

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

米澤 哲尚*1・岸本 一蔵*2

プレストレストコンクリート柱断面を対象に解析を行い、X、Yの二方向で繰返し変形を受ける場合の曲げ耐力低下程度、およびその理由を、各方向の変形の大きさ、全軸方向力比（軸力比とプレストレス比の和）をパラメータとして検討した。その結果、二方向に変形を受ける場合、一方向のみの変形の場合に比べいずれの条件でも曲げ耐力は低下し、変形が大きいほど、また全軸方向力比が大きいほど（とくに全軸方向力比が等しい場合、軸力比の割合が大きいほど）低下程度が大きくなることを示した。さらに曲げ耐力低下は以下の2つの理由で生じることを示した。1) 二方向変形を受ける場合、一方向変形の場合よりPC鋼材に大きな引張ひずみが生じる。そのため、繰返し変形時のPC鋼材の引張応力度が低下し、曲げ耐力が低下する。2) コンクリートが大きなひずみを受けることで圧縮力負担能力が低下し、断面内の応力中心間距離が小さくなり、曲げ耐力が低下する。

キーワード：PC柱部材、断面解析、曲げ耐力、二方向変形

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い。また、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、柱の設計にはより慎重な検討が求められる。

一般に、部材の曲げ挙動に関する研究は一方向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、二方向に変形を受け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

2.1 解析条件

解析対象断面は、谷らが行った実験の試験体¹⁾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。

表-1 共通事項

条件	値
コンクリート圧縮強度	30 N/mm ²
普通鉄筋降伏強度	295 N/mm ²
普通鉄筋	D10
補強筋ピッチ	80 mm
補強筋強度	295 N/mm ²
補強筋	D10
サブタイ本数	0本
PC鋼材降伏強度	1 080 N/mm ²
PC鋼材径	23 mm

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



*1 Tetsuhisa YONEZAWA

株式会社
環境総合テクノス



*2 Ichizo KISHIMOTO

近畿大学
建築学部 教授

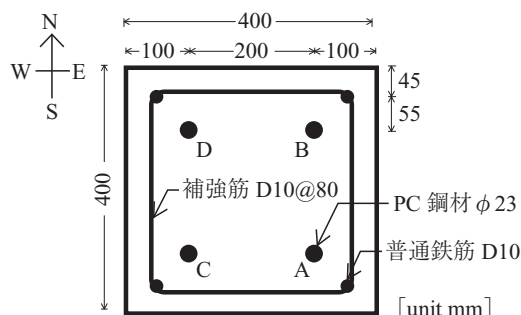


図-1 解析対象断面

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^{たとえ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向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、一方向正負繰返し履歴となる)。

2.2 解析手法

断面解析は、断面を小さな要素に分割し、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ことでモーメント(M) - 曲率(ϕ)関係を導くファイバーモデル⁴⁾により行った。なお、本研究では曲率から等価塑性ヒンジ($l_{eq}=1.0D$: D は断面せい)を仮定して変形角を求めている。解析では平面保持を仮定し、鉄筋および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。以下、ファイバーモデルによる $M-R$ 関係の導出の詳細について説明する。

ファイバーモデルは図-3に示すように鉄筋およびPC鋼材は一本を1要素、コンクリートは解析対象断面をせい方向、幅方向にそれぞれ分割(各方向分割数をそれぞれ100)し、分割された微小なコンクリートを1要素として考えた。この断面において、軸方向のひずみおよび X, Y 軸回りの曲率が変化した場合の任意要素に生じる応力度の変化(変化前の応力度を σ_i , 変化後の応力度を σ_{i+1} とする)を考える。任意要素の断面積を dA , 図心からの距離を(x, y), 図心位置での軸方向のひずみ増分を $\Delta\epsilon_N$, Y 軸回りの曲率増分を $\Delta\phi_x$, X 軸回りの曲率増分を $\Delta\phi_y$ とすると、任意要素(x, y)のひずみ増分 $\Delta\epsilon$ は平面保持の仮定より次式となる。

$$\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_N + \Delta\phi_x \cdot x + \Delta\phi_y \cdot y \quad (1)$$

