

試験体詳細を図1、試験体諸元及びコンクリートとグラウトの材料特性を表1に示す(梁断面詳細図を合わせて示す)。表中の破壊モードについて、PC鋼材は降伏せずに梁圧縮側コンクリートの圧壊した試験体をB、引張側梁主筋およびPC鋼材ともに降伏した試験体をBYと定義した。使用鋼材(鉄筋・PC鋼材)の材料特性は表2に示す。PC鋼材の降伏応力度および降伏ひずみは0.2%オフセット法により算出した。試験体は全て平面十字形であり、柱断面を350mm×350mm、梁断面を250mm×400mm、柱芯から梁端支持点までが1600mm、梁芯から上柱加力点および下柱支持点までがそれぞれ1415mmである。コンクリート圧縮強度は59~77(MPa)であり、グラウト圧縮強度は54~65(MPa)である。PC鋼材の有効引張応力度(PC鋼材のリラクセーション、コンクリートのクリープおよび乾燥



(a) 荷装置の立面図



(b) 荷装置の平面図

図2 荷装置図

収縮などが終わった後もPC鋼材に存在している引張応力度)は、試験体BNN2を除き、平均で材料試験降伏強度の0.54倍である。試験体BNN2は初期導入張力を低めに設定し、有効引張応力度は材料試験降伏強度の0.29倍であった。プレストレス率を算出する際、終局曲げモーメント $M_u$ を文献(10)より以下の(7)式で算出した。その際、グラウト有の場合には引張側梁主筋およびPC鋼材共に降伏とし、圧縮側梁主筋応力は0、圧縮側PC鋼材は有効引張応力と仮定した。グラウト無の場合には引張側梁主筋降伏とし、圧縮側梁主筋応力は0とした。PC鋼材応力は引張側および圧縮側共に、文献(10)に定められた応力(8)式を用いた。

$$M_u = \frac{7}{8} T_y d + T_p \left( d_p - \frac{1}{8} d \right) \quad (7)$$

ここで、 $M_u$ ：断面の終局曲げモーメント

$d$ ：引張側梁主筋に対する有効せい

$d_p$ ：PC鋼材に対する有効せい

$T_y$ ：引張側梁主筋の引張合力(=  $a_t \sigma_y$ )

$a_t$ ：引張側梁主筋の断面積

$\sigma_y$ ：引張側梁主筋の規格降伏点応力度

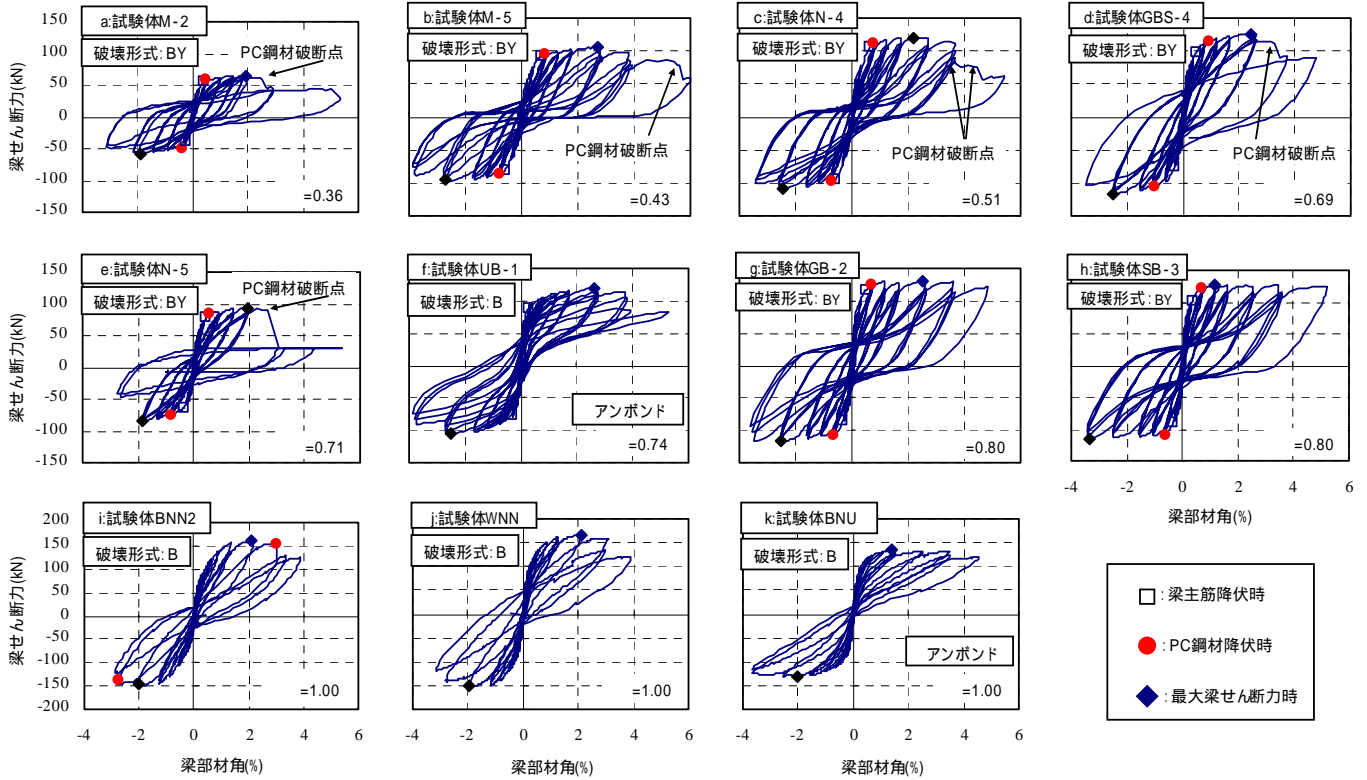


図3 梁せん断力-梁部材角関係

$T_p$ : 曲げ破壊時におけるPC鋼材の引張合力(= $a_p O_{pu}$ )

