

論文 柱へ圧着接合されたプレキャストコンクリート梁のエネルギー吸収能の向上法に関する研究

岡本 晴彦^{*1}・太田 義弘^{*2}

要旨：柱へ圧着接合されたPC梁の履歴吸収エネルギー能向上のための方法として、接合面においてPC鋼材のみならず、セメントグラウトによる付着を与えた普通鉄筋をシース内に配する梁を対象として地震荷重模擬載荷実験を行った。

実験結果から、この方法により吸収エネルギー増大効果が得られることを示した。曲げ降伏モーメントに対するPC鋼材並びに普通鉄筋の分担比と復元力特性を中心とした部材性状との関係を明らかにした。さらに、既往の履歴復元力モデルを本方法を採用する梁へ適用する際の適合性を調べ、改良する必要がある点を述べた。

キーワード：圧着接合，吸収エネルギー，履歴復元力モデル

1. はじめに

プレキャストコンクリートの柱と梁がプレストレスにより圧着接合される場合、その接合面においては通常、曲げ引張力負担鋼材としてPC鋼材のみが存在する。従って、その近傍の梁端部が降伏する場合、梁部材の荷重—変形関係はプレストレストコンクリート（以下、PCと略記）造としての特性が顕著に現われ、鉄筋コンクリート（RC）造のものとは比べて、除荷時残留変形が小さい一方、履歴吸収エネルギーの少ないものとなる。従って、この架構の地震時応答変位は同一条件下で設計されたRCのものより大になることが指摘されてきた。

この点の解決方策の一つとして柱・梁接合面において、PC鋼材のみならず緊張力を導入しない鉄筋（以下、普通鉄筋と記す）をシース内に配し、セメントグラウトによる付着を与えるものを引張鋼材として併用することが考えられる。しかし、シース内に配された普通鉄筋が圧着接合面を貫通する部材の荷重—変形関係をエネルギー吸収能の面から定量的に評価するための知見は充分でない。

本論では、このような方策を与えた柱・梁接

合面を有する梁に地震荷重模擬載荷を行った実験結果に基づき、セメントグラウトによる普通鉄筋への付着付与に関連する事項と共に、断面仕様とエネルギー吸収能向上効果の関係を述べる。さらに、普通鉄筋がコンクリートとの直接的付着を与えられた場合のPC部材に対して提案された既往の復元力特性モデルの、この接合面を有する梁への適合性について調べる。

2. 実験計画

2.1 試験体計画

試験体一覧を表1に、試験体図を図1に示す。試験体はプレキャスト柱と同梁が幅 15mm のモルタル目地を介して圧着接合されたものである。接合面においてはシース内に配されセメントグ

表1 試験体一覧

Specimen No.	Number of Reinforcing bar through the joint of beam and column	Distance of strand from center of section (mm)
CBR1	2	0
CBR2	4	0
CBR3	6	0
EBR2	4	80

* 1 (株) 竹中工務店技術研究所 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

* 2 (株) 竹中工務店技術研究所 研究員 工修 (正会員)

ラウトの注入されるPC鋼より線と、別のシース内に配され同様にセメントグラウトの注入される普通鉄筋とがある。全試験体において、PC鋼より線の本数と径は同じ(2-φ12.7mm)であり、試験体 No. CBR1, CBR2, CBR3 ではPC鋼より線は梁断面せい中央に配し、縁近傍に配した普通鉄筋量を試験体間で変化させた。No. EBR2 ではPC鋼より線と普通鉄筋の双方を縁近傍に配した。導入時におけるPC鋼材の導入プレストレス力は公称降伏引張力の80%とした。

2.2 使用材料

表2と表3に用いた材料の種別と材料試験結果(コンクリート, セメントグラウト, モルタルは試験体加力実験時材令のもの)を示す。

3. 加力・測定計画

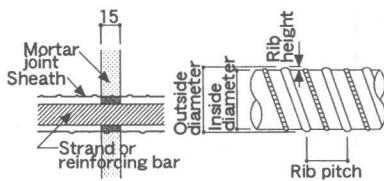
図2に加力装置を示す。梁のせん断スパン比を3.0とし、地震荷重を模擬した正負繰返し曲げせん断加力を行った。与えた載荷履歴は図3のとおりである。同一制御変位(または荷重)において3回の繰返し載荷を実施した。歪ゲージにより、PC鋼より線と普通鉄筋の歪を測定した。