このとき任意要素の応力度増分 $\Delta\sigma$ は、各要素の構成則の関数 $f(\Delta\epsilon)$ (2.4節で後述)より次式で表される。

$$\Delta\sigma = f(\Delta\epsilon) \quad (2)$$

したがって、各方向の曲率変化後の任意要素の応力度 σ_{i+1} は、曲率変化前の任意要素の応力度 σ_i より、以下の式で表される。

$$\sigma_{i+1} = \sigma_i + \Delta\sigma \quad (3)$$

以上より、断面に作用する合力 N , および各軸回りのモーメント M_x, M_y は以下のように表される。

$$N = \sum \sigma_{i+1} \cdot dA \quad (4)$$

$$M_x = \sum \sigma_{i+1} \cdot dA \cdot x \quad (5)$$

表-2 全軸方向力比のパラメータ

試験体名	全軸方向力比 $\eta_N + \eta_P$	プレストレス比 η_P	軸力比 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

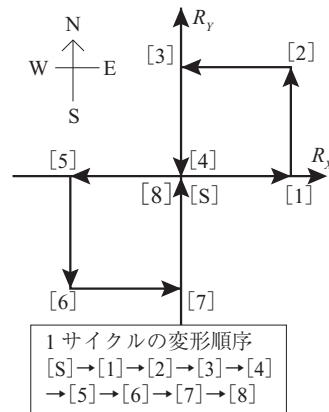


図-2 変形履歴

表-3 変形履歴の組合せ

		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

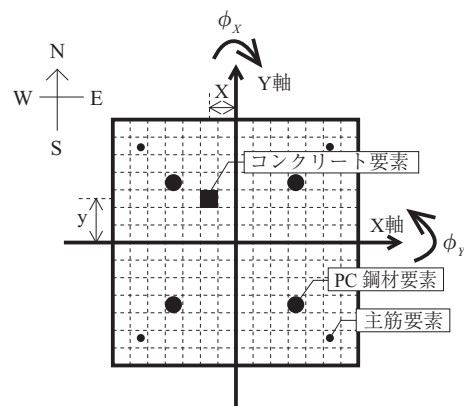


図-3 解析対象断面の分割

$$M_y = \sum \sigma_{i+1} \cdot dA \cdot y \quad (6)$$

また、各方向の変形角 R_x, R_y は断面解析より求めた各軸回りの曲率 ϕ_x, ϕ_y と等価塑性ヒンジ長さ($l_{eq}=1.0D$: D は断面せい)より以下の式で算出した。

$$R_x = l_{eq} \cdot \phi_x \quad (7)$$

$$R_y = l_{eq} \cdot \phi_y \quad (8)$$

以上のように、 $M-R$ 関係を求めた。

2.3 解析手順

解析の手順を図 - 4 に示す。同図より、解析は各軸回りに曲率を微小増減させ、断面の各要素に生じるひずみより各要素の応力を求め合力 N (式 (4)) を算出する。合力と式 (9) に示す外力 (軸力 N_0) との不釣り合いが一定の値以下 (釣り合い条件) になるよう、軸方向のひずみを調整し、収れん計算を行った。

$$N_0 = \eta_N \cdot \sigma_c \cdot bD \quad (9)$$

σ_c : コンクリート圧縮強度

釣り合い条件を満たす条件において、各方向のモーメント M_x , M_y および各方向の変形角 R_x , R_y を求め、さらに各方向の曲率を変化させ、設定した終了条件 (変形履歴 3 サイクル) を満たすまで行った。

2.4 各材料の構成則

各材料パネの履歴則を図 - 5 に示す。同図 (a) より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⁵⁾を考慮した。また鉄筋および PC 鋼材の $S-S$ 関係は Menegotto - Pinto モデル^{たとえ6)}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。(同図 (b))

3. 解析結果と考察

本章では、PC 柱部材の曲げ耐力について二方向に変形を受ける場合の曲げ耐力に対する影響を検討する。

3.1 主方向モーメント (M_x) - 主方向変形角 (R_x) 関係

図 - 6 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が、具体的には B0.33-0.2 (全軸方向力比: 小) と B0.45-0.2 (全軸方向力比: 大) のシリーズについて比較する。

一方向のみの変形をうける場合 ($R_y = 0$) を示す同図 (a-1, a-2, b-1, b-2) より、 R_x および全軸方向力比の大きさにかかわらず 2, 3 サイクル目の最大変形時の耐力は、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、二方向に変形を受ける場合 (同図 c-1, c-2, d-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 (0.33) 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、主方向の変形の大きさによらず 2 サイクル目、3 サイクル目の履歴形状は、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 (0.45) では、主方向変形が小さい $R_x = 0.01$ (d-1) の場合、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が、主方向変形が大きい $R_x = 0.02$ (d-2) の場合、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