$a_p$ : PC鋼材の断面積

$O_{pu}$ : 終局曲げモーメント時のPC鋼材引張応力度で、付着のある場合には $O_{pu} = O_{py}$ , アンボンドPC鋼材の場合は、

$$\sigma_{pu} = 0.75\sigma_{pe} + 0.25\sigma_{py} \quad (8)$$

$O_{pe}$ : PC鋼材の有効引張応力度

$O_{py}$ : PC鋼材の規格降伏点応力度

## 2.2 実験概要

載荷装置の立面および平面図を図2に示す。試験体の両梁端はローラー支持、下柱はピン支持とし、上柱加力点には軸力、水平力および面外転倒防止用水平ジャッキの3基の1000kNジャッキを取付けた。試験体に面外回転防止用のパンタグラフを取付けた(図2(b))。図2(a)に示すように、梁端支持点のたわみは、柱の埋込ボルトに治具を取付け、梁端支持部との鉛直変位を直接測定して梁たわみとした。この梁たわみを梁危険断面から梁端支持点までの距離(1425mm)で除した値を梁部材角とした。柱に一定圧縮軸力(930kN)を与えた後、層間変位を制御して水平に正負交番繰返し載荷を行った。試験体加力サイクルは、試験体N-4, N-5, M-2, M-5, UB-1, GB-2, SB-3, GBS-4で、層間変形角 $R=0.25\%$ を1サイクル、 $R=0.5\%$ を2サイクル、 $R=1, 1.5, 2, 3, 4\%$ を3サイクル行った後、押切とした。試験体BNN2, WNN, BNUは $R=0.25\%$ を1サイクル、 $R=0.5, 1, 2\%$ を2サイクル、 $R=3\%$ を1サイクル、 $R=4\%$ を2サイクル行った後、押切とした。

## 3. 実験結果

### 3.1 梁せん断力と梁部材角関係

梁せん断力と梁部材角の関係をプレストレス率が小さい順に、図3に示す。図中の□は梁主筋降伏時、●は梁PC鋼材降伏時及び◇は最大せん断力時を示す。アンボンド試験体UB-1とBNUでは、PC鋼材は降伏せず、大変形時まで原点指向型の履歴を示した。この2体の試験体とPC鋼より線を使用した試験体WNNの耐力減少の要因は梁コンクリート圧壊と判断し、破壊モードはBとした。導入張力の小さい試験体BNN2は最大耐力後にPC鋼材は降伏し、梁端部の曲げ圧縮破壊が先行したので破壊モードはBとした。その他の試験体は、梁主筋及びPC鋼材の降伏が梁端コンクリートの圧壊より先行したことから破壊モードはBYとした(表1参照)。履歴性状を比較すると、RC構造からPC構造に近づく(μが1に近づく)につれ原点指向型の傾向が強くなった。一方、μが同一であり、PC鋼材周りにグラウトを充填した試験体GB-2及びSB-3はPC鋼材降伏後に残留変形が大きくなり、RC構造のような復元力特性を示した。この2体とアンボンドの試験体UB-1とを比較すると、PC鋼材周りの付着の有無により履歴特性は影響を受けることがわかる。PC鋼材としてねじりフシの細径異形PC鋼棒(以下細径異形PC鋼棒とする)を使用した試験体N-4, N-5, M-2, M-5およびGBS-4では、最大耐力後に梁危険断面引張側のPC鋼材の破断を生じ、耐力は階段状に低下した。

図4に試験体GB-2の梁せん断力と部材角関係の包絡線と各事象を示す。梁曲げひび割れが生じ、初期剛性が低下した。梁主筋が降伏し、次にPC鋼材が降伏してから耐力はほぼ一定を保持した。梁部材角で1.17%の時、梁圧縮側コンクリートに梁主筋に沿ったひび

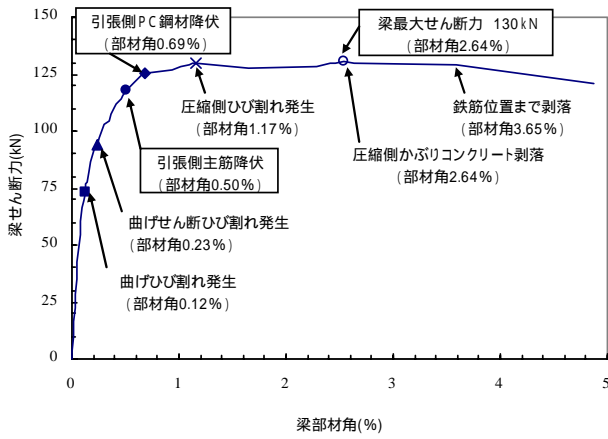


図4 試験体 GB-2 梁せん断力-梁部材角関係包絡図

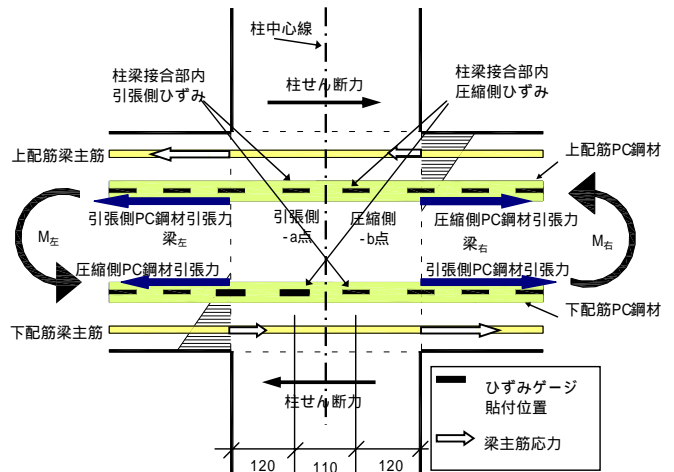


図5 PC鋼材ひずみゲージ貼付位置

割れが生じ、圧縮側かぶりコンクリート剥落とほぼ同時に最大耐力に達し、圧縮側梁主筋位置のコンクリート剥落の後、耐力は低下した。破壊モード BY の試験体は、ほぼ同様の破壊経過を示した。

