

[110] 構造体コンクリートの力学的非均質性に起因する RC 部材の力学挙動

正会員 小阪 義夫 (名古屋大学工学部)

正会員 谷川 恭雄 (三重大学工学部)

正会員 ○山田 和夫 (名古屋大学工学部)

1. はじめに

筆者らは、これまでにRC構造物の安全性評価を目的として、コンクリート強度の材料固有の変動^{1), 2)}、構造体コンクリート強度の部材位置による変動^{3)~7)}、部材内部におけるコンクリート強度の変動を考慮したRC部材の非弾性解析手法^{8), 9)}などについて、一連の基礎的研究を行ってきた。これらのうち、RC部材の非弾性解析手法については、これまでの線形解析手法を拡張して、横補強筋やせん断力による多軸効果、主筋とコンクリート間のすべりおよび部材端における主筋の抜け出し効果、せん断力に起因するクラックの進展状況とクラック間隔などを考慮に入れた新たな分割要素法を提案するとともに、その妥当性を示した⁸⁾。また、解析結果と実験結果との比較の際、実状に合せて打込み高さ方向のコンクリート強度の変動を考慮して解析すると、解析結果は実験結果にさらによく合致することを指摘した⁹⁾。本研究では、引き続き構造体コンクリート強度の部材内部での統計的変動がRC部材の力学挙動や崩壊過程に及ぼす影響を解明するために、筆者らが先に提案した解析手法⁸⁾を用いたシミュレーション解析によって、純曲げ、軸力・曲げ、並びに軸力・曲げ・せん断荷重を受けるRC部材の力学特性について検討する。ただし、本研究では、RC部材の耐力や変形特性などの確率分布性状については言及しない。これは、本解析手法を用いてRC部材の力学挙動のバラツキを検討するためには、膨大な計算時間が必要で、事実上解析が極めて困難なためである。

2. 純曲げおよび軸力・曲げを受けるRC部材

2.1 解析モデル

純曲げおよび軸力・曲げを受けるRC部材では、構成素材の力学特性が部材内部で一定で、かつ定着域からの主筋の抜け出しがないものと仮定すれば、等曲げモーメント区間での断面曲率は、断面の位置にかかわらず一様となる。しかし、これまでに報告されている実験結果¹⁰⁾によれば、均等曲げモーメント領域の断面曲率は、断面の位置によってかなり変動する。この現象は、主として構成素材の力学特性の統計的変動や主筋のすべりに起因しているものと考えられる。そのため、ここでは上記のような純曲げまたは軸力・曲げを受けるRC部材に観察される現象の解明を目的として、曲げモーメント(M)－曲率(ϕ)関係および破壊過程に及ぼすコンクリート強度の統計的変動と主筋のすべりの影響について検討を行うことにする。解析対象部材は表-1に示す力学特性を有する構成素材から成るものと考え、図-1に示すような外力条件および形状・寸法のRC部材を採用して表-2に示す2シリーズの解析を行った。

Anal.-Iは、純曲げおよび軸力・曲げを受けるRC部材のM- ϕ 関係に及ぼすコンクリート強度の打込み高さ方向に関する変動の影響を調べるための解析であり、解析要因として図-1に示すRC断面の上下端におけるコンクリート強度差(ただし、RC断面におけるコンクリート強度の平均値は、いずれの場合も前掲の表-1(b)に示す値に

表-1 構成素材の力学性質

(a) 鉄筋					
Kind of steel bar	E_{si} ($\times 10^4$ kgf/cm ²)	σ_y (kgf/cm ²)	ϵ_{sh}	σ_u (kgf/cm ²)	ϵ_u
Longitudinal bar	2.10	3000	0.01	5600	0.2
Lateral bar	2.10	3000	0.01	5600	0.2

[Notes] E_{si} : Initial Young's modulus, σ_y : Yield point, ϵ_{sh} : Strain at strain hardening, σ_u : Tensile strength, ϵ_u : Strain at tensile strength.