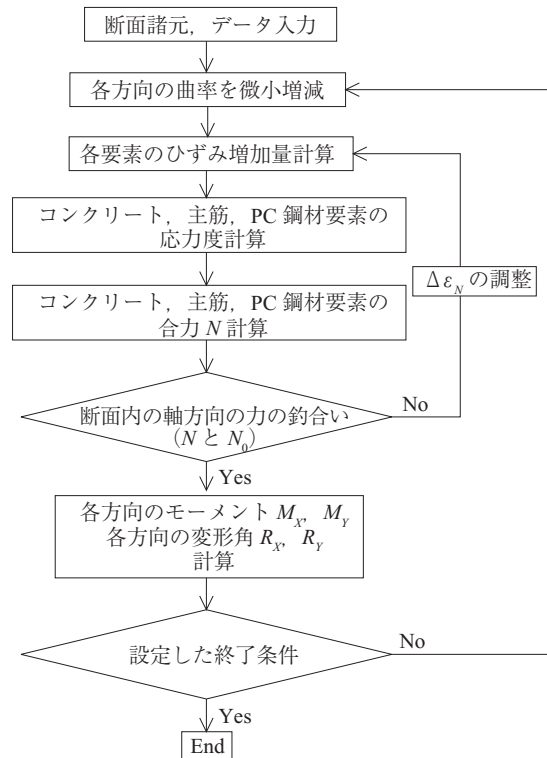


図 - 4 解析フロー

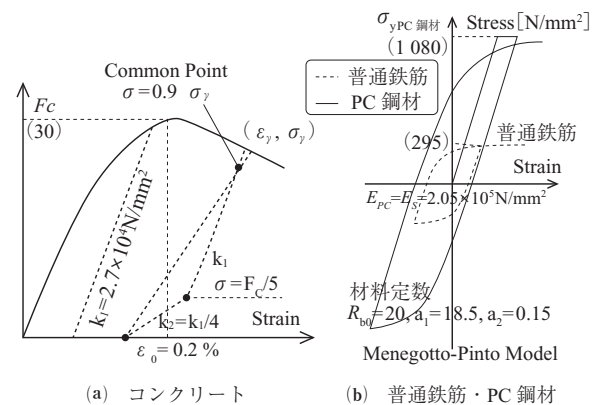


図 - 5 材料の応力度-ひずみ度関係

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

前節で述べたように、二方向に変形を受ける場合、一方向変形の場合に比べていずれの場合も曲げ耐力は低下し、その低下程度は全軸方向力比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)