### 3.2 PC鋼材の応力分布と附着性状

図5にPC鋼材に貼付したひずみゲージ位置の概略を示す。図のような柱梁接合部周りの応力状態において、柱中心線より梁危険断面の引張側に近い方(梁危険断面より120mm)のPC鋼材に貼付したひずみゲージの出力をPC鋼材の柱梁接合部内引張側ひずみとし、柱中心線より梁危険断面の圧縮側に近い方(梁危険断面より120mm)のPC鋼材に貼付したひずみゲージの出力をPC鋼材の柱梁接合部内圧縮側ひずみとする。図6に試験体GB-2における各加力サイクルピークでの上配筋PC鋼材の応力分布を示す。凡例内の $R_b$ は各加力サイクルピーク時の梁部材角を表す。図7に示すように、PC鋼材応力度は、材料引張試験で得られた応力度-ひずみ関係における弾性限界以降を、6折線で近似することによって求めた。その一例として、試験体GB-2の異形PC鋼棒の応力度-ひずみ関係の近似折線および、それによって測定ひずみを応力度に変換した各点を示す。除荷剛性は、材料引張試験より得られたヤング係数(表2)を使用した。接合部内2点の応力の差を、周長および検長110mm(図6における接合部内のPC鋼材に貼付したひずみゲージ位置の2箇所)で、以下引張側-a点および圧縮側-b点)で除して、接合部内局所PC鋼材附着

応力度とした。梁部材角1.6%から2.3%に変形が進んだ際、接合部内局所PC鋼材附着応力度は、7.5(MPa)から16.0(MPa)に増大した。この時接合部内圧縮側-b点のPC鋼材引張力は減少した(図6のA-B)。これは、梁圧縮側のかぶりコンクリート圧壊による水平ひび割れ発生と同時に、梁主筋では接合部内圧縮側梁主筋の負担圧縮力は増大したことから、コンクリートの圧縮力低下分を梁主筋およびPC鋼材が負担したと考える。引張側-a点は梁部材角増大により単調に引張力は増大し、圧縮側-b点は圧縮側梁危険断面の負担圧縮力の増大の影響より引張力は減少した。このような理由により接合部内局所PC鋼材附着応力度は増大した。試験体SB-3も同様の傾向を示した。このことは、PC鋼材の附着性状が良好であることを示す。このように各試験体の柱梁接合部内のPC鋼材附着性状を把握し、後述する表3に示すように、実験による附着良否の判断材料として反映させた。

### 3.3 等価粘性減衰定数

図8に各試験体の梁の復元力特性より求めた等価粘性減衰定数 $h_{eq}$ と塑性率 $\mu$ の関係を示す。なお、太実線は提案する(13)式より算出した値で後述する。

ここで塑性率 $\mu$ を求めるために必要な降伏時変形は、剛性の急激な低下点と定義した。BY破壊(梁主筋及びPC鋼材の降伏)では、PC鋼材の降伏した点が降伏時変形に相当し、その直後の剛性は初期弾性剛性の6%以下であった。これに対してB破壊(梁端部コンクリー

