

# 論文 粘弾塑性サスペンション要素法によるRC梁の曲げ破壊解析

朴 相俊<sup>\*1</sup>・谷川恭雄<sup>\*2</sup>・黒川善幸<sup>\*3</sup>・平岩 陸<sup>\*4</sup>

要旨：本研究では、コンクリートの破壊解析に用いられてきた粘弾塑性サスペンション要素法(VEPSEM)をRC部材の曲げ破壊解析に応用し、様々なRC梁の変形・破壊挙動について検討することにある。また、解析結果とRC理論による計算結果および既往の実験結果を比較し、本解析手法の適用性を確認するとともに、せん断補強筋を配したRC梁の大変形に至る破壊シミュレーションを行い、その変形・破壊挙動に及ぼす各種要因の影響について解析的に検討した。

キーワード：粘弾塑性サスペンション要素法, RC梁, 鋼材要素, 曲げ破壊解析

## 1.はじめに

RC部材の曲げ破壊特性を把握することは、構造物の崩壊性状を把握する上で重要である。また、破壊力学的な立場からも、従来から数多くの実験的・解析的研究が行われてきた<sup>1)</sup>。しかし、大変形時または複雑な応力条件下などにおける破壊特性は、まだ十分に解明されていないのが現状である<sup>2)</sup>。そのため、筆者らは、様々な応力条件に適用が可能な、コンクリートの変形・破壊挙動の解析手法の構築を目的として、非連続体モデルを用いた粘弾塑性サスペンション要素法(VEPSEM)を提案し、既にいくつかのシミュレーションを行ってきた<sup>3), 4), 5)</sup>。

本研究では、主にコンクリートの破壊解析に用いられてきたVEPSEMをRC部材の破壊解析に応用し、様々なRC梁の変形・破壊挙動について検討することにある。そのためには、鉄筋の適切なモデル化が不可欠である。従来のVEPSEMでは、特定の2節点間の変位を弾塑性要素で拘束することで鉄筋をモデル化してきたが、この方法では、大変形時に安定した結果を得ることが困難であった<sup>3)</sup>。そこで、本研究では、より実現象に近い補強筋モデルとして、新たに鋼材要素を導入し、モデル化した。これにより、実現象に近い鉄筋のモデル化が可能になり、大変形時にも安定した解が得られるものと

期待できる。

本研究では、鋼材要素を導入したVEPSEMを用いて、RC梁の曲げ破壊解析を行い、解析結果とRC理論による計算結果および既往の実験結果を比較し、本解析手法の適用性を確認するとともに、せん断補強筋を配したRC梁の大変形に至るまでの破壊シミュレーションを行い、その変形・破壊挙動に及ぼす各種要因の影響について解析的に検討した。

## 2. RC単筋梁の曲げ破壊挙動

### 2.1 解析の概要

鋼材の降伏を考慮するために、図-1のようなバイリニア型の応力 - ひずみ関係を有する鋼材要素を新たに導入した。すなわち、要素のひずみ $\epsilon_s$ が降伏ひずみ $\epsilon_y$ より小さい範囲では、要素は弾性であるが、 $\epsilon_s$ が $\epsilon_y$ を超えれば、要素は降伏し、それ以降は、ひずみが増大しても応力は降伏応力 $\sigma_y$ の一定値となる。

図-2は、サスペンション要素の構成を示した概念図である。鋼材節点間には鋼材要素を、それ以外の節点間ではモルタル要素を形成する。本解析は2次元であり、主筋を構成する鋼材節点の間には、鋼材要素とモルタル要素を並列に形成した。これは、RC梁のかぶりコンクリートを表現するためである。また、今回の解析では鋼材とモルタル

\* 1 名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻共同研究員・工博 (正会員)

\* 2 名城大学理工学部建築学科教授・工博 (正会員)

\* 3 名古屋大学環境学研究科都市環境学専攻助手・工修 (正会員)

\* 4 豊田工業高等専門学校建築学科助手・工博 (正会員)