曲げ耐力は断面内に発生する引張 (= 圧縮) 合力の大き

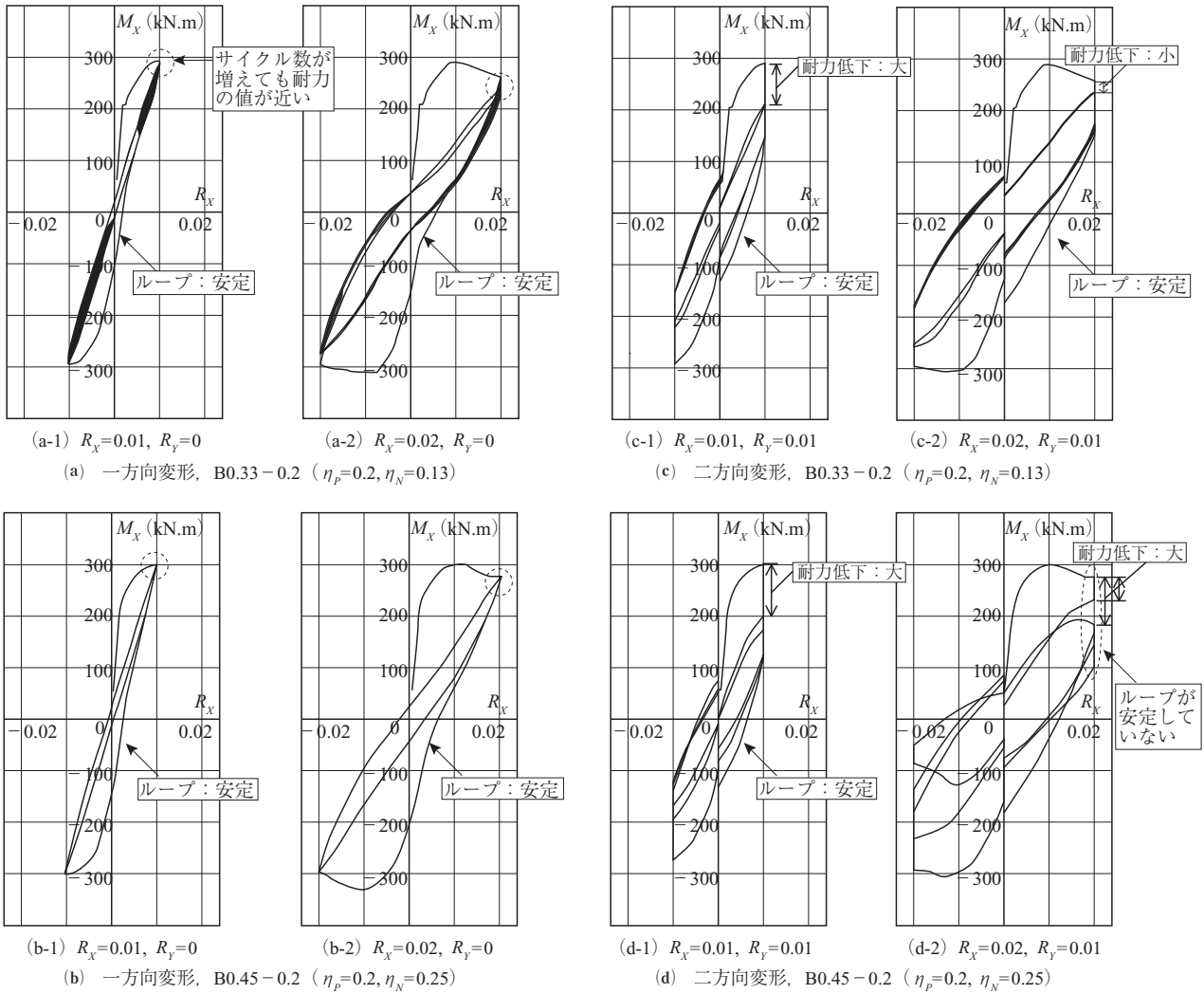


図 - 6 主方向のモーメント (M_x) - 主方向の変形角 (R_x) 関係

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

R_x の変形	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	小さい	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)	

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、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 - 7 に B0.33-0.2 の PC 鋼材・C について、主方向変形が小さい (同図 (a)) ケースと大きい (同図 (b)) ケースの 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 [] 中の数字は、図 - 2 で示す変形履歴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時 (同図 (a-1) 中 [E]) の PC 鋼材応力が、1 サイクル目 (同 [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 $\sigma_{PC}-\varepsilon_{PC}$ 関係を示す同図 (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 サイクル目でほぼ同程度の値であるにもかかわらず、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 (同図 (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 $\sigma_{PC}-\varepsilon_{PC}$ 関係を示す同図 (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場合 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 (a-2) よりもかなり小さくなっ