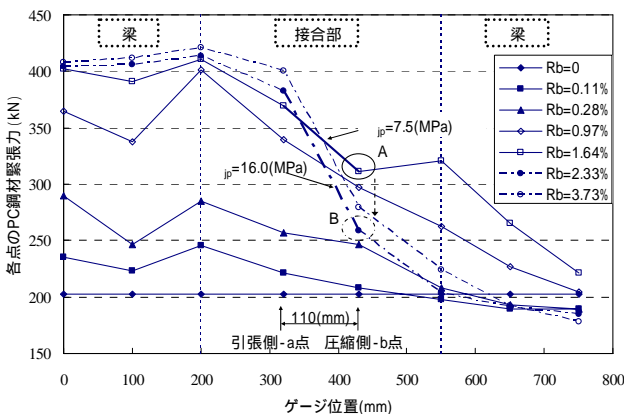


図6 試験体 GB-2 の PC 鋼材の緊張力分布

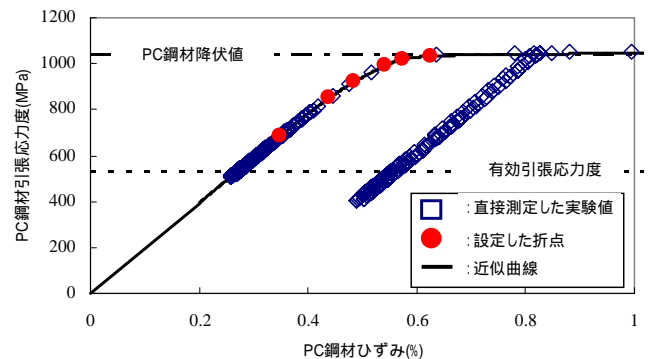


図7 試験体 GB-2 の PC 鋼材応力変換例

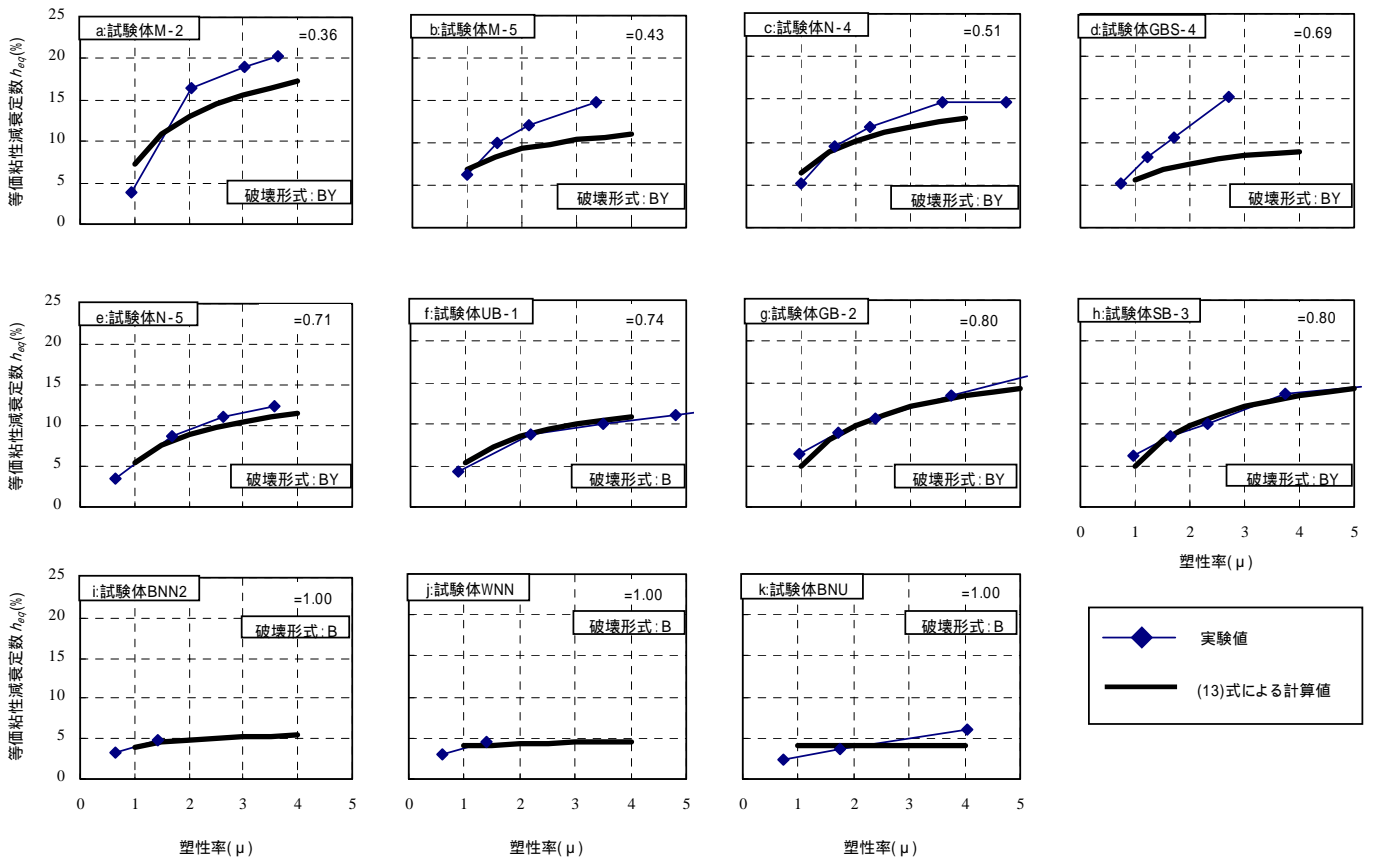


図8 等価粘性減衰定数 $h_{eq}$ -塑性率 $\mu$ 関係

トの曲げ圧縮破壊)では、明確な剛性急変点が見られなかったため、BY 破壊にならって接線剛性が初期弾性剛性の 6%以下になった時点を降伏時変形とした。

等価粘性減衰定数 $h_{eq}$ は梁せん断力-梁部材角関係の履歴より、同一変形での繰返し載荷時の第二サイクルのループより算出した。塑性率は各第二サイクルのピーク時変形を上述した降伏時変形で除した値を用いた。なお梁耐力が最大梁せん断力の 90%以下に低下した以降および塑性率 5 以降は図示していない。1 章で述べたようにエネルギー吸収性能に与える主要因は、梁の終局曲げ耐力に対するPC鋼材の寄与率、梁主筋の付着性状およびPC鋼材周りの付着性状の3要素が考えられる。梁の終局曲げ耐力に対するPC鋼材の寄与率(プレストレス率)に関して、図8よりが1(純PC構造)に近づくにつれ等価粘性減衰定数 $h_{eq}$ は小さくなることは定性的に判断できるが、梁主筋の付着性状およびPC鋼材周りの付着性状に関しては一概に判断できないので、次章で提案する(13)式と比較し、検討を行う。

#### 4. 等価粘性減衰定数の定式化

##### 4.1 PC鋼材付着指標の提案

PC鋼材周りの付着破壊界面は3つ存在する(コンクリート シース管表面、シース管内面 グラウトおよびグラウト PC鋼材のそれぞれのあいだ)。しかし本論文では破壊界面はグラウト PC鋼材間に限る。本論文で扱った試験体でのPC鋼材の付着破壊界面は、実験結果および単純引抜試験結果<sup>11)・12)</sup>と比較してグラウト PC鋼材間のみと判断したためである。また使用するシース管は#1000以上の

ふしの高さ、もしくは 1000 以下のふしの間隔を有するものとする。そこで、RC構造の梁主筋の接合部内付着性状をあらわす指標<sup>3)</sup>を準用し、PC鋼材付着指標として $B_{prt}$ を以下のように定めた。

$$B_{prt} = \frac{u_{b,av,pt}}{u_{,pt}} \quad (9)$$

ここで、

$u_{b,av,pt}$  : 接合部内梁 PC 鋼材が柱面の一端で引張降伏し、他端では有効引張力を保持するとした時の応力差から求めた接合部内平均付着応力度で、次式による。

$$u_{b,av,pt} = \frac{(\sigma_{py} - \sigma_{pi}) \cdot d_{b,pt}}{4D_c} \quad (10)$$

ここで、 $\sigma_{py}$  : PC鋼材降伏応力度

$\sigma_{pi}$  : 有効引張応力度

$d_{b,pt}$  : PC鋼材の公称直径

$D_c$  : 柱せい

$\tau_{u,pt}$  : 梁 PC 鋼材の柱梁接合部内の付着強度で以下による。

$$\text{異形 PC 鋼棒} : \tau_{u,pt1} = 0.7 \left( 1 + \frac{\sigma_0}{\sigma_G} \right) \sigma_G^{2/3} \quad (11)$$