4. 実験結果と考察

表4に主要実験結果一覧を、図4に梁せん断力と部材角の関係を示す。

4.1 破壊経過

各試験体共に、部材角 $R = 0.5 - 0.7 \times 10^{-2}$ の



シース
接合面
詳細

	Sheath		
	O.D./I.D.	Rib height	Rib pitch
for 1-Strand	φ 32/28	1.5	28
for 2-Strand	φ 40/43	1.5	28
for Reinforcing bar D16	φ 27/23	1.5	28

(Unit: mm)

表2 使用材料の性質(鋼材)

Reinforcing bar ²⁾	Diameter	Modulus of elasticity	Yield stress	Tensile strength	Elongation
		×10 ⁵ MPa	MPa	MPa	%
D6	D6	1.98	390	577	17.12
	D10	1.91	372	548	18.36
	D16	2.04	360	543	22.27
Strand ³⁾	12.7φ	2.26	1794 ¹⁾	1933	6.40

1) corresponding to 0.2% offset strain (0.996×10⁻²)

2) Reinforcing bar: Deformed bar D10(SD345), D16(SD295A)

3) Strand: 7-wire strand, SWPR7B

表3 使用材料の性質(コンクリート等)

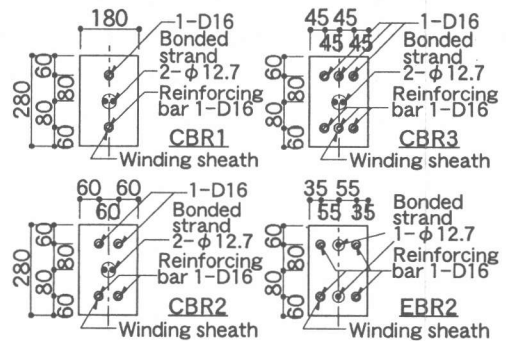
	Compressive strength	Strain at compressive strength	Modulus of elasticity	Tensile strength
	MPa	%	×10 ⁴ MPa	MPa
Concrete	40.5	0.203	2.89	3.09
Joint mortar	64.5	—	—	—
Cement grout	39.1	—	—	—

At the time of the specimens loading

Concrete: Normal weight concrete

Joint mortar: Pre-mixed type

Cement grout: w/c=43%, Non admixture was used



Section at the beam-column joint

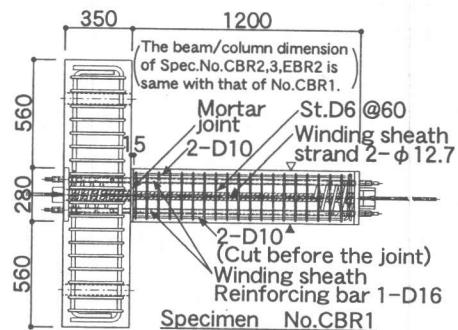


図1 試験体図

とき柱・梁接合面位置の普通鉄筋が降伏歪に達した。その後、梁端部においてコンクリートが圧壊した後、 $3.0 - 4.0 \times 10^{-2}$ の部材角時に最大耐力に到った。最終破壊形式は曲げ破壊である。

4.2 曲げ耐力実験値と計算値の比較

表5に実験における最大耐力と曲げ降伏計算値を示す。降伏耐力計算法は同表脚注に示す慣用的方法であり、普通鉄筋とPC鋼材の双方が降伏歪に達しているとしている。本断面仕様では、普通鉄筋がシース内に配され、セメントグラウトを介してコンクリートとの付着がなされている。従って、普通鉄筋の付着は直接的付着がコンクリートとの間で与えられる場合に比べ、劣るものになる可能性も予測された。しかし、表5の最大耐力実験値が降伏耐力計算値の10-20%大であること、また、前節で記したように歪ゲージ測定結果から、梁部材角 $R = 0.7 \times 10^{-2}$ までに普通鉄筋は降伏歪に達していることから、シース内に配され、セメントグラウトによる付着が与えられた場合でも、これによる顕著な付着低下は生じていないと判断できる。