(b) コンクリート

E_{ci} ($\times 10^3$ kgf/cm ²)	ν_c	f_c (kgf/cm ²)	f_t (kgf/cm ²)
2.59*	0.18*	300	30.0

[Notes] E_{ci} : Initial Young's modulus, ν_c : Initial Poisson's ratio, f_c : Compressive strength, f_t : Tensile strength, *: Value calculated by endochronic theory.

表-2 解析の概要

No. of analysis	f_{cs} Bond stiffness (tf/cm)				CF	β	DS (kgf/cm ²)	CV (%)	Anchorage length (cm)		Axial force (tf)
	K_{1p}	K_{2p}	K_{1n}	K_{2n}					Left side	Right side	
Anal.-I	-	-	-	-	0.0	0.3	-100 0 100	0	-	-	0 70
	-	-	-	-	0.0	0.3	0	0 10 20 40	90.0	90.0	0 70
	10.0	0.5	10.0	0.5	0.0	0.3	0	0 10 20 40	90.0	90.0	0 70

[Notes] K_{1p} , K_{1n} : First bond stiffness at positive and negative bond stress, respectively. K_{2p} , K_{2n} : Second bond stiffness at positive and negative bond stress, respectively. CF: Crack spacing factor, β : Shear transfer factor, DS: Difference of compressive strength of concrete between top and bottom of RC section, CV: Coefficient of variation of concrete strength. Anchorage zone is subdivided into 50 blocks.

設定した)並びに軸力を取り上げた。

Anal. - II では、主としてコンクリート強度の統計的変動および主筋とコンクリート間の付着特性が純曲げおよび軸力・曲げを受ける RC 部材の $M-\phi$ 関

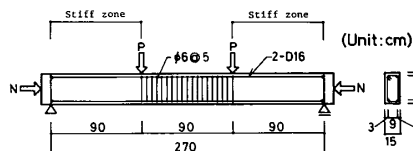


図-1 モデル試験体の形状・寸法

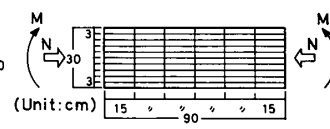


図-2 RC部材のモデル化

係と破壊の集中性 (Unstable strain localization¹¹⁾) に及ぼす影響を検討した。解析要因として表-2に示すように RC 部材内のコンクリート強度のパラッキ (ただし、各構成要素のコンクリート強度のパラッキは、同一 Weibull 分布で表しうるものと仮定した)、主筋とコンクリート間の付着特性、並びに軸力を取り上げた。解析に用いたモデルの要素分割を図-2に示す。

2.2 解析結果

(1) 打込み高さ方向に関するコンクリート強度の変動の影響

図には示していないが、部材の耐力が主として引張主筋の降伏によって決まる場合、RC 部材の $M-\phi$ 関係は、打込み高さ方向のコンクリート強度の変動の影響をほとんど受けない。しかし、軸力が大きく RC 部材の耐力が専ら圧縮域のコンクリートの力学特性に支配される場合には、RC 部材の $M-\phi$ 関係はコンクリート強度の打込み高さ方向の変動の程度によって若干相違する。

(2) コンクリート強度の統計的変動の影響

a) 主筋のすべりを無視した場合：図-3は、純曲げを受ける RC 部材の $M-\phi$ 関係に及ぼす部材内部のコンクリート強度のパラッキの影響を示したものであるが、 $M-\phi$ 関係は、コンクリート強度の変動係数 (CV) が多少異なってもほとんど相違しない。図-4は、各荷重レベルにおける材軸 (X) 方向の曲率分布を CV = 20% の場合について示したものである。図によれば、引張クラックは引張縁のコンクリートの引張強度が最も小さい断面から順次発生・進展を繰返すため、引張クラックの発生・進展が活発に行われる段階では、RC 部材内の曲率は、コンクリートの引張強度のパラッキに応じて複雑に変化するが、引張クラックの発生・進展が一応終了した大変形領域になると、曲率分布の変動は小さくなり、コンクリート強度を部材内部で一様と仮定した場合に近いものとなっている。これに対して、軸力・曲げを受ける場合には、図-5に示すように RC 部材の $M-\phi$ 関係はコンクリート強度のパラッキによって著しく相違する。また、各荷重レ