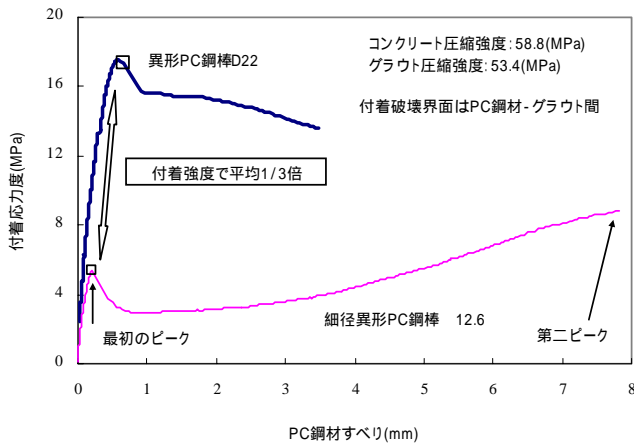


図9 PC鋼材付着応力度-すべり関係<sup>(12)</sup>

$$PC \text{ 鋼より線, 細径異形 PC 鋼棒: } \tau_{u,pt2} = 1/3 \cdot \tau_{u,pt1} \quad (12)$$

ここで、 $\sigma_o$ : 柱軸応力度

$\sigma_G$ : シース管内に注入したグラウト材の圧縮強度

異形PC鋼棒の付着強度((11)式)は、RC構造の梁主筋の場合<sup>(9)</sup>を準用したもので、コンクリート圧縮強度の代わりにシース管内に注入したグラウト材の圧縮強度を用いる。次に、文献(12)より細径異形PC鋼棒の単純引抜き試験結果の例を図9に示す。細径異形PC鋼棒は付着応力度の2つのピークを有する。しかし柱梁接合部内のPC鋼材のすべりを考慮すると、最初のピーク時と比較し検討することが妥当と考え、本論文では最初のピークを用いて考察した。文献(11)~(13)の単純引き抜き試験を比較して、PC鋼より線と細径異形PC鋼棒は同程度の付着性能を有する。また図9より異形PC鋼棒の最大付着応力度と細径異形PC鋼棒の最初のピーク時の最大付着応力度を比較すると、細径異形PC鋼棒は異形PC鋼棒の1/3倍である。柱梁接合部内においても、異形PC鋼棒と細径異形PC鋼棒およびPC鋼より線の最大付着応力度の比率は変化しないと考えるので、(11)式を1/3倍して(12)式とした。

図10に例として、PC鋼材にD22を使用した試験体GB-2とPC鋼材に細径異形PC鋼棒10.7を使用した試験体N-4におけるPC鋼材の柱梁接合部内局所付着応力度と柱梁接合部内引張側ひずみ(図5で示したPC鋼材に貼付したひずみゲージの出力)の関係を示す。なお、図6に示した試験体GB-2の上配筋されたPC鋼材は、大変形時まで付着応力度の減少が見られなかったため、付着良好と判断できた。一方、同試験体の下配筋されたPC鋼材の付着応力度

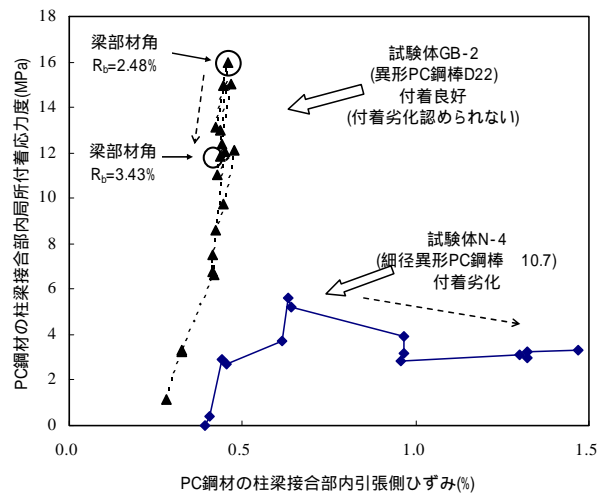


図10 PC鋼材の接合部内局所付着応力度-接合部内引張側ひずみ関係

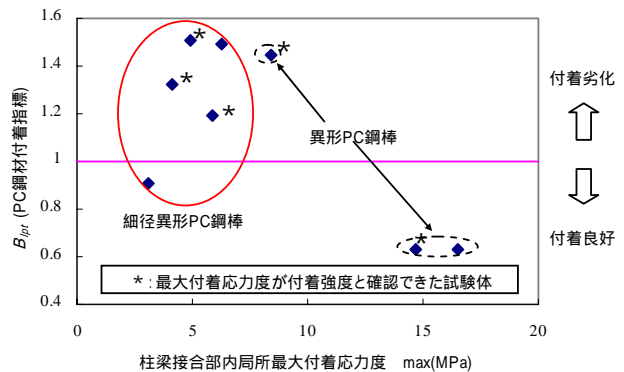


図11 PC鋼材の付着指標-柱梁接合部内局所最大付着応力度

は、最大付着応力度以降から付着応力度の減少が見られたので、付着良否の検討が必要であり、図10に示した。異形PC鋼棒のD22は、図中のように、梁部材角が2.48%時で最大付着応力度に達した後、梁部材角が3.43%時では接合部内引張側ひずみが減少すると共に、付着応力度が減少している。これは異形PC鋼棒の付着強度まで達していないことを表しており、付着が良好であると判断した。細径異形PC鋼棒は、最大付着応力度に達した後ひずみも増大し、付着応力度は減少した。これより、付着劣化が生じたと判断した。

図11にアンボンドPCを除く全試験体のPC鋼材の付着指標 $B_{pt}$ と実験で得られた柱梁接合部内局所最大付着応力度の関係を示す。

表3 各試験体の梁主筋とPC鋼材の付着指標( $B_f, B_{pt}$ )と付着良否および計算に用いた値の一覧

	N-4	N-5	M-2	M-5	UB-1	GB-2	SB-3	GBS-4	BNN2	WNN	BNU	S15.2-O <sup>(14)</sup>	S17.8-O <sup>(14)</sup>	
$B_f$	0.69	0.53	0.58	0.86	0.47	0.47	0.47	0.75						
$B_{pt}$	1.17	1.18	0.92	1.51		0.63	0.63	1.49	1.45	1.63		2.41	3.38	
実験による付着良否	劣化	劣化	測定不能	劣化		良好	良好	測定不能	劣化	測定不能		判別無	判別無	
$f_{yk}$ (MPa)	1350		1375	1420	1042			1420	1014	1795	1014	1830	1850	
$f_{yk}$ (MPa)	741	676	833	768	557	536	536	720	290	1001	573	1272	1163	
$d_{b,pt}$ (mm)	10.7		9.2	12.6	22			12.6	32	12.4	32	15.2	17.8	
$D_c$ (mm)	350											300		
$\sigma_c$ (MPa)	7.59						65.3			54.0			3.91	
$\sigma_c$ (MPa)	56.4												38.1	40.3