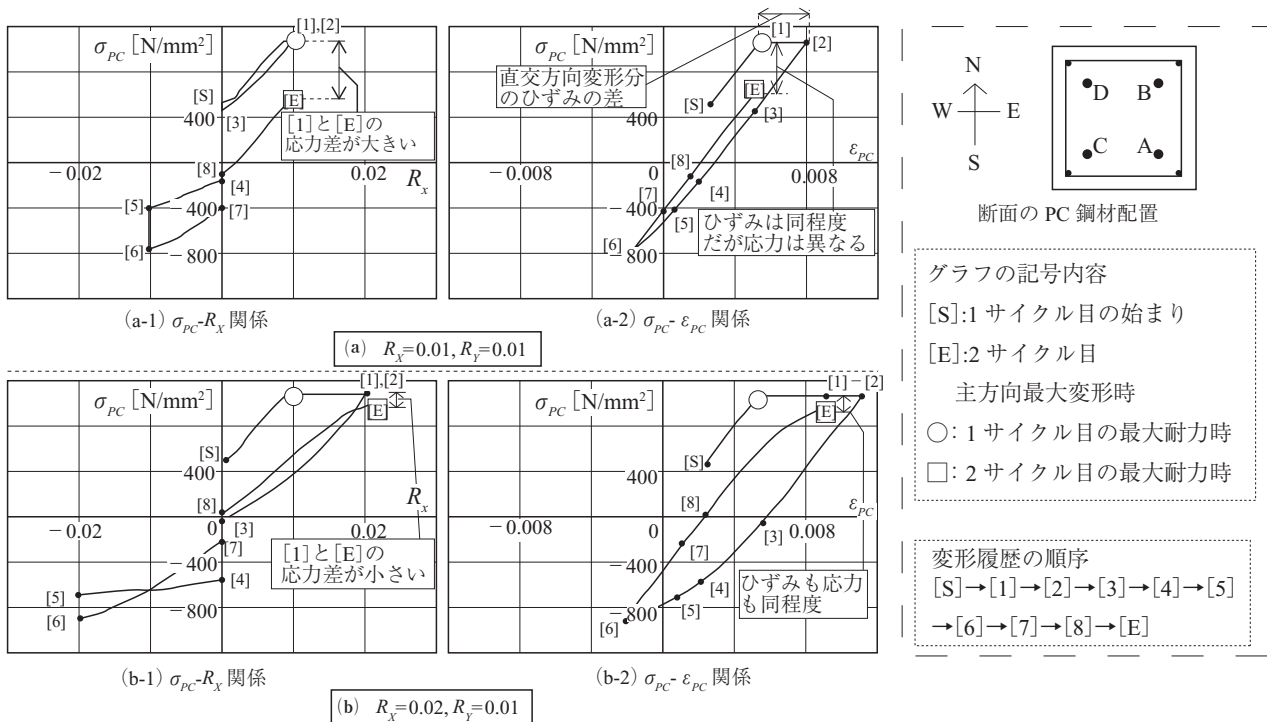


図 - 7 PC 鋼材・C の $\sigma_{PC} - R_x$ 関係, $\sigma_{PC} - \epsilon_{PC}$ 関係 (B0.33-0.2)

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のがわかる。

(2) Case (b) (全軸方向力が高く、主方向変形が大きいケース)

図 - 8 に、全軸方向力比が大きく、主方向変形が大きいケース (B0.45-0.2) について、一方向変形と二方向変形 ($R_y = 0.01$) を受ける場合のコンクリートの断面応力度分布を示す (同図は 1, 2 サイクル目の主方向最大変形 ($R_x = 0.02, R_y = 0$) 時の応力度分布)。同図より、一方向変形 (同図 (a)) の場合、1 サイクル目と 2 サイクル目の応力分布はかぶり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。これに対し、二方向変形のケース (同図 (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。これをさらに詳しく検討するために同時点での「圧縮強度時ひずみ以上のひずみを経験 (以下圧壊と呼ぶ) した断面各位置のコンクリートの応力度分布」を同時点で発生している応力の大きさに応じて分けて示したものを図 - 9 に示す。同図より、一方向変形 (同図 (a)) の場合、1, 2 サイクル時での圧縮側 (図中点線で囲った領域) での圧壊した範囲、および発生している応力の大きさはあまり変化していない。これは変形が一方向の場合、二方向に比べ断面に作用するひずみが総じて小さく、コアコンクリート (横補強筋による拘束効果で圧壊後の応力度低下が緩やか) では圧縮負担能力の低下程度が比較的小さい。つまり繰返し変形により再度圧縮力が作用する場合でも、コンクリートは 1 サイクル目に圧縮力を受ける場合とほぼ同程度に圧縮力を負担することができるため、圧壊した領域の範

囲、および発生する応力度の大きさはほとんど変化しない。

これに対し、二方向変形の場合 ($R_y = 0.01$: 同図 (b))、2 サイクル目では、すべてのコンクリートが圧壊を経験しており、とくに二方向に変形を受ける場合に大きなひずみを受ける断面隅角部 (同図 (b-2)) の点線で囲っている領域では、図 - 10 に示す一点鎖線で囲った領域のように圧縮力を負担することができない (同図 (a))、あるいは圧縮力の負担能力が低下している状態 (同図 (b)) となっている。これは 1 サイクル時の変形が X, Y 両方向ともに最大変形状態 (図 - 2, [2]) の状態) では、前述の断面隅角部では X 方向の変形に加えて Y 方向の変形でも圧縮を受けるため、コンクリートに非常に大きな圧縮ひずみが生じることを原因とする。詳述すると、プレーンコンクリート (図 - 10 (a)) では、前述のとおり、1 サイクル時の変形状態 [2] において、大きな圧縮ひずみが生じるため、以降、コンクリート s - s 関係上から見て取れるように圧縮応力を負担することができない状態となっている。つまり、2 サイクル時の変形状態 [1] においても圧縮力を負担できなくなったと言える。一方、コアコンクリートは (図 - 10 (b))、拘束効果により、コンクリートの s - s 関係は改善 (圧縮強度の上昇、圧縮強度時ひずみの増大、応力下降勾配の緩化) されているものの 1 サイクル時に経験した最大のひずみ、つまり 1 サイクル時の変形状態 [2] における二方向同時に変形時の圧縮ひずみが極めて大きいため、残留ひずみ (同図中、 ϵ_n) が大きく、2 サイクル時の変形状態 [1] ではコンクリートの応力が発生するひずみに達していない。この結果、断面内では力の釣り合いを保つため、より大きな圧縮領域が必要となることから中立軸位置が引張側に移動することになる。同時点での各サイクル時の中立軸

