

二方向の変形を考えた場合のPC柱断面の損傷程度に関する考察

近畿大学 学生会員

○米澤 哲尚

近畿大学 正会員 博士(工)

岸本 一蔵

Abstract : For compression zone concrete of cross sections of PC column, they suffer quite a severe condition because prestressing force and axial force are loaded in the same time. It is well known that heavily-axial load in the cross-section influence the flexural behavior of load-deformation relation of concrete members. In most of previous studies related to this issue, deformation patterns of cross-sections or test specimens considered were one-way direction. In this paper we carried cross-section analysis considering bi-directional deformation. It was found that in the case of larger axial force when total axial force is equal, deterioration of flexural strength of PC column become larger.

Key words : PC column, Cross-section analysis, Flexural strength, Bi-directional deformation

1. はじめに

プレストレストコンクリート(以下PCと略記)部材を建築物の柱に使用する場合、柱に作用する軸力に加えてプレストレス力がコンクリートに加わる。したがってその負担は鉄筋コンクリート部材の場合よりも大きく、さらにPC建物では大スパン構造で柱数が少なくなる傾向があるため、柱の設計には慎重な検討が必要となる。一般に、部材の曲げ挙動に関する研究は一方に力を作用させる場合の検討が主であり、二方向に力が作用する場合についての研究はほとんどない。そこで本論文ではプレストレストコンクリート柱断面を対象として、二方向に曲げモーメントを作用させる場合の断面解析を行い、曲げ耐力に及ぼす二方向変形の影響について検討した。

2. 解析方法

解析対象断面は、谷ら¹⁾が行った実験の試験体を参考に、**図-1**に示すように断面幅(b)×せい(D)が400×400(mm)の正方形断面とした。**表-1**に解析で用いた共通事項を示す。

解析のパラメータは全軸方向力比(プレストレス比 η_p (コンクリート全断面圧縮強度時耐力に対する初期導入力の比率)と軸力比 η_N の和)および解析時の変形(以下、変形履歴)とした。**表-2**に全軸方向力比の値を示す。同表に示すように全軸方向力比が同じ値で、プレストレス比と軸力比の比率が異なるモデルも設定した。全軸方向力比の大きさは、コンクリートの長期許容圧縮応力度と等しい値の0.33、およびより高軸力の0.45の2種類である。プレストレス比は谷らの論文と同じく0.1および0.2とした。ただし、プレストレス導入は、目標のプレストレス比になるようPC鋼材のみにひずみを与え応力を生じさせた。このため、解析初期時(断面曲率が0)ではプレストレス力および軸力により、軸方向にひずみが生じるため目標としたプレストレス比より小さくなる。**図-2**に変形履歴を示す。なお変形履歴は、主方向変形を R_x 、それに直交する方向の変形(以後、直交方向変形)を R_y とし、3サイクルの解析を行った。既往の研究^{2), 3)}では、二方向の変形履歴としていくつか提案がなされているが、本論文では二方向の変形を受ける柱の曲げ耐力を一方変形の際の耐力と比較しやすいことから**図-2**に示すような8の字型の履歴を用いた。解析を行った変形履歴一覧を**表-3**に示す($R_y=0$ の場合は、一方正負繰り返し履歴となる)。

断面解析は、断面を幅方向およびせい方向に分割し(各方向分割数100)、コンクリート、鉄筋およびPC鋼材をそれぞれバネに置換するファイバーモデルにより行った。解析では平面保持を仮定し、鉄筋

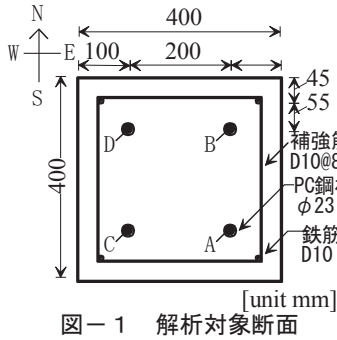


図-1 解析対象断面

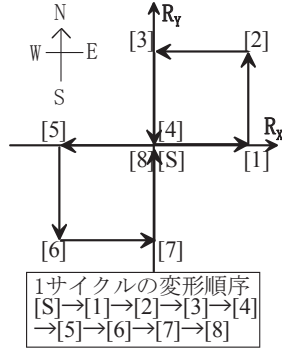


図-2 変形履歴

表-1 共通事項

条件	値
コンクリート圧縮強度	30N/mm ²
普通鉄筋降伏強度	295N/mm ²
普通鉄筋	D10
補強筋ピッチ	80mm
補強筋強度	295N/mm ²
補強筋	D10
サブタイ本数	0本
PC鋼材降伏強度	1080N/mm ²
PC鋼材径	23mm