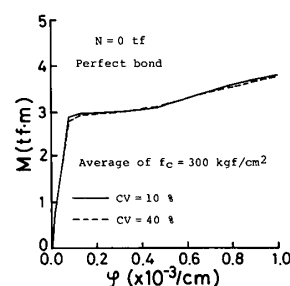


図-3 純曲げを受ける RC 部材の曲げモーメント-曲率関係 (主筋のすべりを無視した場合)

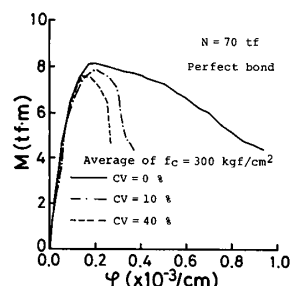


図-5 軸力・曲げを受ける RC 部材の曲げモーメント-曲率関係 (主筋のすべりを無視した場合)

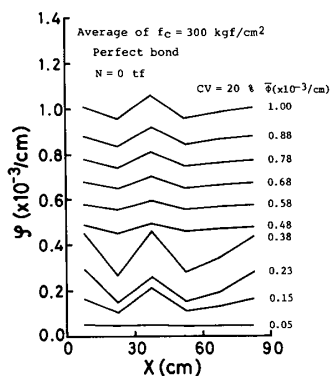


図-4 純曲げを受ける RC 部材の曲率分布 (主筋のすべりを無視した場合)

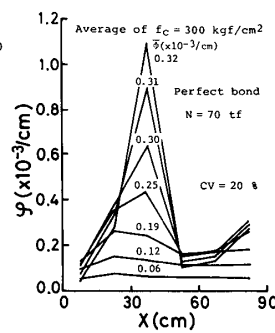


図-6 軸力・曲げを受ける RC 部材の曲率分布 (主筋のすべりを無視した場合)

ベルに対する RC 部材内の曲率分布を示した図-6によれば、変形が進むにつれて破壊が特定領域に集中していく様子が見えてくる。さらに、純曲げを受ける場合には認められなかった現象ではあるが、軸力・曲げを受ける RC 部材で、コンクリートの圧壊のために曲率が急増する箇所では、曲率の急増域を挟んだ領域で、曲率のもどり現象が観察される。このことはまた、高軸力下で曲げを受ける RC 部材の曲率を実測する際に、曲率測定域の設定が極めて重要であることを示唆している。

b) 主筋のすべりを考慮した場合：図-7は、主筋とコンクリート間のすべりと部材端における主筋の抜け出しを考慮した場合の純曲げを受ける RC 部材の $M-\phi$ 関係を示したものである。図によれば、 $M-\phi$ 関係に及ぼすコンクリート強度の統計的変動の影響は、引張主筋が降伏する前の段階で、同一曲げモーメント時の曲率が主筋の

すべりを無視した場合よりも若干大きくなっていることを除けば、主筋のすべりを無視した場合のM-φ関係とほぼ一致している。しかし、RC部材内の曲率分布は、図-8に示すように前掲の図-4と比較してかなり異なった傾向を示している。すなわち、

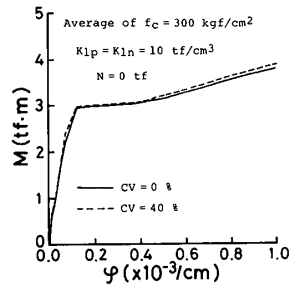
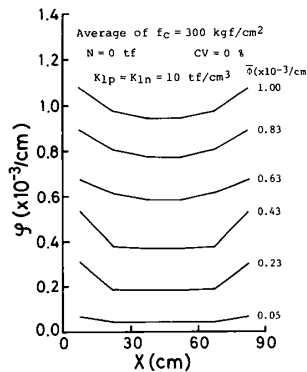
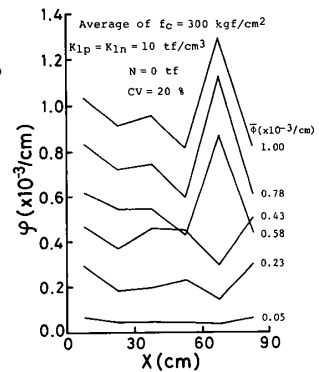


