

論文

[2045] 鉄筋コンクリート短柱のせん断破壊における付着の影響  
に関する研究

正会員○ 盧 永坤 (早稲田大学建築学科)

正会員 矢代 晴実 (東京海上火災保険)

正会員 田中彌壽雄 (早稲田大学建築学科)

1. はじめに

せん断加力を受ける鉄筋コンクリート短柱の破壊は、一般的に、端部での曲げひび割れ・曲げせん断ひび割れが発生し、以降端部せん断ひび割れ・中央部せん断ひび割れ・付着割裂ひび割れのうちいずれかの発生によって最大耐力に達する。これらの破壊性状の違いは材料強度、軸力、帯筋と主筋の配筋方法等による。さらに、筆者らのシアスパン比1.5の鉄筋コンクリート短柱における繰り返しせん断載荷実験によると、主筋の付着状況により部材端での曲げひび割れの発生、及び曲げせん断ひび割れの形成に違いが生じ、また曲げひび割れと曲げせん断ひび割れの形成が以後の部材の破壊性状に大きく影響することが見られた[1]。

本研究では、主筋とコンクリートの付着状況が部材端での曲げとせん断系のひび割れ形成と最大耐力までの部材の破壊に及ぼす影響を把握することを目的とし、有限要素法による解析を行なった。

2. 解析概要

本研究で対象とする実験供試体は、筆者らが繰り返しせん断載荷実験を行ったシアスパン比1.5の鉄筋コンクリート短柱である(図-1)。解析は、帯筋比を0.85%とし、軸力(15, 30, 45tf)、主筋本数(4-D19(引張主筋比 $P_t=0.92\% \rightarrow 0.96\%$ , 周長 $\phi=12.0\text{cm}$ ), 6-D16(0.96%, 15.0cm), 8-D13 & 2-D10(0.93% $\rightarrow 0.96\%$ , 19.0cm))、端部での付着状況(主筋とコンクリート間の付着力の有無)をパラメータとした。主筋本数の違いによる主筋の応力分担の影響を無くすために引張主筋比は一定とした。載荷方法は、所定の軸力載荷後、部材上部にせん断変形保持のためのローラーを設置し、左方向からせん断力を載荷した。表-1に用いられたパラメータと部材名との関係を、表-2に材料特性を、図-2に要素分割図を示す。コンクリートの非線形挙動は柱部(黒く塗られている)のみ考慮した。

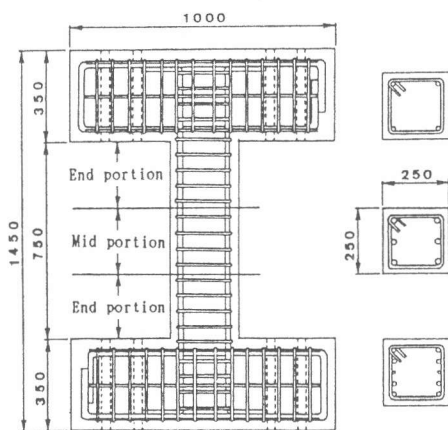


図-1 実験供試体

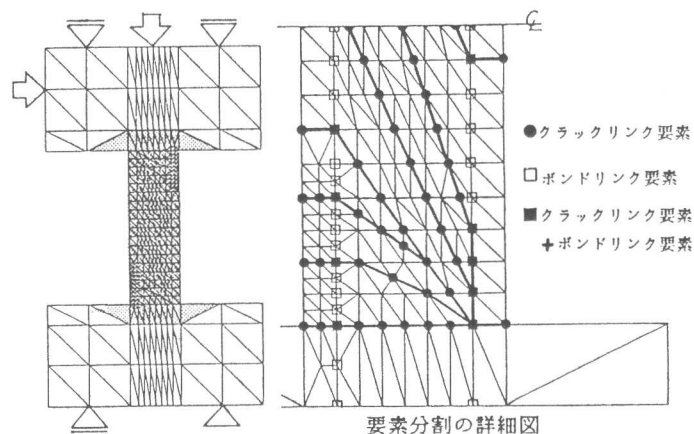


図-2 要素分割図

表-1 解析に用いられたパラメータ

軸力(tf)	帯筋比(%)・帯筋間隔(mm)	主筋本数	付着状況
15	0.85@40(3-6φ)	4(4-D19)	B:付着除去なし
30		6(6-D16)	UE:端部付着除去
45		10(8-D13, 2-D10)	
例) 30-0.85@40-6B			