4.3 梁せん断力と部材角の関係

(1) 概要

図4に実験結果の梁せん断力と梁部材角の関係を示す。梁の変形は柱面を基準とした変形を測定した。プレストレスの度合の指標であるブ

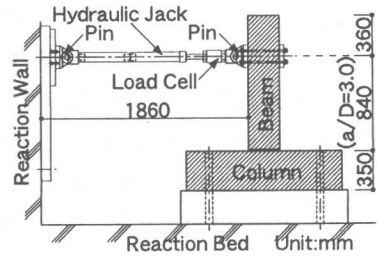


図2 加力装置

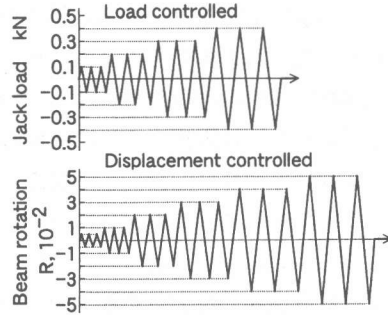


図3 載荷履歴

表5 計算値と実験値の比較

試験体	初期剛性 kN/×10 ⁻²		離間荷重 kN		降伏耐力 kN	最大耐力 kN
	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値
CBR1	427.66	327.55	13.29	19.22	60.79	67.47
			-13.29	-19.71	-60.79	-64.33
CBR2	427.66	325.01	13.25	16.97	72.64	83.16
			-13.25	-16.48	-72.64	-85.22
CBR3	427.66	351.34	13.34	17.65	83.81	101.60
			-13.34	-17.06	-83.81	-98.46
EBR2	427.66	317.83	13.36	16.77	72.64	84.73
			-13.36	-16.28	-72.64	-83.75

降伏耐力計算値: 曲げ降伏計算値, $k_1 k_3 = 0.85$

$k_2 = 0.5$

離間荷重: 曲げモーメントにより接合面が離間するときの荷重

表4 実験結果一覧

試験体	離間開始時 (目視)		離間開始時 (鉄筋ひずみ)		梁一般部 初ひびわれ時		コンクリートの 圧壊発生時		貫通普通鉄筋 の降伏時		PC鋼材 の降伏時		Q-R関係上 の降伏時		試験体の 最大耐力	
	Q	R	Q	R	Q	R	Q	R	Q	R	Q	R	Q	R	Q	R
	kN	×10 ⁻²	kN	×10 ⁻²	kN	×10 ⁻²	kN	×10 ⁻²	kN	×10 ⁻²	kN	×10 ⁻²	kN	×10 ⁻²	kN	×10 ⁻²
CBR1	27.95	0.105	19.22	0.056	37.66	0.213	60.21	1.018	53.35	0.557	65.31	4.851	55.02	0.596	67.47	4.016
	-27.56	-0.107	-19.71	-0.057	42.17	-0.295	-57.76	-0.920	-50.80	-0.531	-59.23	-4.738	-53.06	-0.589	-64.33	-2.999
CBR2	29.13	0.114	16.97	0.051	45.41	0.315	70.61	0.903	62.27	0.592	—	—	62.27	0.592	83.16	3.037
	-30.89	-0.127	-16.48	-0.047	-46.09	-0.289	-75.71	-1.009	-63.84	-0.546	—	—	-69.24	-0.621	-85.22	-2.995
CBR3	26.28	0.087	17.65	0.050	33.93	0.140	52.96	0.312	79.44	0.663	96.99	4.664	81.99	0.697	101.60	4.002
	-30.30	-0.110	-17.06	-0.043	-38.93	-0.178	-57.37	-0.401	-75.02	-0.575	—	—	-85.52	-0.725	-98.46	-4.016
EBR2	26.38	0.101	16.77	0.049	31.58	0.150	56.88	0.473	65.41	0.652	81.40	1.849	72.28	0.785	84.73	3.011
	-29.22	-0.133	-16.28	-0.050	-30.40	-0.145	-72.38	-0.806	-65.51	-0.589	-80.42	-1.883	-73.06	-0.740	-83.75	-3.992

レストレッシング係数 λ 並びにPC鋼材による曲げ降伏モーメント分担比 β （定義を表6注に示す）を本試験体について表6に示す。 λ と β は同じ主旨の指標であるが、以下では物理的に一般性の高い β により表わす。本実験では、 β は0.47から0.74の間である。また、図5では著者らによる既発表報告¹⁾における試験体No. BH3の結果とNo. EBR2のものを比較して示す。No. BH3は図6に示すようにNo. EBR2から普通鉄筋を除去したものに相当する($\beta=1.0$)他は、両試験体は载荷履歴を含めて同一である。

これらの図から、本方法のように接合面においてシース内に普通鉄筋を挿入する場合でも、 β 値により基本的に部材の復元力特性をRC($\beta=0$)に近いものから純PC($\beta=1.0$)に近いものまでを連続的に把握できることがわかる。