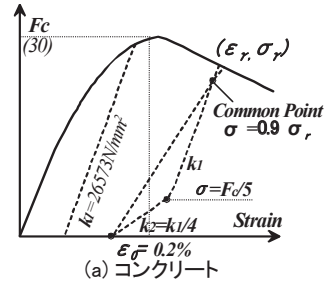
表-2 全軸方向力比のパラメータ

試験体名	$\eta_N + \eta_P$	η_P	η_N
B0.33-0.1	0.33	0.1	0.23
B0.33-0.2	0.33	0.2	0.13
B0.45-0.1	0.45	0.1	0.35
B0.45-0.2	0.45	0.2	0.25

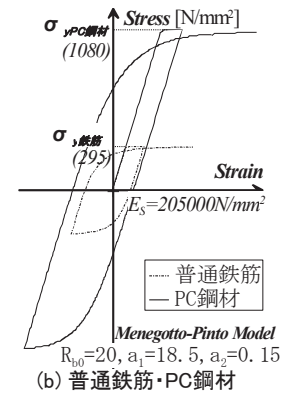
表-3 変形履歴の組み合わせ

		R_y				
		0	0.005	0.01	0.02	0.03
R_x	0.01	○	○	○	—	—
	0.02	○	○	○	○	—
	0.03	○	—	○	○	○

R_x :主方向変形, R_y :直交方向変形



(a) コンクリート



(b) 普通鉄筋・PC鋼材

図-3 材料の応力度-ひずみ関係

およびPC鋼材については、付着劣化によるコンクリートと鋼材間のすべりは無いものとした。各材料バネの履歴則は次に示すものとした。コンクリートの応力度-ひずみ度(S-S)は応力上昇域をn次関数、応力下降域を直線で近似するモデルを用い、補強筋で囲まれるコアコンクリートには拘束効果⁴⁾を考慮した。鉄筋およびPC鋼材のS-S関係はMenegotto-Pintoモデル^{たとえは5)}を使用し、繰返し応力を受ける場合のBauschinger効果を考慮したモデルを用いた(図-3)。

解析手順は各方向に曲率(主方向を ϕ_x 、それに直交する方向を ϕ_y とする)を与え、生じる外力と内力の不釣り合いが一定の値以下になるよう、軸方向のひずみを調整することで収れん計算を行った。また、解析では等価塑性ヒンジ長さをD(D:断面せい)とし、断面曲率にこれに乗ずることによりヒンジ部での変形角とした。

3. 解析結果と考察

3.1 主方向モーメント(M_x) - 主方向変形角(R_x) 関係

図-4に主方向のモーメント(M_x) - 主方向の変形角(R_x) 関係の一例を示す。ここでは各要因(全軸方向力比および変形履歴の違い)の影響の傾向について検討するため、全軸方向力比の低いB0.33-0.2と高いB0.45-0.2のシリーズについてのみ比較する。

一方向変形のみをうける場合($R_y=0$)を示す同図(a-1)~(b-2)より、 R_x の大きさにかかわらず、2、3サイクル目の耐力は、1サイクル目の耐力に近い値を示し、かつ M_x-R_x 関係も安定していることが分かる。これに対し、直交方向に変形する場合(同図(c-1)~(d-2))、一方向のみの場合に比べて、すべてのケースで、2、3サイクル目の主方向最大変形時の耐力は低下している。耐力低下程度は全軸方向力比の大きさおよび変形履歴の違いで異なっており、全軸方向力比が小さいB0.33-0.2の場合、主方向の変形が小さい($R_x=0.01$)c-1では2サイクル目以降の耐力低下は大きく、変形の大きい($R_x=0.02$)c-2では小さい。ただし、このときの M_x-R_x 関係は主方向の変形の大きさによらず2サイクル目、3サイクル目のループはほぼ同じ形状であり安定している。これに対して、全軸方向力比が大きいB0.45-0.2では、主方向変形が小さい($R_x=0.01$)場合には、全軸方向力比の小さいケースと同じく耐力低下は大きく履歴ループは安

