

論文 コンクリート有孔梁におけるアーチ機構に関する実験的研究

飯田 誠次郎^{*1}・福井 剛^{*2}・岡田 満^{*3}・浜原 正行^{*4}

要旨：せん断スパン比と開口部寸法を実験変数とし、軸方向筋にアンボンド PC 鋼棒を用いた付着のないコンクリート系有孔梁試験体 6 体に対して、一方向単調載荷実験を行った。この結果、付着のない有孔梁試験体でも十分な耐力を有していることが分かった。また、コンクリートには平面保持が成立し、そのひずみは曲げモーメント分布に対応していた。したがって、付着のない有孔梁試験体には部材を対角線方向に結ぶ圧縮束によって構成されるアーチ機構は形成されていないことが分かった。

キーワード：アンボンド PC 鋼棒, アーチ機構, せん断スパン比, 開口部寸法

1. はじめに

鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説¹⁾(以後, RC 終局指針と略称)では、部材のせん断強度を下界定理に基づいたトラス・アーチ作用による負担せん断力の和で評価している。しかし、有孔梁の母材については、せん断耐力をトラス作用による負担せん断力のみで評価し、アーチ作用によるせん断伝達機構を無視している。これは、**図-1**に示すように、開口がアーチ機構の形成を阻害するとの考えに基づいたものである²⁾。しかし、圧着型プレキャストプレストレストコンクリート(以後, PCaPC と略称)のように、軸方向鋼材に十分な付着が確保できない部材では、トラス機構を發揮させることが困難であると考えられる。したがって、このような部材に RC 終局指針の考えを適用すると、開口を設けることは殆ど不可能となる。以上のようなことを勘案し、浜原ら³⁾は圧着型 PCaPC 有孔梁試験体に対して正負繰返し載荷実験を行い、その終局強度が母材のアーチ耐力と開口部終局強度のいずれか小さい方で評価でき、PCaPC 有孔梁の設計には、RC 終局

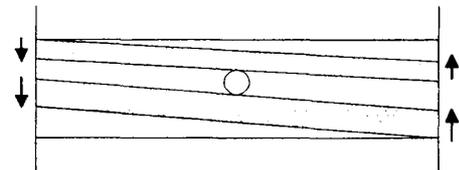


図-1 有孔梁のアーチ作用

指針は適用できないことを明らかにした。

本論文は母材のせん断耐力が曲げ耐力よりも非常に小さくなるように設計した軸方向筋に付着のないコンクリート系有孔梁に対して、一方向単調載荷実験を行い、そのせん断伝達機構と終局強度を明らかにするものである。

2. 実験概要

文献³⁾の PCaPC 有孔梁実験では、初期の段階から PC 鋼棒の付着喪失が起こったが、完全なアンボンド状態ではないため、せん断伝達機構には若干の不確定要素が残されているといえる。

以上のことから、本実験の試験体は完全に付着を取り除くため、軸方向筋にアンボンド PC 鋼棒を用いたコンクリート系有孔梁試験体とし、せん断スパン比と開口部寸法の 2 因子を組

*1 日本大学大学院 理工学研究科博士前期課程 海洋建築工学専攻 (正会員)

*2 (株)ピー・エス東京支店建築部設計課 工博(正会員)

*3 日本大学助教授 短期大学部建築学科 工博(正会員)

*4 日本大学助教授 理工学部海洋建築工学科 工博(正会員)

み合わせた 6 体とした。表-1 に要因と水準を、図-2 に配筋詳細を示す。

なお、開口部寸法 $L_o \times H_o = 300 \times 150$ のものは開口部破壊が、 $L_o \times H_o = 90 \times 90$ のものは母材破壊が先行するように設計した。

載荷は図-3 に示すように、50t 圧縮ジャッキを用いた若林式逆対称載荷とし、左右スタブの回転角が等しくなるよう、自由端側に 10t 圧縮ジャッキを用いて制御を行った。載荷ルールは一方方向単調載荷として行った。

3. 材料試験結果

表-2, 3, 4, 5 にそれぞれ、試験体のコンクリートの調査表、コンクリート、鉄筋、PC 鋼棒の材料試験結果を示す。

表-2 コンクリートの調査表

W/C (%)	S/G (%)	単位重量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	NL-4000
65	48	165	254	920	1005	2.87