(2) 変形復元性

図7は変形残留率 $[(\text{除荷時残留変形 } R_r)/(\text{経験最大変形 } R_m)]$ と経験最大変形との関係を、同一制御変形における繰返しループのうち、3回目ものについて示す。図には比較のため前記の $\beta=1.0$ の試験体No. BH3のものも示す。 $\beta=0.74$ のNo. CBR1の残留変形率は $\beta=1.0$ の場合とほぼ同等である。 $\beta \leq 0.58$ の試験体の場合には、部材角 $R \geq 1.0 \times 10^{-2}$ においてRC的傾向が顕著となり残留変形が大きくなっている。

(3) 等価粘性減衰定数 $h_{e,q}$

図8に実験から得られた等価粘性減衰定数 $h_{e,q}$ と部材角の関係を示す。 $h_{e,q}$ は同一制御変形における繰返しループのうち、3回目ものに

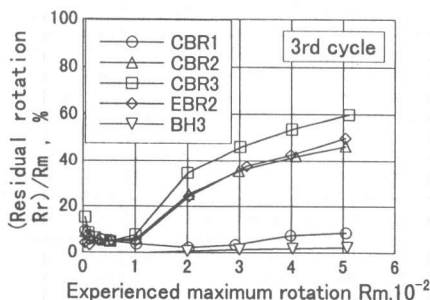


図7 変形残留率と経験最大変形

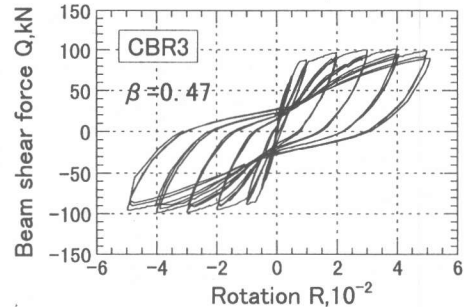
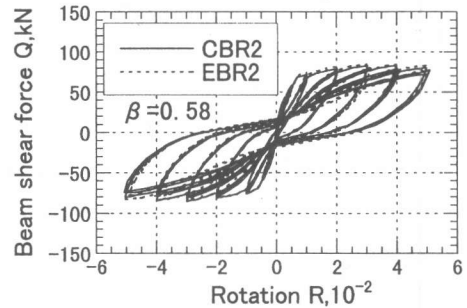
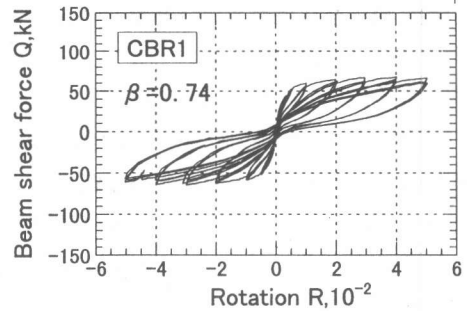


図4 梁せん断力と部材角の関係

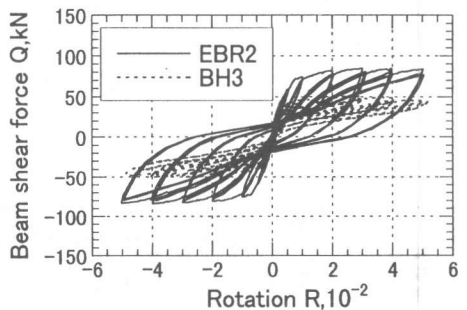


図5 梁せん断力と部材角の関係

表6 試験体の λ と β

試験体 No.	λ	β
CBR1	0.83	0.74
CBR2	0.71	0.58
CBR3	0.62	0.47
EBR2	0.71	0.58

$$\lambda = a_p \sigma_{py} / (a_p \sigma_{py} + a_r \sigma_{ry})$$

$$\beta = M_{py} / M_y$$

a_p, σ_{py} : PC鋼材の断面積と降伏強度

a_r, σ_{ry} : 普通鉄筋の断面積と降伏強度

M_y : 断面の曲げ降伏モーメント

$$M_y = M_{py} + M_{ry}$$

M_{py} : PC鋼材の負担する曲げ降伏モーメント

M_{ry} : 普通鉄筋の負担する曲げ降伏モーメント

ついて求めた。図には $\beta=1.0$ の試験体 No. BH3 のものを併せて示す。部材角 $R \geq 1.0 \times 10^{-2}$ において試験体間の h_{eq} の違いが顕著となる。圧着接合面を有する部材において、シース内に配した普通鉄筋によって、 h_{eq} を大きくすることができ、エネルギー吸収能向上効果が得られる。また、No. CBR1 ($\beta=0.74$)の場合も $\beta=1.0$ のものより顕著に h_{eq} が大となっている。この試験体は図7に示した変形残留率が小さいことから、適切な β 値の設定によって、普通鉄筋によりエネルギー吸収能を向上させつつ、PC部材の高変形復元性という利点を保持することが可能であることがわかる。