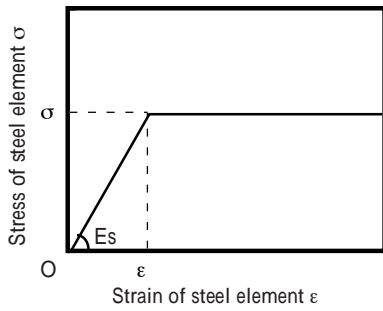


図-1 鋼材要素の応力 $\sigma$  - ひずみ $\epsilon$ 関係

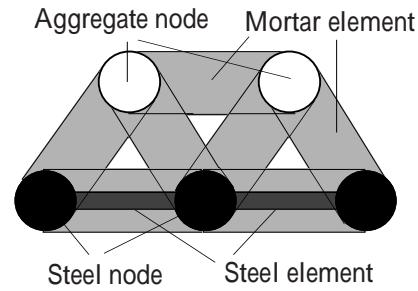


図-2 サスペンション要素の構成

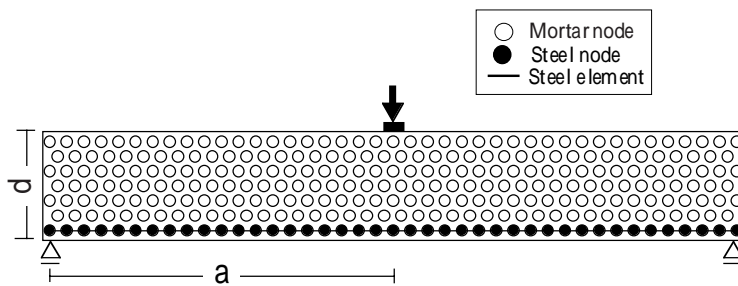


図-3 RC単筋梁の曲げ破壊解析に用いた解析モデル

表-1 解析モデルの寸法

a/d	N	a	d
1	88	200	200
3	284	600	
5	466	1000	

[Notes]  
a/d: Shear span ratio, N: Number of nodes,  
a: Shear span (mm), d: Height of beam (mm).

表-2 材料パラメータ

(a) モルタル要素				(b) 鋼材要素			
F <sub>tm</sub>	E <sub>m</sub>	tan $\phi$	$\eta$	$\sigma_y$	E <sub>s</sub>	tan $\phi$	$\eta$
1	11.3	0.3	0.3	300	210	0.3	0.3
3	19.6						
5	25.3						

[Notes]  
F<sub>tm</sub>: Pure tensile strength of mortar (MPa), E<sub>m</sub>: Elastic modulus of mortar (GPa), tan  $\phi$ : Coefficient of internal friction,  $\eta$ : Viscosity (MPa · s),  $\sigma_y$ : Yield stress of steel (MPa), E<sub>s</sub>: Elastic modulus of steel (GPa).

表-3 主筋の入力データ

p	P <sub>y</sub>	K <sub>s</sub>
0.5	3.0	2,100
1.0	6.0	4,200
1.5	9.0	6,300
2.0	12.0	8,400

[Notes]  
p: Ratio of main reinforcement (%),  
P<sub>y</sub>: Yield force (kN),  
K<sub>s</sub>: Stiffness of steel (kN).

との付着破壊は考慮していない。

図-3は、RC単筋梁の曲げ破壊解析に用いた解析モデルを、表-1は、その寸法を示したものである。梁背dを200mmとし、せん断スパン比a/d（本研究では、有効背ではなく、全背をdとしている）を1, 3, 5の3水準に設定した。表-2は、本解析に用いた材料パラメータである。モルタルの引張強度F<sub>tm</sub>を1, 3, 5MPaの3水準、鋼材の降伏応力 $\sigma_y$ を300MPaの1水準とした。表-3は、主筋の入力パラメータであり、表中の降伏荷重P<sub>y</sub>および剛性率K<sub>s</sub>は、降伏応力 $\sigma_y$ および弾性係数E<sub>s</sub>に主筋の断面積を乗じた値である。主筋比pは、梁の断面積2000mm<sup>2</sup>に対する鋼材要素の断面積の比であり、0.5, 1.0, 1.5, 2.0%の4水準に設定した。

## 2.2 解析結果とその考察

図-4は、曲げモーメントM - 曲率 $\phi$ 曲線に関する解析結果とRC理論式<sup>9)</sup>による計算結果を比較した一例である。RC理論式による計算結果としては、コンクリートのひび割れ発生時、主筋の降伏時および終局時を示した。同図によると、いずれの時点においても、解析結果とRC理論式による計算結果は、ほぼ一致しており、本解析手法の妥当性が確認できた。また、同図の解析結果においては、主筋降伏前にモーメントが低下し、また上昇する現象が発生している。これは、VEPSEMが動的解析であり、応力は、クラック発生の影響を受けて瞬間的に変動するためである。