設計基準強度 $F_c = 30\text{MPa}$, 粗骨材最大寸法 20mm
スランプ 80mm, 空気量 4%

表-3 コンクリートの材料試験結果

試験体名	圧縮強度 σ_B (MPa)	ヤング係数 E_c ($\times 10^4$ MPa)	割裂強度 σ_t (MPa)
SR10-Lo30-Ho15	41.3	3.28	3.53
SR15-Lo30-Ho15			
SR20-Lo30-Ho15			
SR10-Lo9-Ho9	39.5	3.31	3.36
SR15-Lo9-Ho9			
SR20-Lo9-Ho9			

表-4 鉄筋の材料試験結果

径 (mm)	材種	降伏強度 f_y (MPa)	最大強度 f_{max} (MPa)	ヤング係数 E_s ($\times 10^4$ MPa)	伸び率 (%)
D6	SD345	405	588	1.84	18.1
D10	SD295	401	530	1.96	19.2
D13	SD295	350	493	1.88	19.2
D19	SD345	375	553	1.85	19.1

表-5 PC 鋼棒の材料試験結果

径 (mm)	材種	降伏強度 f_y (MPa)	最大強度 f_{max} (MPa)	ヤング係数 E_s ($\times 10^4$ MPa)	伸び率 (%)
$\phi 26$	C種1号	1177	1288	2.0	9

表-1 各試験体への実験要因の割付

$L_o \times H_o$ a/D	300×150*	90×90
1	SR10-Lo30-Ho15	SR10-Lo9-Ho9
1.5	SR15-Lo30-Ho15	SR15-Lo9-Ho9
2	SR20-Lo30-Ho15	SR20-Lo9-Ho9

* PC 規準での許容最大寸法

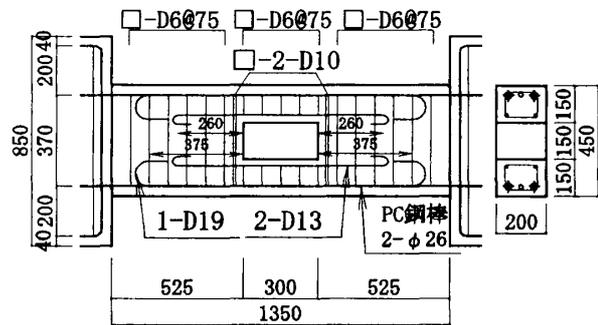
[共通因子] $b=200\text{mm}$, $D=450\text{mm}$, $d_p=410\text{mm}$

コンクリート設計強度 $F_c=30\text{MPa}$

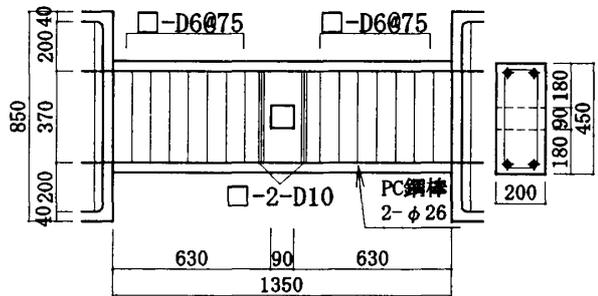
母材あばら筋比: $p_w=0.4\%$ ($\square D6-\phi 75$)

軸方向 PC 鋼材 2- $\phi 26$ (C 種)

プレストレスレベル $\eta_g = \Sigma P / (bDFc) = 0.2$ ($\Sigma P = 540\text{kN}$)