$f_{yk}$ : PC鋼材降伏応力度,  $f_{yk}$ : 有効引張応力度,  $d_{b,pt}$ : PC鋼材の公称直径,  $D_c$ : 柱せい,  $\sigma_c$ : 柱軸応力度,  $\sigma_c$ : シース管内のグラウト材の圧縮強度

$B_{prt}$ が1以上では付着劣化, 1未満では付着良好と判定される。図中の\*は、実験で得られた最大付着応力度が付着強度と確認できた試験体を示す。図11より柱梁接合部内局所最大付着応力度が大きいとPC鋼材付着指標 $B_{prt}$ が小さくなる, つまり付着性能が良好である傾向を示した。提案したPC鋼材の付着指標 $B_{prt}$ の可否を以下の表3と合わせて検討する。

表3に本論文で使用した試験体の梁主筋付着指標 $B_i$ と(9)式から得られるPC鋼材付着指標 $B_{prt}$ と, 前述した方法によって定めたPC鋼材の実験による付着良否の評価および計算に用いた値の一覧を示す。なおPC鋼材に貼付したひずみゲージが, 繰返し载荷によるグラウトとの摩擦やPC鋼材の引張による急激な伸びによって不具合を生じて, 信頼性のある測定値を得られなかった場合は, 測定不能とした。また後述する文献(14)の試験体2体の $B_{prt}$ を合わせて示す。実験によるPC鋼材の付着良否は6体の試験体で判別できた。試験体数は少ないもののこれらの結果から, (9)式によるPC鋼材付着指標 $B_{prt}$ によって, 柱梁接合部内のPC鋼材に沿った付着良否を判定できると考える。

#### 4.2 等価粘性減衰定数の定式化

RC~PRC~PC構造の十字形部分架構における梁部材の等価粘性減衰定数 $h_{eq}$ を統一的に評価するため, 以下を提案する<sup>注1</sup>。

$$h_{eq} = 0.09 - 0.05\lambda + \left( \frac{0.1(1-\lambda)}{B_i^2} + \frac{0.1 \cdot \lambda \cdot c}{B_{prt}^2} \right) \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right) \quad (13)$$

ここで,  $c: 0.4$ とする。また, アンボンドPC鋼材を用いた場合にはPC鋼材付着指標 $B_{prt}$ は定義できないので,  $\frac{0.1 \cdot \lambda \cdot c}{B_{prt}^2}$ の項は, 省略する。

図12に対象試験体の塑性率が1のときの等価粘性減衰定数 $h_{eq}$ と

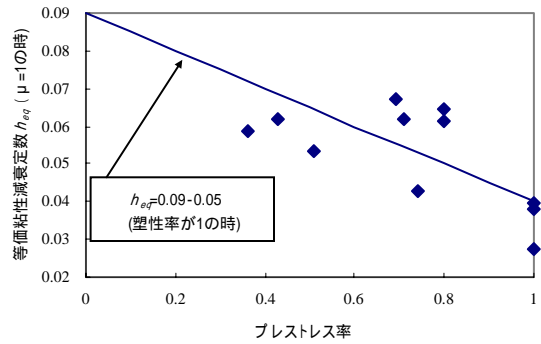


図12 塑性率が1の時の等価粘性減衰定数 $h_{eq}$ -プレストレス率 関係

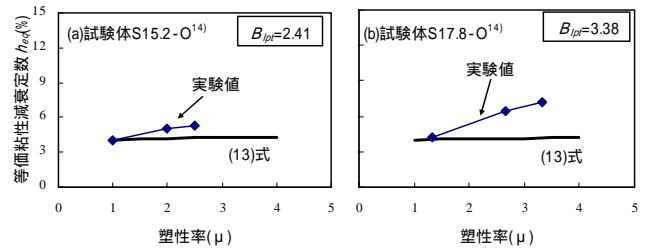


図13 等価粘性減衰定数 $h_{eq}$ -塑性率 $\mu$ 関係 (文献(14)と(13)式の比較)

プレストレス率 の関係を示す。RC構造( $\lambda=0$ )の場合の等価粘性減衰定数を(2)式の定数項である 0.09 とし, プレストレス率 を変数とし最小二乗近似法により, 塑性率が1のときの項(0.09 - 0.05)を定めた。梁主筋付着に関する項はRC構造の場合を準用した(2)式にプレストレス率 を考慮するための係数(1- )を乗じ用いた。PC鋼材周りの付着破壊界面をPC鋼材とグラウトとの間に限定したこ

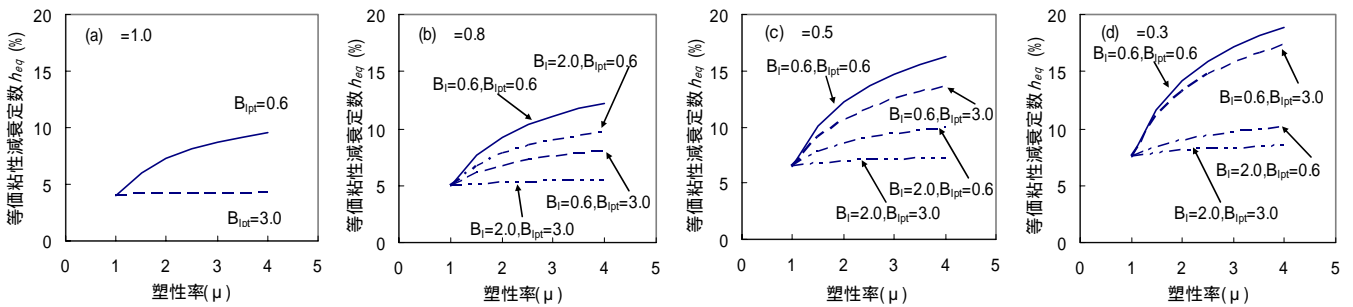


図14 等価粘性減衰定数 $h_{eq}$ -塑性率 $\mu$ 関係((13)式の感度解析)