定している。これに対して、主方向変形が大きい ($R_x=0.02$) 場合、耐力低下は大きく、2サイクル目よりも3サイクル目はさらに耐力が低下している。また履歴ループも不安定な形状となっている。以上の状況をまとめると表-4の様になる。

3.2 耐力低下の理由の検討

先に述べたように、主方向に直交する方向にも変形する場合、主方向変形のみの場合に比べて耐力は低下し、

その低下程度は全軸方向力の大きさや変形量によって異なった。低軸力かつ変形が小さいケース(表-4: Case(a))、高軸力かつ変形が大きいケース(表-4: Case(b))は共に耐力低下程度は大きい。履歴ループの安定性(2, 3サイクル目のループがほぼ同じ形状を示すか否か)の違いから低下原因が異なると考えられる。そこでCase(a)とCase(b)の耐力低下の原因について検討する。

(1) Case(a) (全軸方向力が低く、主方向変形が小さいケース)

部材の曲げ耐力は断面内に発生する引張(=圧縮)合力の大きさおよびそれらの応力中心間距離により決定される。全軸方向力が小さい場合や引張鋼材量が少ない場合、引張側の鋼材降伏が先行するため、引張側合力の大きさが曲げ耐力に直接影響する。そこで、低軸力比時に発生するCase(a)の理由を明らかにするため、主方向変形および直交方向変形が増加するときに引張となるPC鋼材(図-1のCのPC鋼材、以下 PC鋼材・Cと略記)の状態について検討する。

図-5にB0.33-0.2のPC鋼材・Cについて、主方向変形(R_x)が小さい($R_y=0.01$, 同図中(A))ケースと大きい($R_x=0.02$, 同図中(B))ケース(直交方向変位($R_y=0.01$)は同じ)の2サイクル目の最大変形時までのPC鋼材の応力(σ_{PC}) - R_x 関係、 σ_{PC} - PC鋼材のひずみ(ϵ_{PC})関係を示す。同図中の各履歴上に記す数字は、図-2で示す変形履歴の数値で示す状況と対応する。同図より、主方向変形が小さいケースでは、主方向変形が2サイクル目の最大となるときの(図-5(a-1)中[E])のPC鋼材応力(σ_{PC})が、1サイクル目(同