SR15-Lo30-Ho15



SR15-Lo9-Ho9

図-2 配筋詳細図

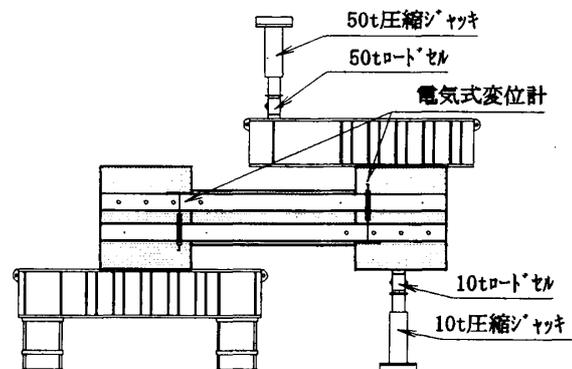


図-3 加力装置と相対変位の測定装置

4. 破壊性状と荷重部材角関係

本実験より得られた破壊モードは以下の2通りである。

開口部弦材の対角線状せん断破壊(DT) この破壊モードはせん断スパン比1.0で開口寸法が大きい試験体(SR10-Lo30-Ho15)に見られた。

図-4(a)に示すように、部材角1/300で発生した開口の上側にある弦材と下側にある弦材(以後、開口部弦材と略称)の斜めひび割れが、部材角1/150の変形レベルに達すると、開口部弦材を対角線上に進展し、ひび割れの先端部での圧壊を伴って急激な耐力低下を生じた。**図-4(a)**にこの試験体の最終破壊状況を示す。

母材端部の圧壊(C) この破壊モードはSR10-Lo30-Ho15以外すべての試験体で見られた。**図-4(b)**に示すように、部材角1/300~1/150で起こった部材両端部の圧壊が部材角の上昇に伴って徐々に進行し耐力低下を起こした。

図-5(a), (b), (c)にせん断スパン比ごとの荷重部材角関係を示す。せん断スパン比1.0で開口部寸法の大きい試験体は開口部破壊が先行したため、開口の小さい試験体との耐力差が見られるが、せん断スパン比1.5と2.0は開口部の大きさによる最大耐力の差が見られず、前述でも述べたようにいずれも母材破壊が先行した。

したがって、付着がまったくない有孔梁試験体でも十分な耐力を有していることが分かる。

5. 諸限界荷重

表-6に母材曲げひび割れ発生荷重 P_{cr} 、最大荷重 P_{max} 、および破壊モードの一覧を示す。

6. 曲率分布

図-6(a), (b)はそれぞれ開口部破壊が先行した試験体と、母材破壊が先行した試験体の開口部弦材の曲率分布を示したものである。この図から、開口部弦材の反曲点位置は中央部近傍にあり、いずれの試験体も破壊モードに関係なく、開口部弦材はフィーレンデル部材として挙動していることがわかる。

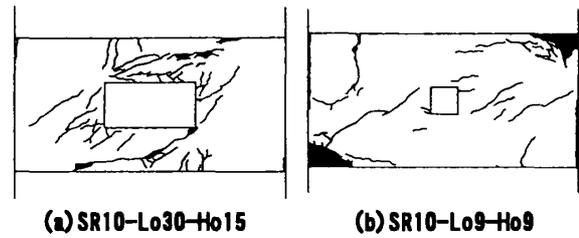


図-4 最終破壊状況

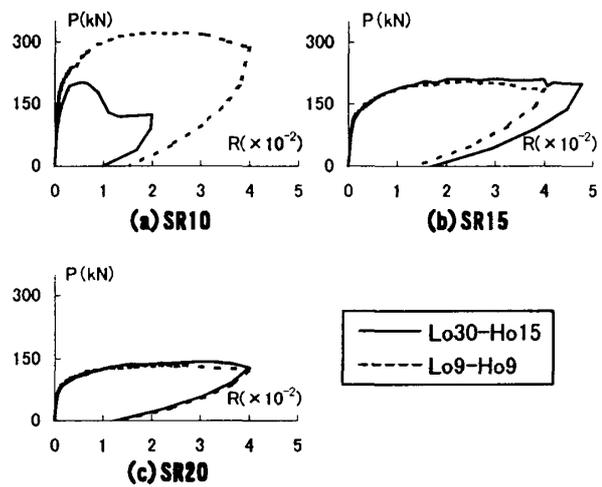


図-5 荷重-部材角関係

表-6 諸限界荷重, 破壊モード

試験体名	P_{cr} (kN)	P_{max} (kN)	破壊 モード
SR10-Lo30-Ho15	162	202	DT
SR15-Lo30-Ho15	113	212	C
SR20-Lo30-Ho15	78	143	C
SR10-Lo9-Ho9	141	321	C
SR15-Lo9-Ho9	102	204	C
SR20-Lo9-Ho9	74	135	C