図-5は、荷重P - 中央点たわみ $\delta$ 曲線に及ぼすモ

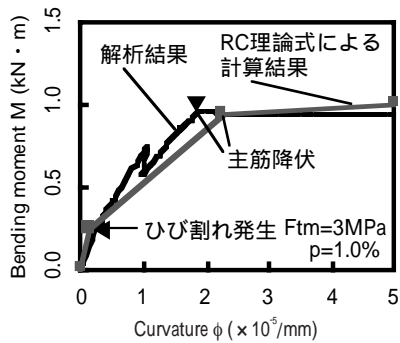


図-4 曲げモーメントM - 曲率 $\phi$ 曲線に関する解析結果とRC理論式による計算結果との比較

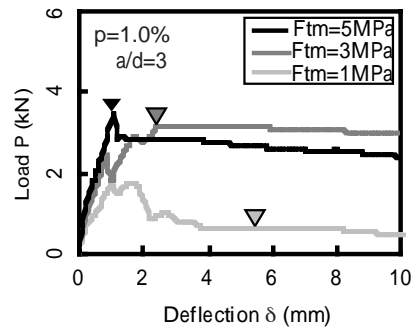


図-5 荷重P - 中央点たわみ $\delta$ 曲線に及ぼすコンクリートの引張強度 $F_{tm}$ の影響

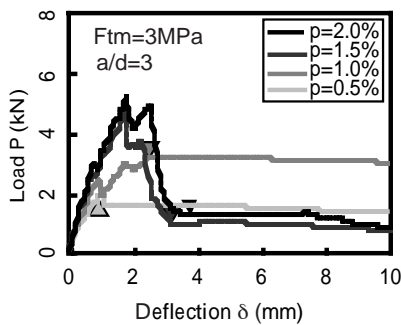


図-6 荷重P - 中央点たわみ $\delta$ 曲線に及ぼす主筋比 $p$ の影響

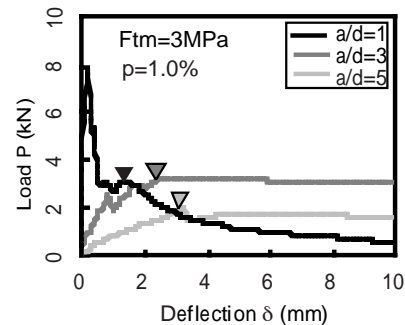


図-7 荷重P - 中央点たわみ $\delta$ 曲線に及ぼすせん断スパン比 $a/d$ の影響

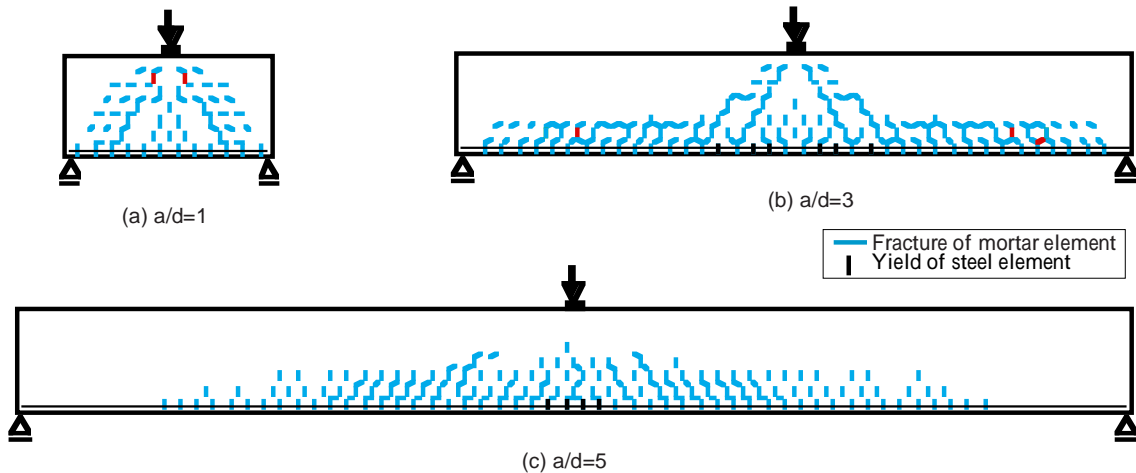


図-8 要素の破壊状況に及ぼすせん断スパン比 $a/d$ の影響 ( $P_{max}$ 時,  $F_{tm}=3\text{MPa}$ ,  $p=1.0\%$ )