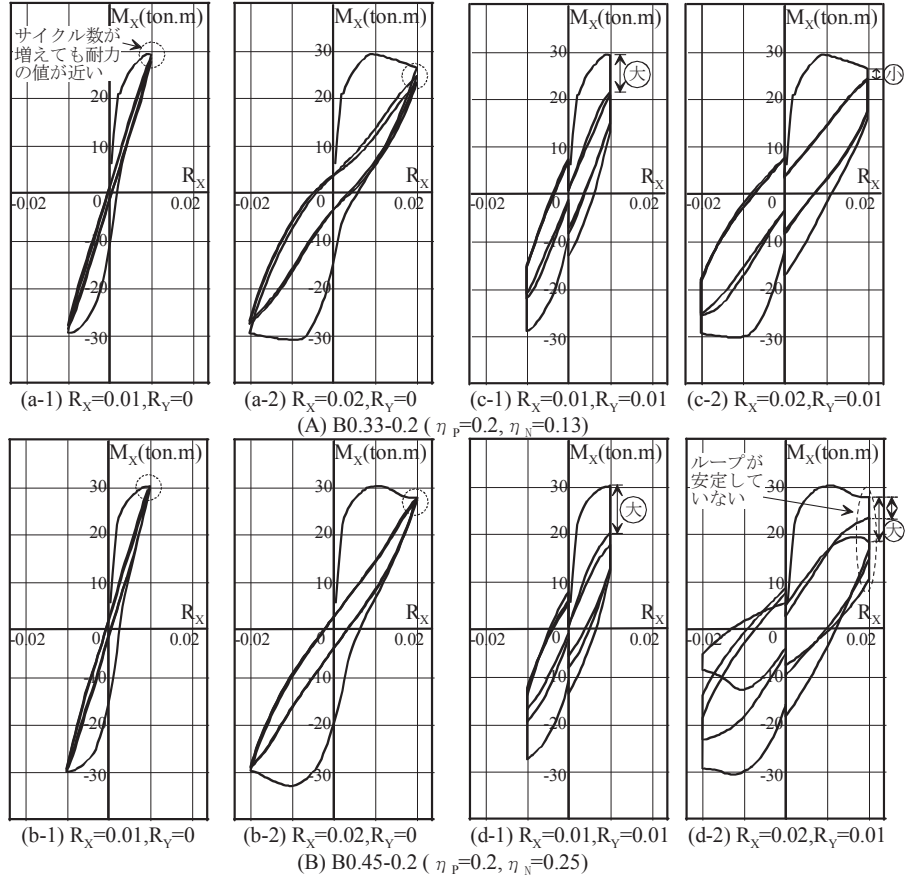


図-4 主方向のモーメント (M_x) - 主方向の変形角 (R_x) 関係

表-4 $R_y=0.01$ における M_x-R_x 関係へのパラメータの違いによる影響傾向

	B0.33-0.2		B0.45-0.2	
	0.01 ケース	0.02 ケース	0.01 ケース	0.02 ケース
耐力低下	大きい	大きい	大きい	大きい
履歴ループの安定性	安定	安定	安定	不安定
	Case(a)		Case(b)	

[1])の値よりも大幅に小さく、約半分程度の大きさとなっていることが分かる。同鋼材の $\sigma_{PC}-\epsilon_{PC}$ 関係を示す図-5(a-2)をみると、[1]→[2](直交方向変形が進む状況)ではPC鋼材は降伏し、塑性ひずみを受けている。そのためPC鋼材ひずみは、主方向最大変形時の1サイクル目と2サイクル目ではほぼ同程度の値となるにもかかわらず、2サイクル目の応力は大きく低下することになる。

一方、主方向変形が大きいケースでは、主方向変形が1サイクル目(図-5(b-1)中[1])と2サイクル目(同[E])のPC鋼材応力の差は小さいことが分かる。同鋼材の $\sigma_{PC}-\epsilon_{PC}$ 関係を示す図-5(b-2)をみると、主方向変形の小さいケースと

同じく[1]→[2](直交方向変形が進む状況)では塑性ひずみを受けているものの、主方向変形が大きいため1サイクル目と2サイクル目のPC鋼材応力の差は、主方向変形が小さい場合よりもかなり小さくなっている。以上の状況から、全軸方向力が小さく、主方向変形が小さい場合には直交方向変形による2サイクル目以降の耐力低下が大きくなることが判断できる。

(2) Case(b) (全軸方向力が高く、主方向変形が大きいケース)

図-6に、B0.45-0.2について変形履歴を($R_x=0.02, R_y=0$)と($R_x=0.02, R_y=0.01$)とした場合の、1サイクル目および2サイクル目の主方向最大変形時($R_x=0.02, R_y=0$)におけるコンクリートの断面応力度分布を示す。また、同時点での中立軸位置を図-7に示す。

図-6より、直交方向変形($R_y=0$)のケース(同図中(A))では、1サイクル目と2サイクル目の応力分布にはかぶり部分(補強筋による拘束がないコンクリート部分)にやや応力低下が見られること以外はあまり差がないことが分かる。これに対し、 $R_y=0.01$ のケース(同図中(B))では圧縮縁側の応力の大きさが小さくなっており、とくにかぶり部分ではコンクリートの応力が0となっていることが分かる。このため各サイクル時の中立軸位置を示す図-7が示すように、 $R_y=0.01$ の変形を与えた2サイクル目の中立軸位置は1サイクル目比べて深く、つまり引張側に移動している。これに伴い、圧縮合力の重心位置が引張側に移動するため、曲げ耐力が大きく低下することが分かる。