図-7はせん断スパン比が1.5で開口部寸法の大きい試験体(SR15-Lo30-Ho15)の母材の曲率分布を示したものである。この図から、曲率は両端部に集中して分布していることが分かる。破壊状況の図からもわかるように、ひび割れは両端部に集中しており、この曲率分布はひび割れ性状によく対応しているといえる。**図-8**に試験体の曲率測定装置図の一例を示す。

7. 母材の変形成分

図-9(a)~(d)はせん断スパン比1, 2の試験体の、部材角と全体変形に占める曲げ変形とせん断変形の割合の関係を示したものである。な

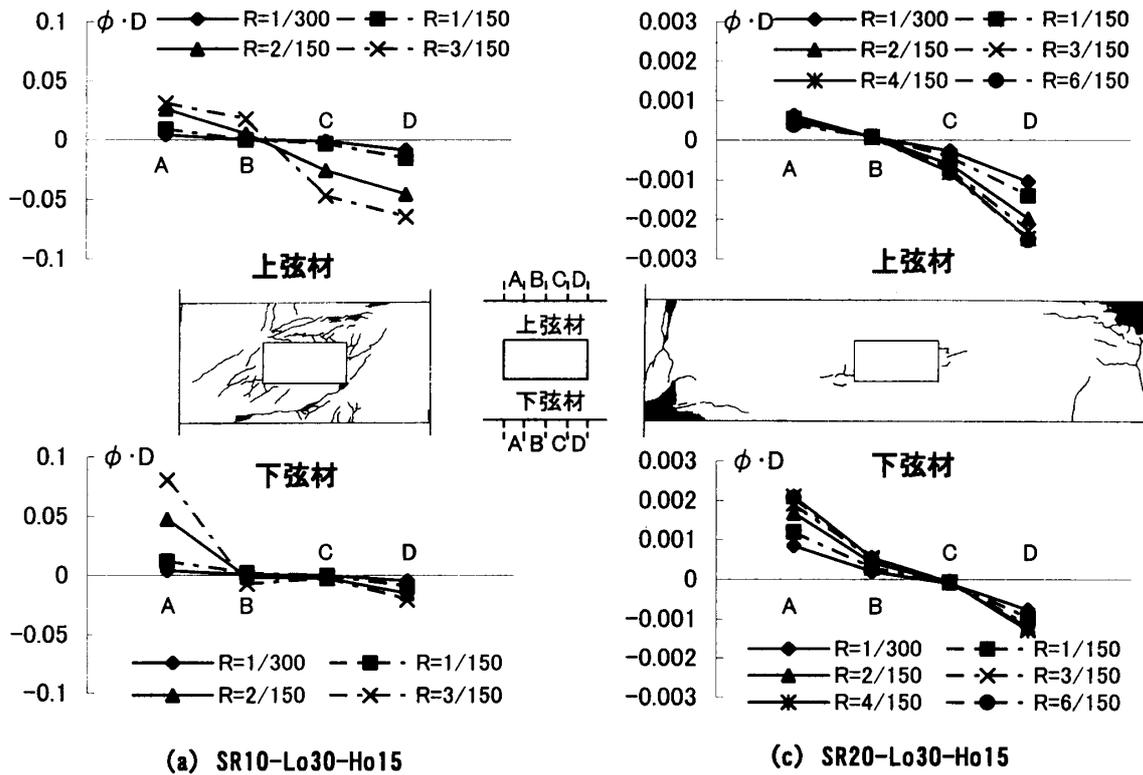


図-6 開口部弦材の曲率分布

お、曲げ変形は Mohr の定理を用いて評価し、せん断変形は全体変形と曲げ変形の差で評価した。開口部弦材を対角線状にせん断破壊(DT)したせん断スパン比 1.0 で開口寸法が大きい試験体(SR10-Lo30-Ho15)は開口部弦材のせん断劣化により変形が増加したため、せん断変形の割合が上昇している。せん断変形は斜めひび割れの発生により増加するが、SR10-Lo30-Ho15 以外の試験体は端部の圧壊により変形が増加したため、曲げ変形の割合は終局時で 80~90%以上となっている。これらの試験体は一見曲げ耐力が卓越した試験体のように思えるが、最大耐力の実験値 Q_{max} と、e 関数法を用いて算定した曲げ終局強度 Q_{nu} の比を取った図-10 から、いずれの試験体も最大耐力が曲げ耐力の 3 割程度であり、1 節で述べた設計の意図どおり、せん断耐力が卓越した試験体となっていることが分かる。曲げ耐力の算定に際しては鋼材とコンクリートを完全付着としている。これに対して、本試験体は付着が無いため、変位の増加に伴なう軸方向鋼材の応力増分が小さいこと、圧縮側