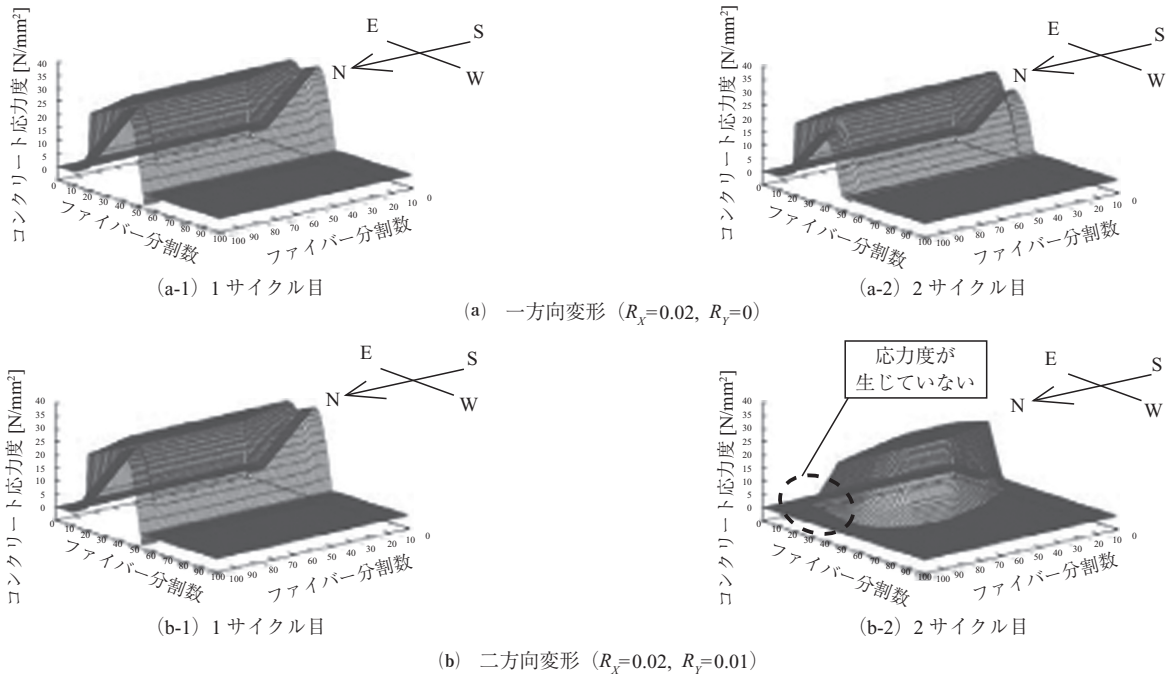


図 - 8 1・2 サイクルの主方向最大変形時におけるコンクリート応力度分布 (B0.45-0.2)