図-7 純曲げを受けるRC部材の曲げモーメント-曲率関係(主筋のすべりを考慮した場合)

RC部材内におけるコンクリート強度の変動を無視した場合(CV = 0%の場合)でも、曲率分布は部材内部で一様ではなく、部材端からの主筋の抜け出しによってRC断面の曲率は材端に近づくにつれて増大している。また、コンクリート強度の統計的変動を考慮した場合には、主筋とコンクリート間の完全付着を仮定すると、前述のように大変形領域ではコンクリート強度の変動にかかわらず曲率分布が部材全域にわたって均等化したのに対して、主筋とコンクリート間のすべりと部材端における主筋の抜け出しを考慮すると、純曲げを受ける場合でも大変形領域において曲率がRC部材の特定領域で急増する傾向を示している。ただし、破壊がある領域に集中しても、その原因が引張クラックの発生および引張主筋の降伏に起因しているため、軸力・曲げを受けるRC部材のように曲率の集中している断面を狭んだ領域における曲率のもどり現象は認められない。図には示していないが、軸力・曲げを受ける場合にも、部材内部におけるコンクリート強度のパラ



(a) CV = 0%の場合



(b) CV = 20%の場合

図-8 純曲げを受けるRC部材の曲率分布(主筋のすべりを考慮した場合)

ツキを無視した場合のM-φ関係が、前掲の図-5の主筋のすべりを無視した場合と比較してかなりぜい性的な形状を示していることを除けば、M-φ関係およびRC部材内の曲率分布に及ぼすコンクリート強度の統計的変動の影響は、主筋のすべりを無視した場合のそれと類似している。

3. 軸力・曲げ・せん断荷重を受けるRC部材

3.1 解析モデル

ここでは、軸力・曲げ・せん断荷重を受けるRC部材の力学挙動に及ぼすコンクリート強度の部材位置における変動の影響について検討する。解析対象部材としては、図-9に示すような形状・寸法のRC柱材を採用した。解析には、図-10に示す10層10領域の要素に分割したモデルを採用し、外力条件は部材両端の回転を拘束した場合および曲げモーメント分布が常に逆対称分布となるように設定した場合の2種類とした。構成素材の力学特性および解析パラメータの一覧をそれぞれ表-3および表-4に示す。

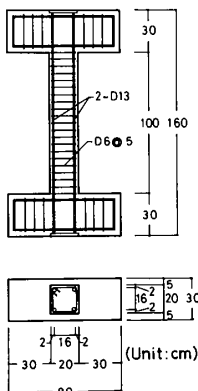


図-9 モデル試験体の形状・寸法

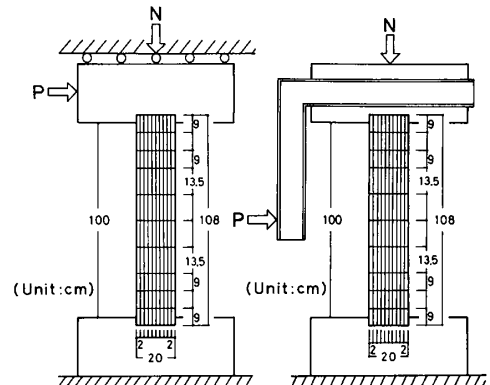


図-10 RC部材のモデル化および載荷方法

表-3 構成素材の力学性質

Kind of steel bar	E _{s1} (x10 ⁶ kgf/cm ²)	σ _y (kgf/cm ²)	ε _{sh}	σ _u (kgf/cm ²)	ε _u	No. of analysis	E _{c1} (x10 ⁵ kgf/cm ²)	ν ₀	f _c (kgf/cm ²)	f _t (kgf/cm ²)
Longitudinal bar	2.10	3500	0.01	5500	0.2	Anal.-I	2.87*	0.18*	330	36.3
Lateral bar	2.10	3300	0.01	5600	0.2	Anal.-II	2.04*	0.18*	230	25.3

[Notes] E_{s1}: Initial Young's modulus, σ_y: Yield point, ε_{sh}: Strain at strain hardening, σ_u: Tensile strength, ε_u: Strain at tensile strength.