4.4 既往の履歴復元力モデルの適合性

既往の履歴復元力モデルは、圧着接合面を有する梁への適合性検証が充分でない。さらに、本仕様のようにシース内に普通鉄筋も圧着接合面に存在する場合の検証は全く為されていない。ここでは、部材レベルでの代表的モデルとして岡本伸によるモデル²⁾、また、断面の曲率レベルのものとして西山によるモデル³⁾について実験値との比較を行う。両モデルの適用に際し、そのスケルトン曲線は実験値を内包するトリリニア曲線とした。

a. 岡本伸モデル²⁾

本モデルにおいて荷重—変形関係の傾きを決定する係数 α' は文献2)による推奨値、 $\lambda=0.3$ のとき $\alpha'=0.5$ 、 $\lambda=0.8$ のとき $\alpha'=0.85$ に基づき、 λ と α' の関係を線形と仮定して求めた。かつ、 λ として β 値を採用した。

図9に、試験体中において、 β が大(0.74)と小(0.47)のものであるNo. CBR1、No. CBR3のせん断力—部材角関係の本モデルによるものを実験結果曲線と比較して示す。 β が大きく普通鉄筋の影響が小さいNo. CBR1の場合は、実験値の残留変位が極めて小さい一方、モデル値の残留変位は大きく、現象を表現できていない。この傾向は、普通鉄筋の影響度の高いNo. CBR3においては小さくなっている。

図10に本モデルから得た等価粘性減衰定数

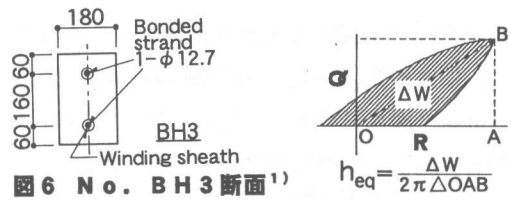


図6 No. BH3 断面¹⁾

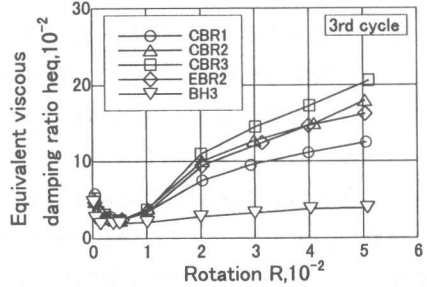


図8 等価粘性減衰定数と部材角の関係

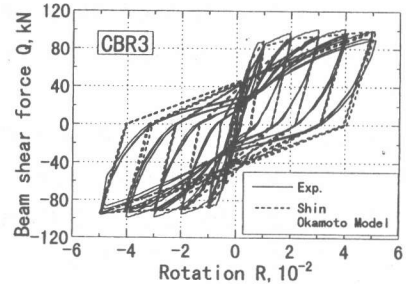
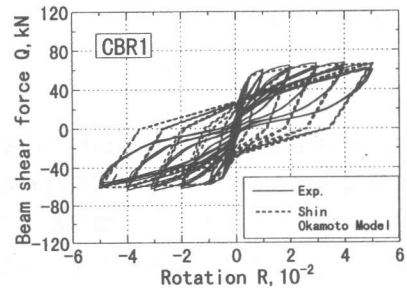