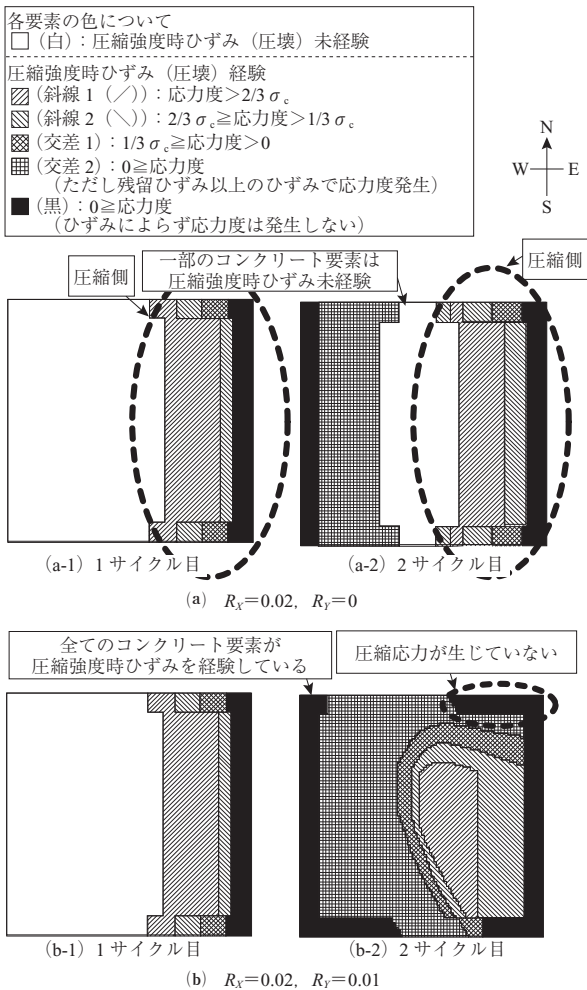


図 - 9 各コンクリート要素の応力度詳細図

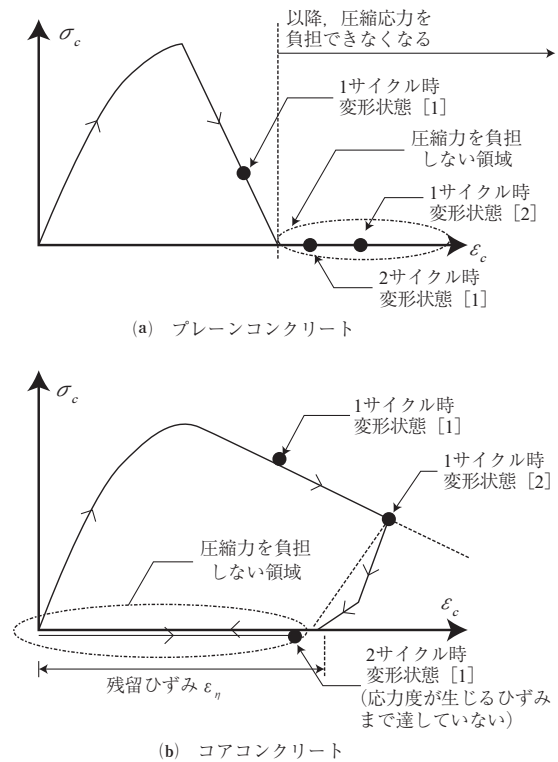


図 - 10 Case (b)の断面隅角部のコンクリート応力度 - ひずみ度

位置を示す図 - 11 より、一方向変形 ($R_y=0$) の場合、1, 2 サイクルともに中立軸位置はあまり変化しないが、二方向変形 ($R_y=0.01$) の場合、2 サイクル目の中立軸位置は 1 サイクル目に比べて深く、つまり引張側に移動している

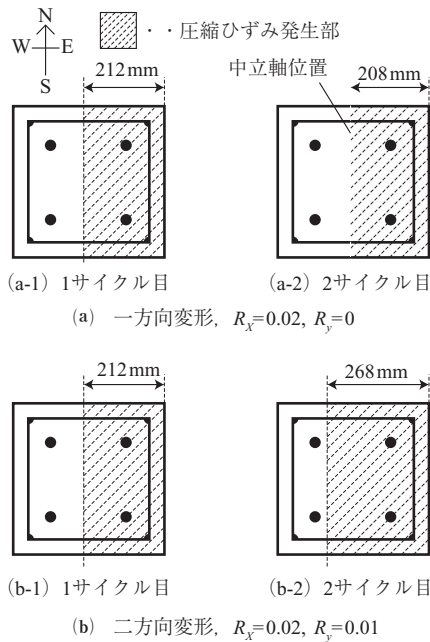


図 - 11 1・2 サイクルの主方向変形時 ($R_x = 0.02$, $R_y = 0$) における中立軸位置 (B0.45-0.2)

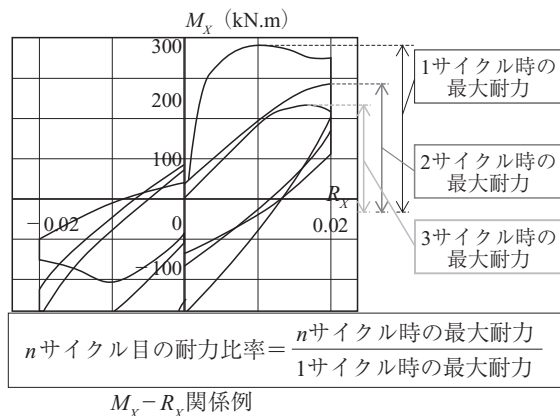


図 - 12 耐力比率説明図

ことが分かる。したがって応力中心間距離が短くなることにより曲げ耐力が低下する。

3.3 耐力比率の検討

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として図 - 12 に示す耐力比率（「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）を確認する。図 - 13 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示す。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。また図 - 13 中 (c-3) で、直交方向変形の値によらず低下比率が同じとなっているが、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。