ルタルの引張強度 $F_{tm}$ の影響を示したものである。図中の三角印は、主筋が降伏した時点を表す。 $F_{tm}=3\text{MPa}$ および $F_{tm}=5\text{MPa}$ では、主筋の降伏とともに最大荷重に達し、その後延性的な破壊を示すが、 $F_{tm}=1\text{MPa}$ では、主筋の降伏は最大荷重以降となる。

図-6は、荷重P - 中央点たわみ $\delta$ 曲線に及ぼす主筋比 $p$ の影響を示したものである。主筋量が少ないと、鋼材が比較的小さな応力で降伏するため、コンクリートは、大きな曲げモーメントが作用す

る梁の中央部付近で破壊するが、主筋量が多くなると、主筋の負担する応力が大きくなり、曲げ破壊を生じにくくなるため、梁の耐力は増大する。しかし、主筋量が多すぎると、主筋の降伏よりもコンクリートのせん断破壊や圧壊が先行して起こるため、非常に脆性的な破壊に転じる。

図-7は、荷重P - 中央点たわみ $\delta$ 曲線に及ぼすせん断スパン比 $a/d$ の影響を示したものである。 $a/d$ が大きくなるほど、最大荷重は減少し、その時のたわみは増大する。特に、 $a/d=1$ で非常に脆性的な

破壊を生じ、 $a/d$ が大きくなるにつれて破壊は延性的になる。 $a/d$ が小さい場合、アーチ作用が比較的持続しやすく、せん断強度が大きくなるが、逆に $a/d$ が大きくなると、その効果が薄れ、せん断破壊から曲げ破壊に移行するためである。

図-8は、要素の破壊状況に及ぼすせん断スパン比 $a/d$ の影響を比較したものである。図(a)の場合には、支点と載荷点を結ぶ方向にせん断破壊が生じているが、 $a/d$ が大きくなるにつれて、曲げ破壊に移行していく様子が観察できる。この傾向は、既往の実験結果<sup>9)</sup>とも一致する。

### 3. せん断補強筋を配したRC梁の曲げ破壊挙動

#### 3.1 解析の概要

最初に、せん断補強筋を配したRC梁の曲げ破壊解析への本解析手法の適用性を確認するために、既往の実験的研究<sup>2)</sup>と同条件でシミュレーションを行った。図-9は、RC梁の曲げ破壊実験との比較に用いた解析モデルである。梁背(全背) $d$ を200mm、幅 $b$ を150mm、梁のスパン $l_s$ を1200mm、せん断スパン長さ $a$ を360mm、せん断補強筋間隔 $x$ を60mmとした。梁の中央から左右それぞれ240mmの位置に載荷板を設置した2点集中載荷とした。梁の引張縁および圧縮縁に鋼材節点を配置し、これらを結んで鋼材要素を形成した。材軸方向に形成した鋼材要素を主筋、その直交方向に形成した鋼材要素をせん断補強筋とする。な

お、せん断補強筋をモデル化した鋼材要素は、軸方向力のみを負担する。これは、2次元解析におけるせん断補強筋の効果が、要素を構成する2つの節点の軸方向の変位を拘束することであると判断できるためである。主筋をモデル化した鋼材要素は、要素のせん断方向の力も負担する。また、主筋を構成する鋼材節点間には、鋼材要素とモルタル要素を並列に形成した。モルタルの引張強度 $F_{tm}$ は3MPa、鋼材の降伏応力 $\sigma_y$ は293MPa、主筋比 $p$ は1.3%、せん断補強筋比 $p_w$ は0.8%とした。せん断補強筋比は以下の式で表される。

$$p_w = \frac{a_w}{b \cdot x}$$

ここに、 $a_w$ ：せん断補強筋の断面積 ( $\text{mm}^2$ )、

$b$ ：梁の幅 (10mm)、

$x$ ：せん断補強筋間隔 (mm)