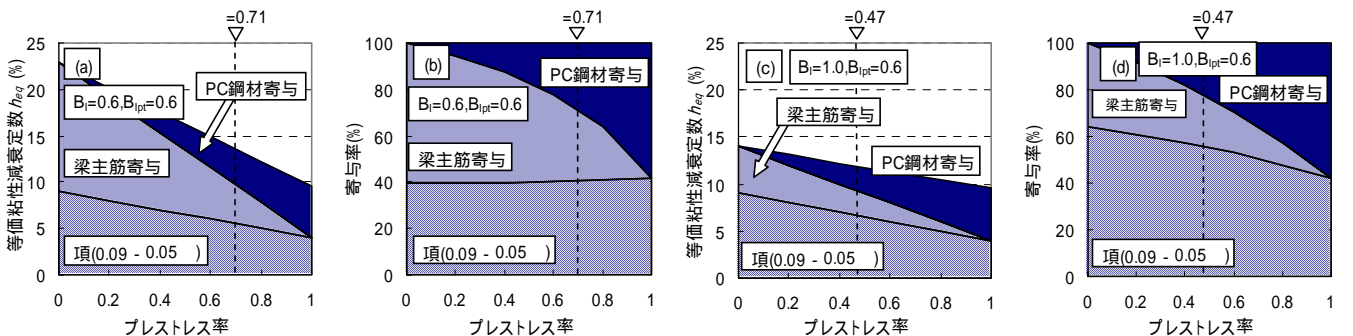


図15 塑性率 $\mu=4$ の時の等価粘性減衰定数 $h_{eq}$ -プレストレス率 関係および粘与率-プレストレス率 関係



とを前提として、PC鋼材付着に関する項は梁主筋の場合を準用した式にプレストレス率と係数 $c$ を乗じた。なお係数 $c$ は本論文では実験結果に適合するように、0.4とした。PC鋼材周りの付着破壊界面の違いにより係数 $c$ は変化すると考えられるが、今後の課題とする。次項にて実験値と提案式の比較を行う。

#### 4.3 実験値との比較

図8より対象試験体の等価粘性減衰定数 $h_{eq}$ の実験値と提案する計算値を比較した結果、試験体M-5( $=0.43$ )およびGBS-4( $=0.69$ )では、実験値と計算値に開きが生じた<sup>注2</sup>が、全体的に概ね良好に評価できる。PC構造( $=1$ )では、梁部材の等価粘性減衰定数 $h_{eq}$ の実験値は塑性率1.5以降得ることが出来なかった。そこで図13に柱梁十字形部分架構を対象としPC鋼より線を使用した足立・西山<sup>14)</sup>の実験結果と(13)式の比較を示す。実験<sup>14)</sup>では、変数の一つとしてPC鋼材の偏心距離があるが、履歴ループに差異はほとんどなかったため偏心距離105mmの試験体を採用した。PC鋼材に15.2mm7本より線を使用した試験体S15.2-Oは比較的良好に評価できたが、17.8mm19本より線を使用した試験体S17.8-Oの実験値と計算値は開きが生じた<sup>注3</sup>。しかしながら両試験体は、安全側に評価できた。

#### 4.4 提案式の感度解析

等価粘性減衰定数 $h_{eq}$ を求めるための提案(13)式の感度解析を図14および図15に示す。図14ではプレストレス率を1.0, 0.8, 0.5, 0.3とそれぞれ設定した。梁主筋付着指標 $B_f$ は、想定し得る最小、最大値をそれぞれ0.6, 2と設定し(文献(3)を参考に最小および最大値を設定した)、PC鋼材付着指標 $B_{prt}$ は対象とした試験体の範囲で最小0.6, 最大3として設定し、(13)式により等価粘性減衰定数 $h_{eq}$ を求めた。 $B_f$ と $B_{prt}$ の組合せにより4本図示した(ただし、 $=1.0$ の時は梁主筋がないため2本である)。実線は梁主筋およびPC鋼材の想定し得る付着が最良であり、等価粘性減衰定数 $h_{eq}$ は想定し得る梁部材の最大値を示す。定性的にはRC構造に近づく( $c$ が0に近づく)と、PC鋼材付着の寄与が減少することがわかる。

梁主筋およびPC鋼材の寄与が明確にわかるように、図15(a)に塑性率が4のときで、それぞれ $B_f=0.6$ ,  $B_{prt}=0.6$ を代入したときの等価粘性減衰定数 $h_{eq}$ とプレストレス率の関係を示す。図15(b)に図15(a)の各成分の寄与率(頂(0.09-0.05)), 梁主筋付着およびPC鋼材付着の寄与分)をそれぞれ示した。図15(c)に塑性率が4のときで、(13)式に $B_f=1.0$ ,  $B_{prt}=0.6$ を代入したときの等価粘性減衰定数 $h_{eq}$ とプレストレス率の関係を示す。図15(d)に図15(c)の各成分の寄与率を示した。図15(a), (b)および図15(c), (d)より、梁主筋付着寄与とPC鋼材付着寄与が同等になるのは $=0.71$ および $=0.47$ のときであり、それ以降から $=1.0$ に近づくPC鋼材付着寄与が梁主筋付着寄与より大きくなる。 $=1.0$ (純PC構造)で、 $B_{prt}=0.6$ (PC鋼材付着良好)のとき、等価粘性減衰定数全体に対して58.2%をPC鋼材付着寄与が占める。プレストレス率が0.5以上では、PC鋼材付着性状が梁部材の等価粘性減衰定数に与える影響は大きく、PC鋼材付着性状について無視できないことを示した。

#### 5. まとめ

プレストレス鉄筋コンクリート構造及びプレストレスコンクリート構造の梁曲げ破壊する平面十字形部分架構を対象とした繰返し載荷実験を基に、PC鋼材周りの付着指標を提案し、これを用いて梁部材の等価粘性減衰定数を評価する手法を提示した。その結果を以下にまとめる。