4. 耐力低下程度

3章での検討により、二方向変形を受ける場合の曲げ耐力低下のメカニズムについて明らかにした。ここでは表-3で示したすべての解析ケースについて、全体的な曲げ耐力低下の傾向を確認する。図-8に各シリーズの耐力比率を縦軸に、サイクル回数を横軸にとりて示す。耐力比率は「各サイクル時の主方向の最大耐力」を「1サイクル時の主方向の最大耐力」で除した値である。同図によれば主方向変形および直交方向変形が大きくなれば耐力比率は小さく、すなわち低下の程度は大きくなる傾向

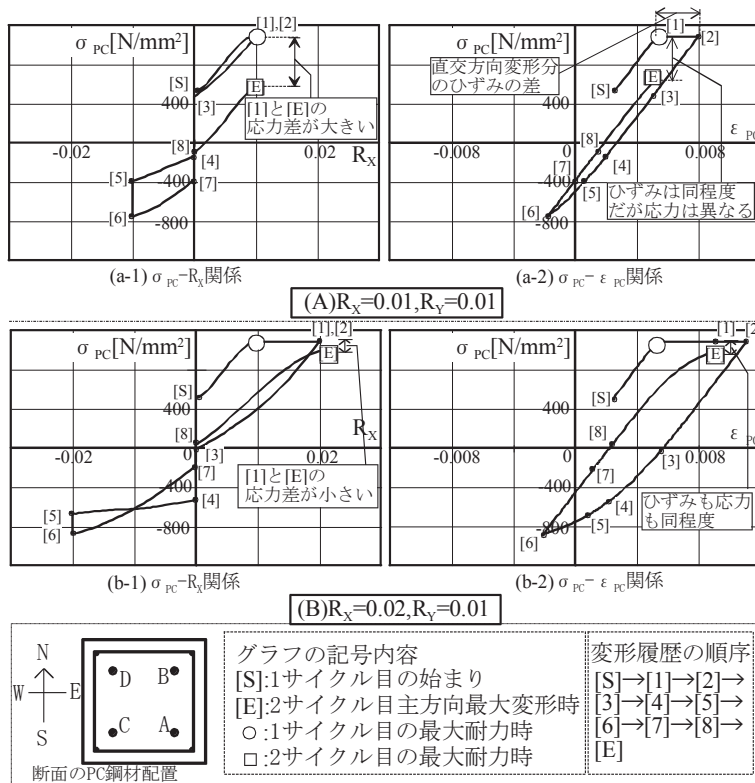


図-5 PC鋼材・Cの $\sigma_{PC}-R_x$ 関係、 $\sigma_{PC}-\epsilon_{PC}$ 関係(B0.33-0.2)

にあることが分かる。また、全軸方向力比が同じであれば、全軸方向力に占めるプレストレス力の割合が小さい (=軸力の割合が大きい) ケース (B0.33-0.1, B0.45-0.1) で、耐力比率は小さくなっている。

とくに主方向変形, 直交方向変形が大きいケースでは低下の程度は著しい。3章での検討からこのケースではコンクリートが大きなひずみを受けることによる耐力低下が原因と考えられるが、この場合の耐力低下程度はかなり大きいといえる。また同図中(c-3)で、直交方向変形の値によらず低下比率が同じでとなっているが、これは以下の理由による。(c-3)のケースは軸力比が非常に大きく、1サイクル目の解析時にコンクリートは大きなひずみを経験する。そのため、2サイクル目以降、コンクリートは圧縮応力を負担できなくなっており、直交方向の変形にかかわらず耐力低下程度はほぼ同じ値になったものと考えられる。

5. まとめ
全軸方向力比, 変形履歴の組み合わせをパラメータとして、ファイバーモデルによるPC柱断面の解析を行い、二方向の変形を考えた場合の繰り返し変形を受ける(2サイクル目以降)の断面曲げ耐力の低下程度に関して以下の知見を得た。