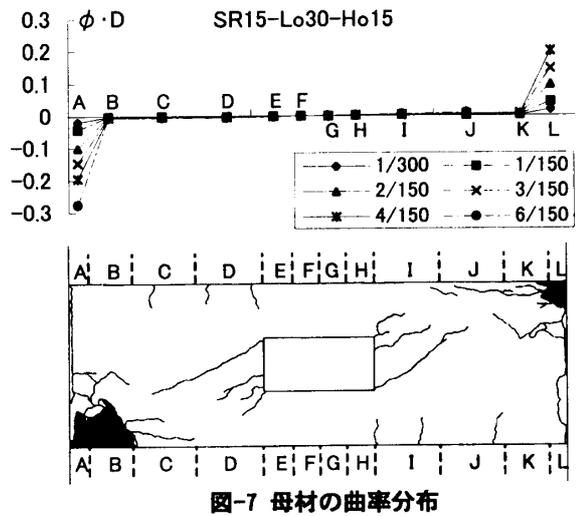


図-7 母材の曲率分布

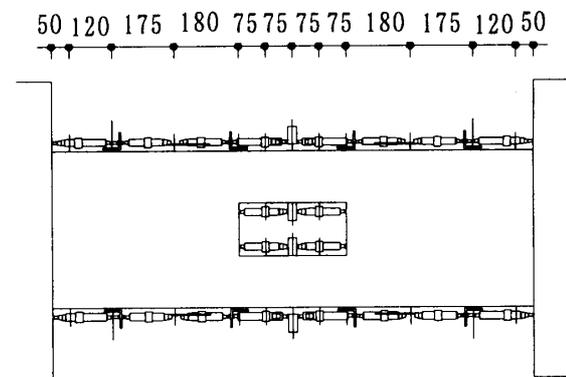


図-8 曲率測定装置図

鋼材に圧縮力が生じないため、結果的に曲げ耐力を大きく下回る結果となっている。

部材を対角線方向に結ぶ圧縮側によって伝達されるアーチ機構が形成されているのならば、変形はせん断変形成分がかなりの割合を占めるはずである。上述の結果は、付着のないコンクリート有孔梁試験体にはアーチ機構が形成されていないことを示唆していると考えられる。

8. 鉄筋のひずみ

図-11 は開口部の大きい試験体の各部材角レベルにおける、開口部軸方向補強筋のひずみ分布の一例を示したものである。図-6 より、開口部弦材の反曲点はほぼ中央にあり、弦材はフィレンデル部材として挙動していることが分かった。軸方向補強筋のひずみ分布はこの曲率分布によく対応しているといえる。

9. コンクリートのひずみ

図-12(a), (b)はせん断スパン比が 1.5 である試験体のコンクリートのひずみ分布をそれぞれ示したものである。ひずみ勾配は反曲点から離れるにしたがって増加していることからモーメント分布にほぼ対応していることが分かる。各断面でのひずみは圧縮縁で最大となり、断面の内側に入るにしたがって減少し、引張に転じていることからコンクリートには平面保持が成立しているといえる。母材の両端部引張側のひずみは圧縮側に比べ値が小さく、その勾配も小さい。これは両端部の引張側に曲げひび割れが

発生したため、この部位での引張ひずみが開放されたことによるものだと考えられる。また、開口部近傍断面では平面保持から外れる傾向が見られ、この傾向は開口部寸法の大きい試験体のほうが顕著である。これは開口部弦材がフィレンデル部材として挙動している影響を受けているためだと考えられる。以上より、部材を対角線方向に結ぶ圧縮束によって構成されるアーチ機構は形成されていないことが分かる。