- (1) 提案した(9)式によってPC鋼材周りの付着指標は、PC鋼材とグラウトとの間の付着性状を概ね表現できることを、実験による柱梁接合部内での局所付着性状を検討することによって確認した。
- (2) RC~PRC~PC構造を包括して算出可能な梁部材の等価粘性減衰定数の評価手法を、プレストレス率、梁主筋付着指標およびPC鋼材付着指標を用いて(13)式に提案した。提案式は実験値と比較して概ね良好に等価粘性減衰定数を評価できた。なお、PC鋼材付着の寄与を調整するための係数 $c$ は、本研究に使用した試験体の実験結果に適合するように0.4としたが、PC鋼材の付着破壊界面が異なれば(コンクリートシース管表面およびシース管内面グラウトでの破壊界面)、係数 $c$ を再検討する必要がある。
- (3) 提案した(13)式の感度解析を行った結果、プレストレス率が0.5以上では、PC鋼材付着性状が梁部材の等価粘性減衰定数に与える影響は大きく、PC鋼材付着性状について無視できない。

#### 注

注1)提案した(13)式では、BY破壊(梁主筋及びPC鋼材の降伏)とB破壊(梁端部コンクリートの曲げ圧縮破壊)を共に対象とした。RC構造を含め、PRCとPC構造において梁端部コンクリートの曲げ圧縮破壊が生じる主要因として、プレストレス力(RC構造は除く)、柱梁接合部内を通し配筋された梁鋼材の付着性状およびコンクリート強度が挙げられる。これらの要因は付着指標に直接あるいは間接に考慮されている。そこで、本論文ではBY破壊とB破壊について各々実験結果の等価粘性減衰定数を再現できるように、評価式(13)を提案した。しかし、これらの関係をより精度良く考慮することは、今後の研究課題である。

注2)実験値と計算値に乖離が生じた試験体M-5とGBS-4に関して、試験体M-5の柱梁接合部内の梁主筋付着応力度は大きく、その時の梁主筋すべりが大きかった<sup>15)</sup>。この点で、他の試験体と異なる現象があったが、等価粘性減衰定数 $h_{eq}$ の実験値と計算値の乖離の原因解明まで至っておらず不明である。試験体GBS-4は、3本のPC鋼材が縦に並んで梁断面に配筋されており、中央のPC鋼材はアンボンドで上下のPC鋼材はグラウトが注入されている特殊な梁断面を有す。そのため上下のPC鋼材は降伏したが中央のPC鋼材の降伏は認められなかった。このように、特殊な試験体であるため、損傷の過程が複雑なことから合わせ、さらに検討する必要がある。

注3)本論文では、一般的に使用され研究の多かったPC鋼7本より線の付着性状を参考にPC鋼材付着指標 $B_{prt}$ を提案した。等価粘性減衰定数の実験値と計算値に乖離を生じた試験体S17.8-Oでは、PC鋼材としてPC鋼19本より線を使用した<sup>16)</sup>が、その付着強度は7本より線と異なることが文献(13)に指摘されている。以上から、PC鋼19本より線の $B_{prt}$ に関しては、さらに検討が必要と考える。

#### 参考文献

- 1) 吉田由美子, 中塚信, 巽英明: 圧着PC梁の荷重-変形関係と損傷状況との関連に関する実験的検討, プレストレスコンクリート技術協会第16回シンポジウム論文集, pp.233-238, 2007.10
- 2) 共同研究(建設省建築研究所, (社)建設業協会, (社)プレストレス・コンクリート建設業協会, (社)日本建設業経営協会, (社)日本建築構造技術者協会, 住宅・都市整備公団, (財)日本建築センター)「PC構造設計・施工指針の作成」最終年度研究報告書, -1, pp.71-81, 1999.3
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説,

2004

- 4) 内田龍一郎, 浜原正行, 末次宏光, 佐藤信夫, 大崎憲義: 接合部の影響を考慮した PC 梁の復元力特性, 日本建築学会構造系論文集, No.575, pp.105-112, 2004.1
- 5) 足立将人, 西山峰広: 緊張材の付着特性を考慮したプレストレストコンクリート圧着骨組の曲げ挙動に関する解析研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 532 号, pp.161-167, 2000.6
- 6) 隅田寛, 岸本一蔵, 李德基, 大野義照: PC 梁部材の残留変形率算定式, プレストレストコンクリート, vol.49, No.5, pp.80-89, 2007.9
- 7) 森山健作, 岸田慎司, 北山和宏, 丸田誠, 木村暁子: 圧着接合されたプレストレスト・コンクリート柱・梁接合部の力学性状に関する研究(その 1-その 3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造, pp.613-618, 2002.8
- 8) 北山和宏, 田島祐之, 岸田慎司, 宮崎裕ノ介: 付着性能に注目したプレストレスト鉄筋コンクリート(PRC)柱梁十字形部分架構の復元力特性に関する研究(その 1, その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造, pp.1-4, 2006.9
- 9) 北山和宏, 田島祐之, 矢島龍人: PRC 柱梁十字形部分架構の耐震性能評価に関する実験的研究(その 1-その 3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造, pp.157-162, 2008.9
- 10) 日本建築学会: プレストレスト鉄筋コンクリート(一種 PC)構造設計・施工指針・同解説, 2003
- 11) 真田暁子, 丸田誠: PC 鋼材種とグラウト種類が付着強度に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造, pp.571-572, 2003.9
- 12) 宮崎裕ノ介, 田島祐之, 北山和宏: シース管内の PC 鋼棒の付着強度に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造, pp.141-142, 2007.8
- 13) 是永健好, 渡辺英義: PC 鋼より線とグラウト材の付着特性評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造, pp.1083-1084, 1999.9
- 14) 足立将人, 西山峰広: プレキャスト圧着接合梁柱十字型骨組の履歴挙動, コンクリート工学年次論文報告集, vol.19, No.2, pp.1329-1334, 1997
- 15) 田島祐之, 北山和宏, 岸田慎司, 木藤明義: プレストレスト鉄筋コンクリート(PRC)柱・梁十字型部分架構の耐震性能に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, vol.28, No.2, pp.343-348, 2006