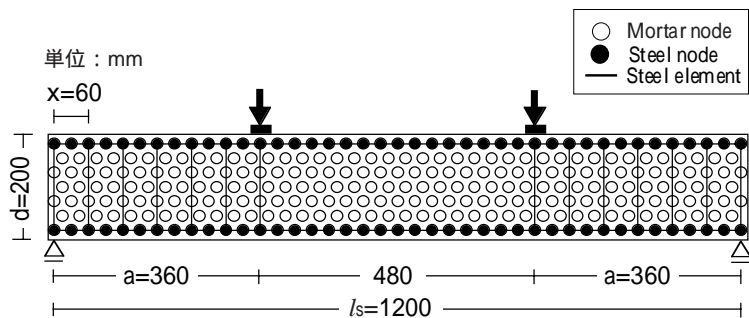


図-9 RC梁の曲げ破壊実験との比較に用いた解析モデル

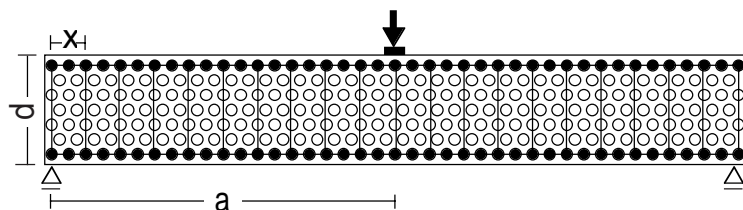


図-10 せん断補強筋の影響の検討に用いた解析モデル

表-4 せん断補強筋の入力データ

$a_w$	$p_w$			$P_y$	$K_s$
	$x=60$	$x=90$	$x=120$		
1.8	0.30	0.20	0.15	0.54	378
3.0	0.50	0.33	0.25	0.90	630
6.0	1.00	0.67	0.50	1.80	1,260

[Notes]

$a_w$ : Section area of shear reinforcing bar ( $\text{mm}^2$ ),

$p_w$ : Ratio of shear reinforcing bar (%),

$x$ : Pitch of shear reinforcing bar (mm),

$P_y$ : Yield force (kN),

$K_s$ : Stiffness of steel (kN).

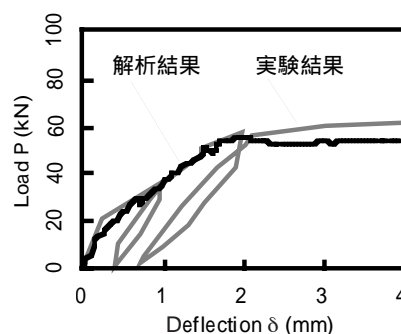


図-11 荷重 $P$  - 中央点たわみ $\delta$ 曲線に関する解析結果と実験結果<sup>2)</sup>との比較

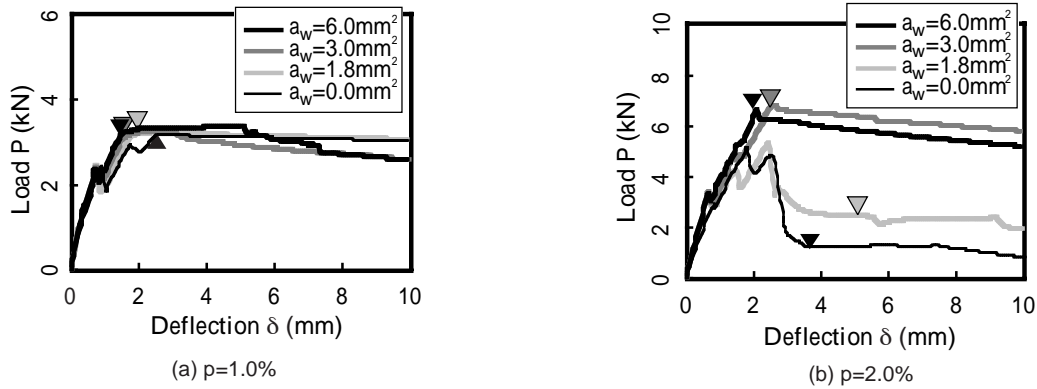


図-12 荷重P - 中央点たわみ $\delta$ 曲線に及ぼすせん断補強筋の断面積 $a_w$ の影響

次に、RC梁の曲げ破壊挙動に及ぼすせん断補強筋の断面積および間隔の影響を検討するためのシミュレーションを行った。図-10がその解析モデルである。せん断補強筋間隔 $x$ は、60, 90, 120mmの3水準に設定した。表-4は、せん断補強筋の入力データである。せん断補強筋の断面積 $a_w$ を1.8, 3.0, 6.0 $\text{mm}^2$ の3水準に設定した。また、モルタルの引張強度 $F_{tm}$ は3MPa、鋼材の降伏応力 $\sigma_y$ は300MPa、主筋比 $p$ は1.0および2.0%とした。