- 1) 全軸方向力比の大小, 変形程度の大小にかかわらず、二方向に変形させた断面の曲げ耐力は、一方向のみに変形させた場合の耐力よりも低下する。
- 2) 全軸方向力比が小さく、主方向変形程度が小さい場合の耐力低下はPC鋼材に発生する応力が低下するためであり、低下程度は大きい。ただし、2サイクル目以降のモーメント-変形角関係はほぼ同一の履歴を描き安定している。
- 3) 全軸方向力が大きく主方向変形程度が大きい場合、耐力低下程度は全軸方向力の大きさ, 変形程度の大きさに影響を受ける。この場合の耐力低下の原因はコンクリートが大きなひずみを受けることによるもので、繰り返し時のモーメント-変形角関係は安定しない。
- 4) 全軸方向力比の大きさが同じ場合、プレストレス比の割合が小さい場合 (=軸力比の割合が大きい) 耐力低下程度は大きい。

本論文では、PC柱の断面解析から二方向変形を受ける柱断面の曲げ耐力低下程度の傾向およびそのメカニズムについて検討したものであるが、具体的な低下程度についてはコメントしていない。これはコンクリート強度や補強筋によるコアコンクリートの拘束程度により大きく異なることが予想され

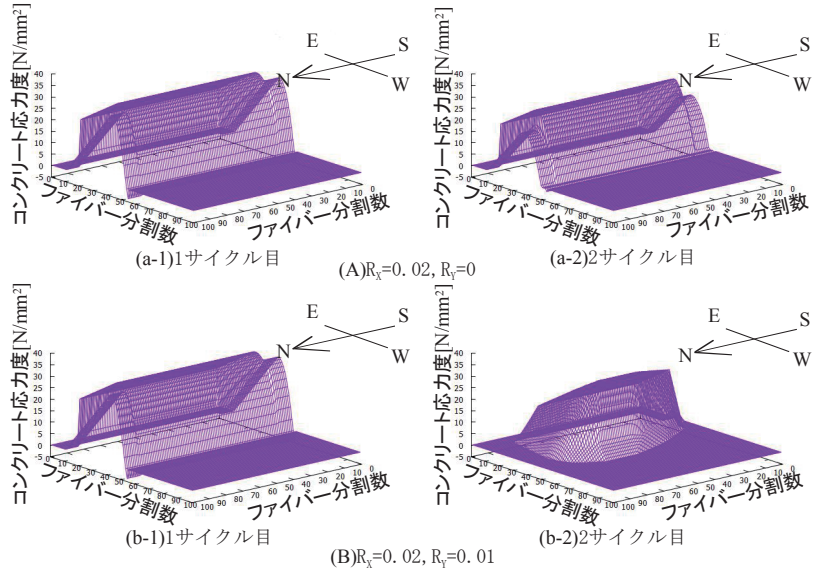


図-6 1・2サイクルの主方向最大変形時におけるコンクリート応力分布 (B0.45-0.2)

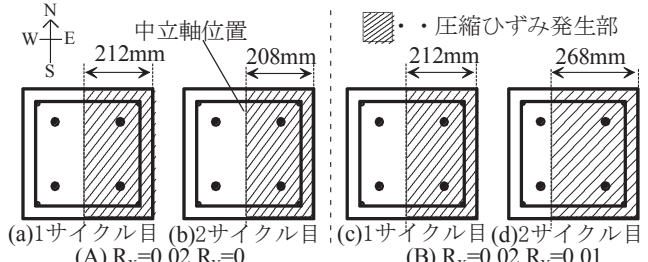


図-7 1・2サイクルの主方向変形時 ($R_x=0.02, R_y=0$) における中立軸位置 (B0.45-0.2)

るためであり、これらを含めた検討を今後の課題とする。

参考文献

- 1) 谷昌典, 西山峰広: プレキャストプレストレストコンクリート圧着柱の曲げせん断性状と変形性能, 日本建築学会構造系論文集, 第73巻, 第623号, pp103~110, 2008年1月
- 2) 佐藤幸博, 芳村学, 津村浩三: 2方向水平力を受ける鉄筋コンクリート柱の変形特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 2, pp653~658, 1994
- 3) 上原広, 南宏一: 繰返し2方向曲げ・せん断を受ける鉄筋コンクリート柱の弾塑性性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 11, No. 2, pp223~228, 1989
- 4) 日本建築学会: プレストレスト(鉄筋)コンクリート構造部材の設計法-現状と将来-, pp10-13, 2000
- 5) Filippou, F. C., Popov, E. P. and Bertero, V. V.: Effects of

Bond Deterioration on Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Joints, Report No. UCB/EERC-83/19, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, 1983.