[Notes] E_{c1}: Initial Young's modulus, ν₀: Initial Poisson's ratio, f_c: Compressive strength, f_t: Tensile strength, *: Value calculated by endochronic theory.

表-4 解析の概要

No. of analysis	Bond stiffness (tf/cm ³)				CF	δ	DS (kgf/cm ³)	CV (%)	Anchorage length (cm)		Axial force (tf)
	K1p	K2p	K1n	K2n					Top	Bottom	
Anal.-I	0	0	10.0	0	0.0	0.3	-100	0	30.0	30.0	20
	10.0	0.5	-	0.5							40
	-	-	-	-							60
Anal.-II	0	0	0	0	0.0	0.3	0	0	30.0	30.0	20
	10.0	0.5	10.0	0.5				10			40
	-	-	-	-				20			60

[Notes] K1p, K1n: First bond stiffness at positive and negative bond stress, respectively. K2p, K2n: Second bond stiffness at positive and negative bond stress, respectively. CF: Crack spacing factor, δ: Shear transfer factor, DS: Difference of compressive strength of concrete between top and bottom of RC member, CV: Coefficient of variation of concrete strength. Anchorage zone is subdivided into 50 blocks.

3.2 解析結果

(1) 荷重-変位関係

図-11 および 12 は、前掲の図-10

(a)に示す加力方法を採用した場合の水平荷重(P) - 層間変位(δ)関係に関する解析結果の一例を示したものである。図によれば、大変形領域におけるP-δ

関係の形状がコンクリート強度の打込み高さ方向の変動、並びに R C 部材内における統計的変動の程度によって若干相違しているが、大局的にみれば R C 部材の力学挙動は部材内部におけるコンクリート強度の変動によってほとんど影響されない。この現象は、前述した軸力・曲げを受ける R C 部材の力学挙動が部材内部のコンクリート強度の変動によって著しく影響されたこととは対照的である。この原因としては、前掲の図 10-(a) に示すような載荷条件下では、コンクリートが局所的に破壊すると、その破壊域側の材端モーメントが低下し、もう一方の材端モーメントが増大するというような応力再分配を示すため、R C 部材内部の局所的崩壊が特定の領域に集中することはなく、破壊が分散することが挙げられる。

(2) R C 部材の曲率分布

図-13 は、最大耐力近傍における R C 部材の曲率分布に関する解析結果の一例を示したものである。図によれば、前掲の図-10(a) の載荷方法による R C 部材内におけるコンクリート強度の変動を考慮した場合の解析結果（破線）は、柱頭部の曲率の方が柱脚部のそれよりも大きく、かつ高さ方向に関する曲率分布の変動も柱頭部の方が大きくなっているが、コンクリート強度を R C 部材内で一定と仮定した場合の解析結果（一点鎖線）と比べて大差がない。しかし、前掲の図-10(b) に示した載荷方法を用いた場合には、破壊が最弱断面に近い危険断面近傍に集中するため、曲率分布（実線）は、コンクリート強度の部材位置による変動によって著しく影響される。このような R C 部材の力学挙動に及ぼす載荷方法の影響は、構造体コンクリート強度の部材位置による変動を考慮することによって始めて説明できる現象であり、確率論的な立場からの検討の必要性を示唆している。

4. 結論

本研究によって得られた結果は、およそ次のように要約できる。

1) 主筋のすべりを無視した場合、純曲げを受ける R C 部材の断面曲

率は、引張クラックの発生・進展が活発な段階では、コンクリート強度の部材内部での変動に応じ部材位置によって複雑に変化するが、大変形領域になると、曲率分布の変動は小さくなる。しかし、主筋とコンクリート間のすべりおよび部材端における主筋の抜け出し効果を考慮すると、大変形領域において曲率が R C 部材の特定領域で急増する傾向を示す。

2) R C 部材の力学特性は、R C 部材両端の回転を拘束する形式で逆対称曲げ・せん断載荷を行った場合、部材内部のコンクリート強度の変動にそれほど影響されないが、曲げモーメント分布が常に逆対称分布となるように載荷した場合には、R C 部材の力学特性は部材内部のコンクリート強度の非均質性に著しく影響される。