4. 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, Vol.73, No.623, pp.103~110, 2008.1
- 2) 北嶋圭二, 安達洋, 中西三和: 2 方向入力を受ける鉄筋コンクリート造柱の振動台実験 2 方向入力を受ける鉄筋コンクリート造建物の応答性状に関する研究 (1), 日本建築学会構造系論文集, No.455, pp.137~146, 1994.1
- 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, pp.223 ~ 228, 1989
- 4) 滝口克己, 黒正清治, 小林克己: 鉄筋コンクリート断面の二軸曲げ解析, 日本建築学会論文報告集, No.250, pp.1~8, 1976
- 5) 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

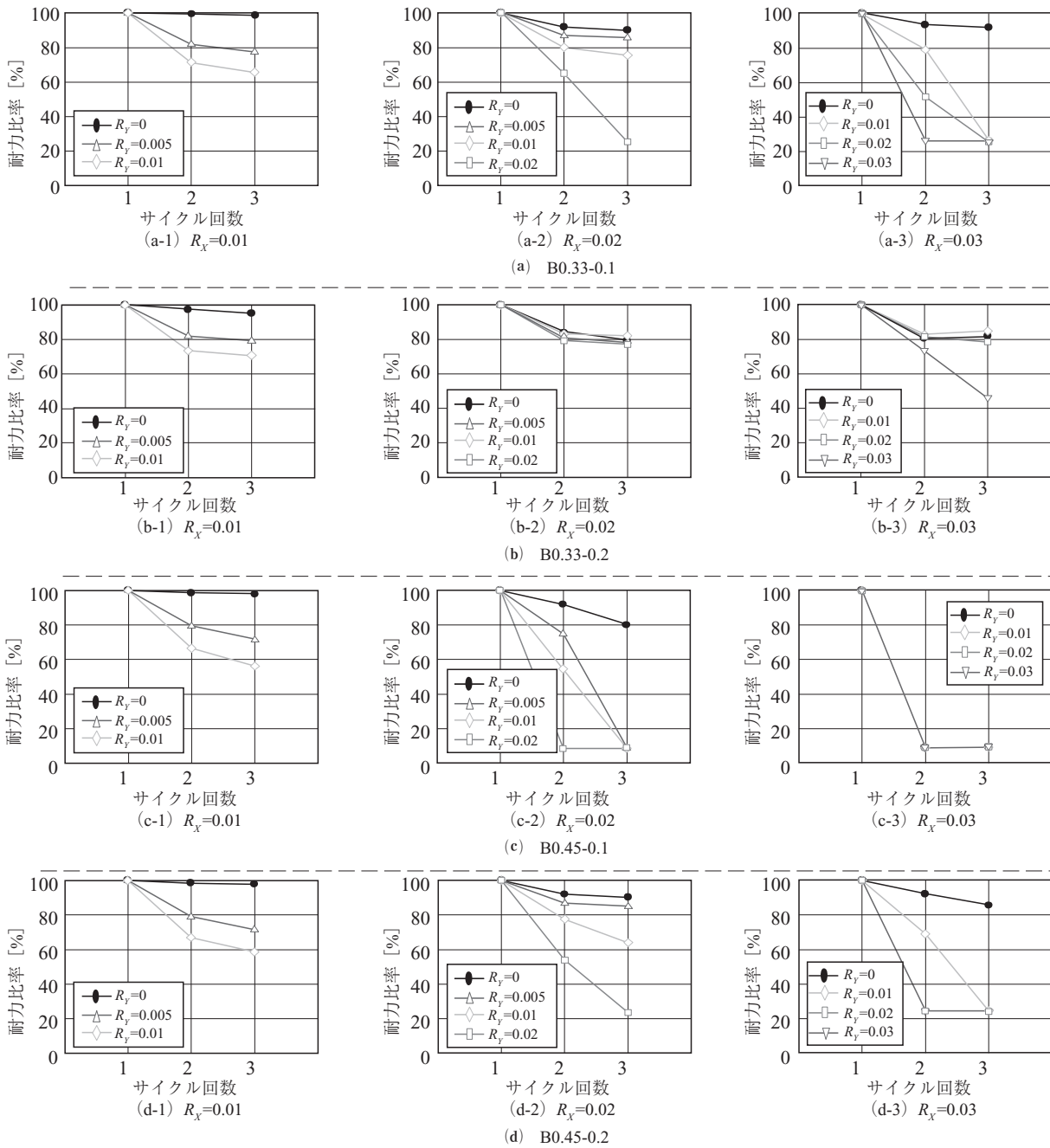


図 - 13 耐力比率—サイクル回数

の設計法 - 現状と将来 -, pp.10~13, 2000

6) 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.

【2016年5月16日受付】