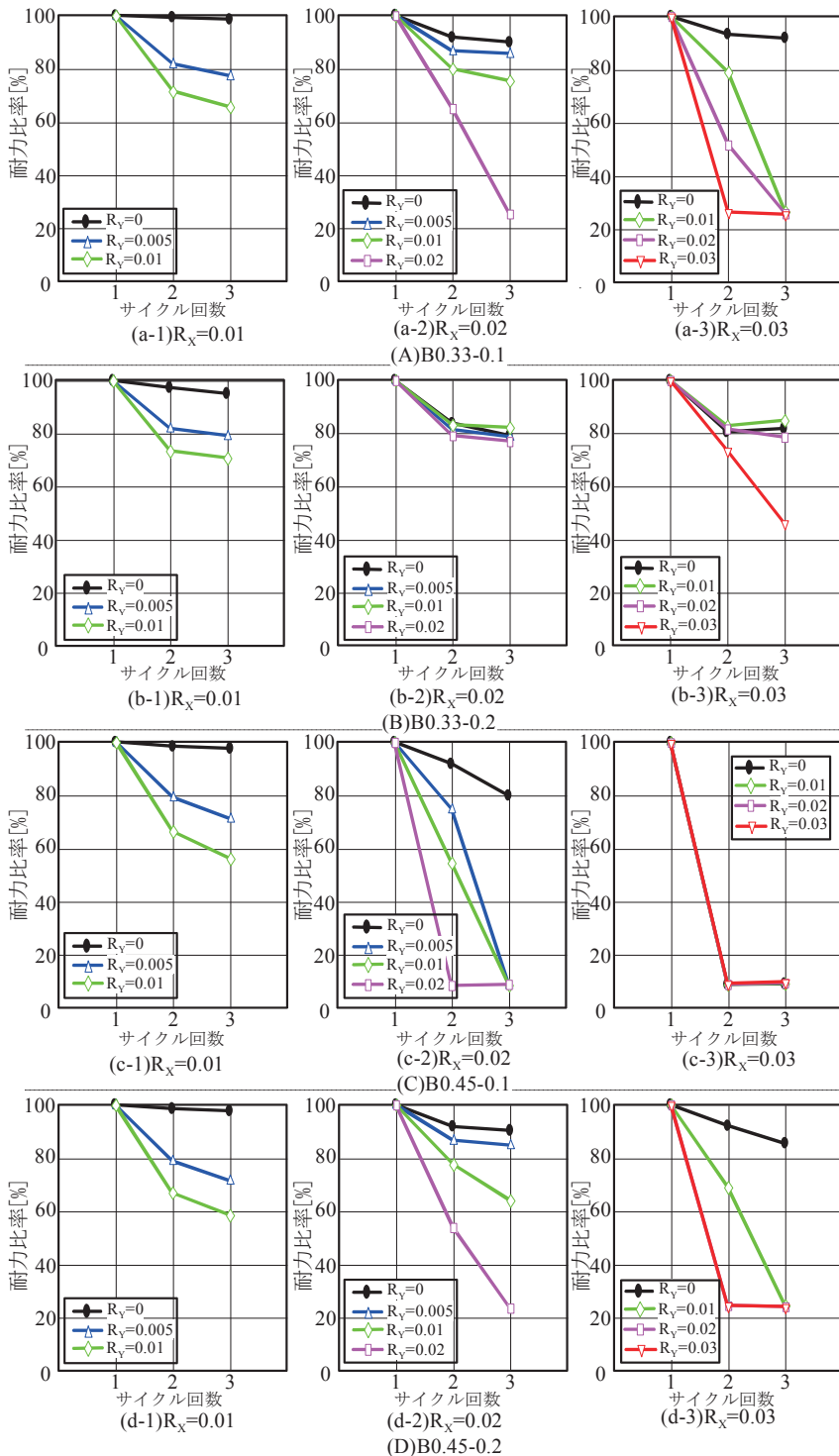


図-8 耐力比率-サイクル回数