図9 梁せん断力と部材角の関係
——既往モデルと実験値

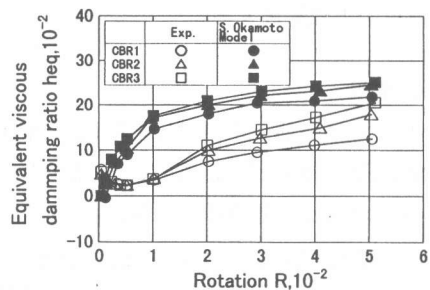


図10 等価粘性減衰定数と部材角の関係
——既往モデルと実験値

h_{eq} と部材角の関係を実験値と共に示す。本モデルによる h_{eq} はいずれの試験体についても実験値より過大である。本モデルについては、この点に対する履歴則の改善が必要である。

b. 西山モデル³⁾

本モデルによる梁端部における曲げモーメントと曲率の関係を実験値と比較して図11に示す。実験値の曲率は0.85x(梁せい)区間における平均曲率である。No. CBR1 ($\beta = 0.74$)の場合、本モデルは実験値の除荷時の高復元性を表現できていない。本モデルはP C鋼材の寄与が大きい範囲(本実験からは $\beta > 0.7$ 程度)において除荷時残留変位を過大に評価する点に対しての改良が必要である。

5. まとめ

柱・梁圧着接合面にP C鋼材のみならず、シース内にセメントグラウトによる付着を与えた普通鉄筋を配した梁について地震荷重模擬載荷実験を行った。次の事項を明らかにした。

- ① この方式による普通鉄筋の付加により圧着接合されたP C梁の履歴吸収エネルギーを増加させることができる。
- ② 適切なプレストレスレベルの設定により、P C部材の高変形復元性を保持しつつ、履歴吸収エネルギーを従来の方法による圧着接合の場合よりも向上させることができる。
- ③ 既往の履歴復元力モデルである岡本伸モデル並びに西山モデルは曲げ降伏モーメントに対するP C鋼材寄与率が高い場合において、残留変形を過大に評価する。

参考文献

- 1) 岡本晴彦他：プレキャストコンクリート柱・梁圧着接合面のせん断力伝達その1 その2，建築学会大会学術講演梗概集，C-2，No.23451，23452，pp.901-904，1997。
- 2) 岡本伸，加藤博人：P C造建物の地震応答性状，プレキャストコンクリート，Vol.33，No.4，pp.52-63，July，1991。

3) M.Nishiyama.et.al.:Seismic Response of Prestressed,Partially Prestressed and Reinforced Concrete Building Frames, FIP Symposium, Proceedings Vol.1, pp.65-72, 1993.

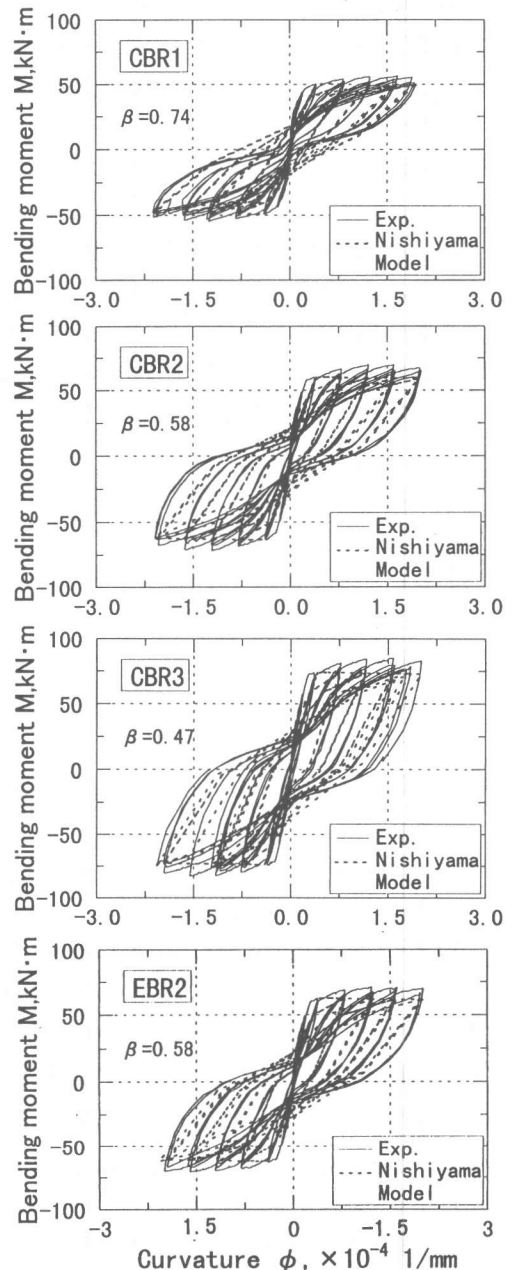


図11 曲げモーメントと曲率の関係
——既往モデルと実験値