参考文献

- 1) 谷川・山田, 日本建築学会論文報告集, 第267号, 昭53.5, pp.1~10.
- 2) 谷川・山田, 日本建築学会論文報告集, 第286号, 昭54.12, pp.1~12.
- 3) 谷川・山田, セメントコンクリート, №393, 昭54.11, pp.10~17.
- 4) Tanigawa, Y., Yamada, K., and Y. Kosaka, Trans. of JCI, Vol. 1, 1979, pp.79~86.
- 5) Tanigawa, Y., Yamada, K., Kumagai, S., and Y. Kosaka, Trans. of JCI, Vol. 2, 1980, pp.163~170.
- 6) Tanigawa, Y., Kosaka, Y., Yamada, K., and S. Kumagai, Trans. of JCI, Vol. 3, 1981, pp.199~206.
- 7) Tanigawa, Y., Kosaka, Y., Yamada, K., and K. Baba, Trans. of JCI, Vol. 4, 1982, pp.109~116.
- 8) 小阪・谷川・山田, 日本建築学会論文報告集, 第326号, 昭58.4, pp.78~90.
- 9) 小阪・谷川・山田, 日本建築学会論文報告集, 第330号, 昭58.8, pp.9~23.
- 10) 森田・角, セメント技術年報, 第23巻, 昭44.5, pp.580~587.
- 11) Bazant, Z. P., Jour. of EM-Div., Proc. of ASCE, Vol.102, №EM2, April 1976, pp.331~344.

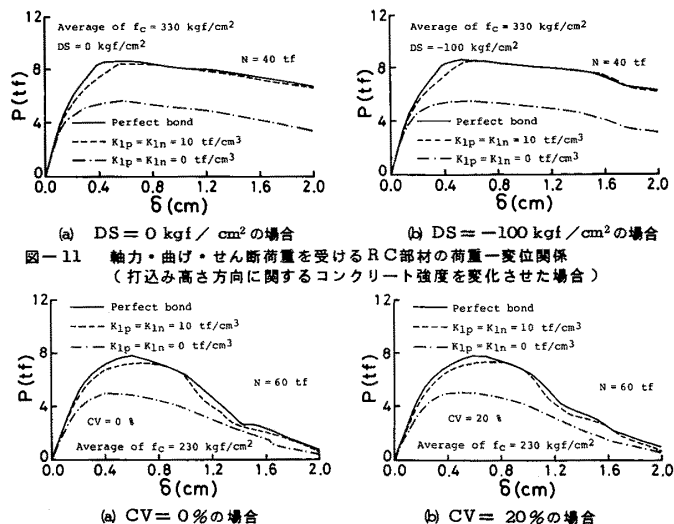


図-11 軸力・曲げ・せん断荷重を受ける R C 部材の荷重-変位関係
(打込み高さ方向に関するコンクリート強度を変化させた場合)

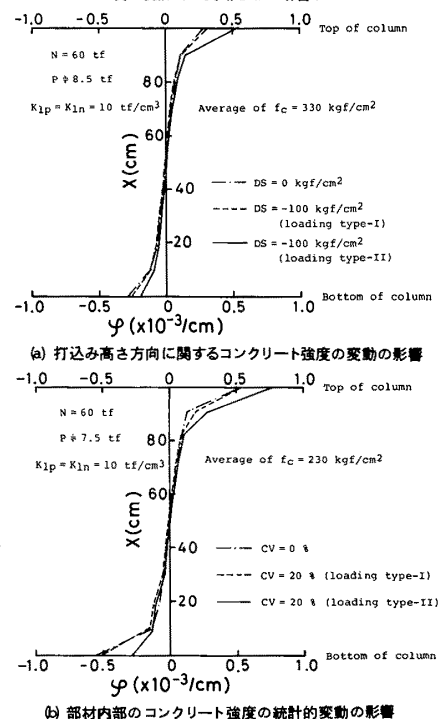


図-12 軸力・曲げ・せん断荷重を受ける R C 部材の荷重-変位関係
(部材内部のコンクリート強度を統計的に変動させた場合)

図-13 軸力・曲げ・せん断荷重を受ける R C 部材の曲率分布