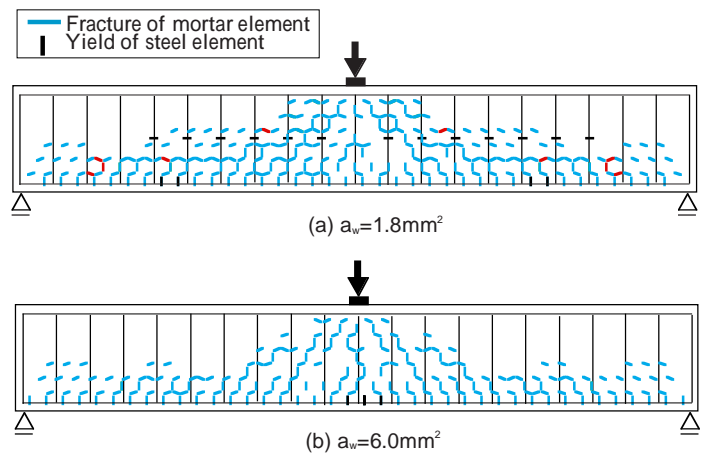


図-13 要素の破壊状況に及ぼすせん断補強筋の断面積 $a_w$ の影響 ( $\delta=10\text{mm}$ ,  $F_{tm}=3\text{MPa}$ ,  $p=2.0\%$ ,  $x=60\text{mm}$ )

### 3.2 解析結果とその考察

図-11は、荷重P - 中央点たわみ $\delta$ 曲線に関する解析結果と実験結果<sup>1)</sup>を比較したものである。この図によると、解析結果と実験結果は、ほぼ一致しており、本解析手法の適用性が確認できる。なお、 $\delta = 2\text{mm}$ において、実験では荷重が増大しているのに対して、解析では荷重が若干減少しているが、これは、本解析では、コンクリートと鉄筋の境界面でのすべり破壊を考慮していないためであると考えられる。

図-12は、荷重P - 中央点たわみ $\delta$ 曲線に及ぼすせん断補強筋の断面積 $a_w$ の影響を示したものである。図中の $a_w=0.0\text{mm}^2$ はせん断補強筋のないRC単筋梁の場合である。同図(a)の $p=1.0\%$ の場合には、せん断補強筋の断面積にかかわらず、ほぼ同様の挙動を示しており、せん断補強筋の効果は現れていない。この程度の主筋比では、RC単筋梁に

おいても脆性的なせん断破壊を生じないためである。一方、RC単筋梁が脆性的な破壊を呈する図(b)の $p=2.0\%$ の場合には、せん断補強筋の断面積が増加するほど、最大荷重は増大し、破壊は延性的になる。

図-13は、 $p=2.0\%$ における要素の破壊状況に及ぼすせん断補強筋の断面積 $a_w$ の影響を比較したものである。同図(a)の $a_w=1.8\text{mm}^2$ の場合には、梁全体に破壊が及んでおり、せん断補強筋も降伏していることから、せん断補強筋量が過小と判断できる。一方、同図(b)の $a_w=6.0\text{mm}^2$ の場合には、 $a_w=1.8\text{mm}^2$ の場合と比較して、破壊した要素が減少しており、梁の中央部付近に破壊が集中している。

図-14は、荷重P - 中央点たわみ $\delta$ 曲線に及ぼすせん断補強筋間隔 $x$ の影響を示したものである。図-12と同様に、RC単筋梁が脆性的な破壊を生じ