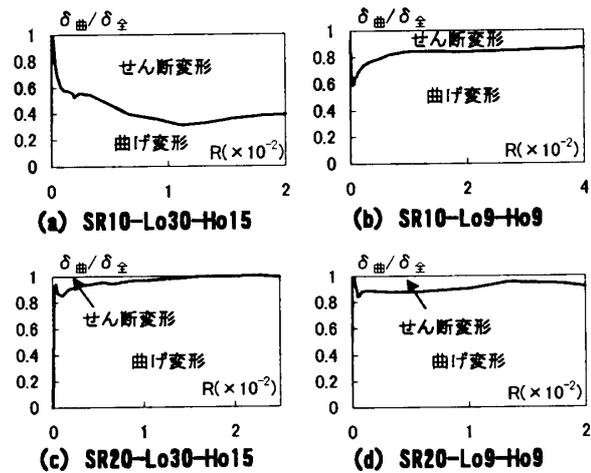


図-9 部材角と全変形に占める曲げ変形とせん断変形の割合

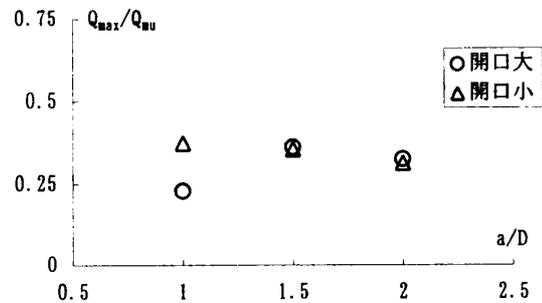


図-10 最大荷重と曲げ終局強度の比

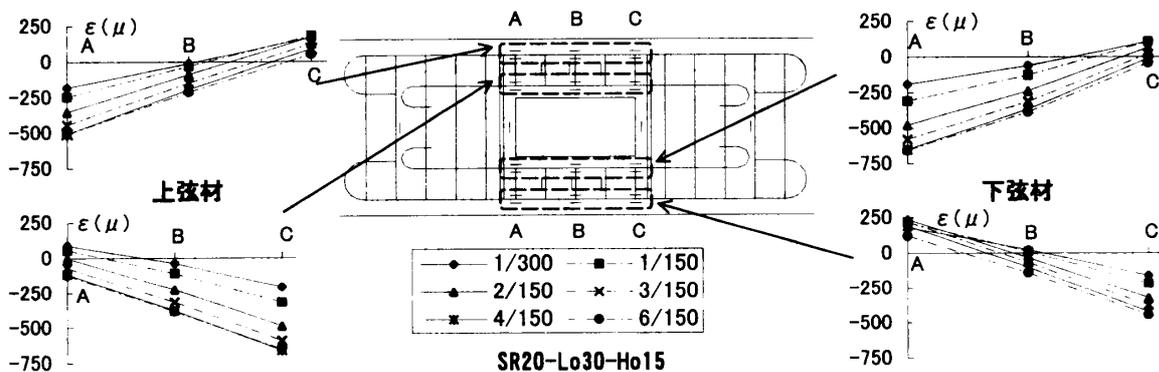


図-11 開口部軸方向補強筋のひずみ分布

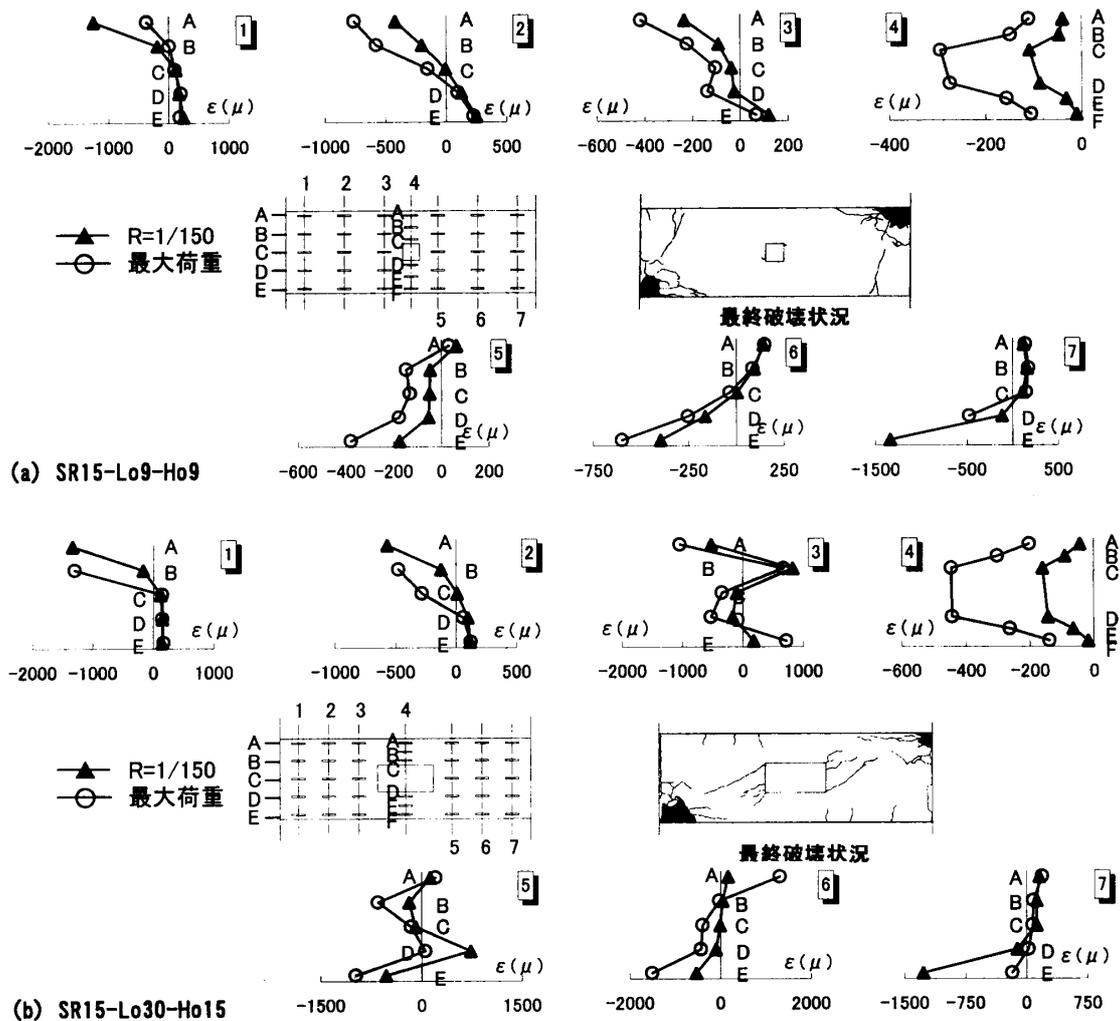


図-12 コンクリートのひずみ分布

10. まとめ

アンボンド PC 鋼棒を用いたコンクリート有孔梁試験体について一方向単調荷重実験を行い、以下に示す知見を得た。

1) 開口部破壊が先行した試験体(SR10-Lo30-Ho15)を除くと、軸方向筋の付着がまったくないコンクリート有孔梁試験体でも十分な耐力を有していることが分かった。

2) 開口部破壊が先行した試験体(SR10-Lo30-Ho15)以外の試験体は、変形のほとんどが曲げ変形成分であった。

3) コンクリートのひずみ分布は曲げモーメント分布に対応し、コンクリートには平面保持が成立していた。

4) せん断力は母材を対角線方向に結ぶ圧縮束の鉛直方向成分によって評価されるものでは

なく、通常の梁理論の枠組みの中で評価されるものであると考えられる。

[参考文献]

1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, pp. 106-146, 1990, 10

2) 市之瀬ほか：鉄筋コンクリート有孔梁のせん断設計法, コンクリート工学年次論文報告集, pp. 303-308, 1991

3) 浜原ほか：プレキャストプレストレストコンクリート造有孔梁の力学的挙動に関する実験的研究：プレストレストコンクリート, 第41巻第3号, pp. 14-19, 1999

4) 浜原ほか：プレストレストコンクリート有孔梁の終局強度設計法, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 442, pp. 133-139, 1992, 12