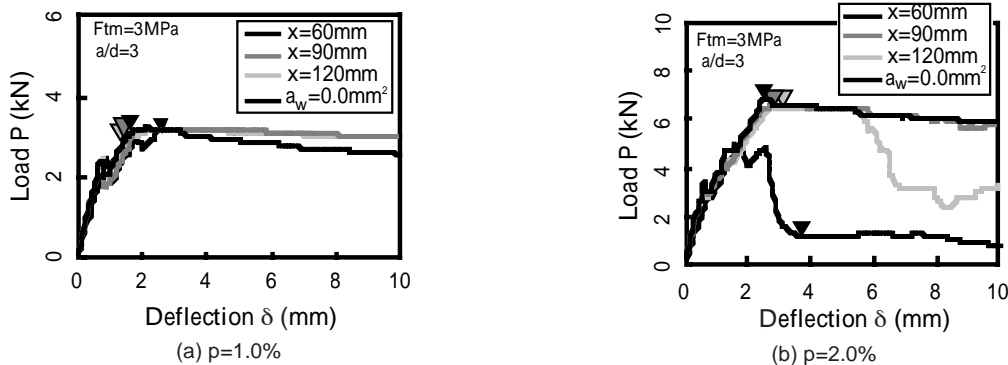


図-14 荷重P - 中央点たわみ $\delta$ 曲線に及ぼすせん断補強筋間隔xの影響

ない $p=1.0\%$ の場合には、せん断補強筋間隔の影響は認められない。一方、RC単筋梁が脆性的なせん断破壊を呈する $p=2.0\%$ の場合には、せん断補強筋間隔が狭くなるほど破壊が延性的になっており、補強効果が顕著に現れる。

図-15は、 $p=2.0\%$ における要素の破壊状況に及ぼすせん断補強筋間隔xの影響を比較したものである。x=120mmの場合は、x=60mmの場合と比較して、梁の中央部付近で、せん断補強筋の間に、より多くの破壊を生じており、十分な補強効果が現れていない。

以上の傾向は、既往の実験結果<sup>6)</sup>とほぼ一致している。

#### 4. まとめ

鋼材要素を導入した粘弾塑性サスペンション要素法を用いて、いくつかのRC梁の曲げ破壊解析を行い、各種要因がその破壊挙動に及ぼす影響を明らかにした。また、解析結果をRC理論式または既往の実験結果と比較することにより、本解析手法の適用性を確認することができた。今後、さらにコンクリートと鉄筋の境界面で生じる付着破壊を考慮した解析を行う予定である。

#### 謝辞

本研究の実施に際して、名古屋大学・森博嗣助教および東邦ガス・杉浦充氏に多くの助言をいただいた。付記して謝意を表する。

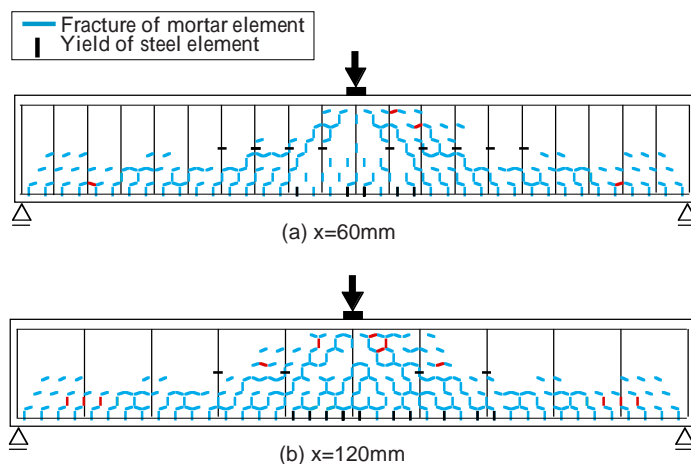


図-15 要素の破壊状況に及ぼすせん断補強筋間隔xの影響 ( $\delta=10\text{mm}$ ,  $F_{tm}=3\text{MPa}$ ,  $p=2.0\%$ ,  $a_w=3.0\text{mm}^2$ )

#### 参考文献

- 1) 六郷恵哲, 白井伸明, 内田裕市: コンクリートの破壊の数値解析の現状と課題, コンクリート工学, Vol.32, No.12, pp.5-14, 1994.12
- 2) 武藤清: 構造物の強度と変形, 丸善, pp.1-42, 1965.7.
- 3) 荒井正直, 谷川恭雄, 森博嗣, 黒川善幸: 粘弾塑性サスペンション要素法によるコンクリートの引張・曲げ破壊挙動の解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.771-776, 1995.6
- 4) 荒井正直, 船見晃啓, 黒川善幸, 森博嗣, 谷川恭雄: 非連続体モデルを用いたコンクリートの破壊解析手法, 日本建築学会構造系論文集, No.471, pp.1-9, 1995.5
- 5) 朴相俊, 谷川恭雄, 森博嗣, 平岩陸, 杉浦充: 粗骨材 - モルタル境界面の影響を考慮したコンクリートの破壊解析, 日本建築学会構造系論文集, No.575, pp.15-21, 2004.1
- 6) 谷川恭雄ほか: 鉄筋コンクリート構造 - 理論と設計 -, 森北出版, pp.88-95, 1997.10