2. 1 有限要素モデル

コンクリートは一定ひずみ三角形要素とし、構成則はDarwin等による等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデル[2]を修正し採用した。破壊条件はKupfer等の研究[3]に基づいた。

鉄筋は主筋、帯筋とも線材要素とし、応力度-ひずみ関係はバイリニアとした。

鉄筋とコンクリート間の付着挙動は、直交するバネによるボンドリンク要素を用いて表した。付着応力-すべり関係は、森田・角による基本則[4]にひび割れによる付着力低下とひび割れ間での付着剛性低下を考慮して用いた。

コンクリートのひび割れは、曲げ系のひび割れにおける引張主筋とコンクリート間の付着関係と、せん断系のひび割れにおける骨材のかみ合いによるせん断力伝達を考慮するために、ひび割れ位置を明確にする必要から、予め設定した2方向のバネからなるクラックリンク要素による離散ひび割れモデルを用いた。ひび割れの発生はひび割れ軌道と直交方向のバネの力がコンクリートの割裂引張強度を越えるか、またはクラックリンク要素と隣接したコンクリート要素が引張強度に達すると発生するものとした。これはひび割れと平行方向の圧縮力の影響を考慮するためである。ひび割れ発生後のクラックリンク要素の応力度-変位関係は、ひび割れの直交方向では引張軟化特性[5]を、せん断すべり方向では骨材のかみ合いによるせん断力伝達[6]を考慮し、以下の関係式を用いた。

$$\sigma_t = \frac{0.04}{W+0.001} + 42.64 - 10000.0 \cdot W \quad (W < 0.005)$$

$$\sigma_t = 0.0 \quad (W \geq 0.005) \quad (\text{psi, in}) \quad (1)$$

$$\tau_s = \frac{-f_c}{30.0} + \{1.8 \cdot W^{-0.80} - (0.234 \cdot W^{-0.707} - 0.20) \cdot f_c\} \cdot \delta_s \quad (\text{N/mm}^2, \text{mm}) \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_t$  はひび割れ間の応力、 $\tau_s$  はひび割れ面でのせん断応力、 $W$  はひび割れ幅、 $\delta_s$  はひび割れ面でのすべり量、 $f_c$  はコンクリートの圧縮強度である。式(1)での破壊エネルギー $G_f$  は0.25psi・inである。

ひび割れは実験結果より柱付け根の曲げひび割れ、端部曲げひび割れ、曲げせん断ひび割れ、端部せん断ひび割れ、端部より中央部まで達するせん断ひび割れ、対角せん断ひび割れ、かぶりコンクリートの圧壊によるかぶり剥離を設定した。中央部での付着割裂ひび割れは、繰り返しせん断载荷による付着力低下による影響が大きいと考えられるため、考慮していない。

表-2 材料特性

コンクリート		
一軸圧縮強度	$f_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	283.4
一軸引張強度	$f_t$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	28.1
降伏時の歪	$\epsilon_{cu}$	0.003
初期弾性係数	$E_{co}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$2.1 \times 10^5$
ポアソン比	$\nu$	0.180
鉄筋		
降伏強度	$\sigma_{sy}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	3780.0
初期弾性係数	$E_{so}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$2.05 \times 10^6$
降伏後の係数	$E_{sv}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$1.0 \times 10^5$
鉄筋とコンクリート間の付着		
初期滑り剛性	$E_{bo}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$5.0 \times 10^4$
2次滑り剛性	$E_{bv}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$2.5 \times 10^3$

### 3. 端部での曲げとせん断ひび割れに関する実験による考察

鉄筋コンクリート柱にせん断力が作用すると、柱・はり接合部に曲げひび割れが生じ、次にひび割れは①曲げ→せん断（または曲げせん断）または②せん断→曲げといった順序で発生する。一般にシアスパン比が小さくまたは軸力が大きい場合に②のような順序になりやすい。①か②の傾向が明かな筆者らの実験結果を図-3, 4に示す。両方の結果を比較すると、①の傾向の15-0.85@60-6Bの供試体の場合、端部の広い範囲において主筋の引張り負担が大きく、帯筋のせん断力負担はせん断ひび割れ発生後も急激な増加がなく、中央部に向かうほどせん断力負担が大きい。②の傾向の45-0.85@60-6Bの供試体の場合、主筋の引張り負担が小さく、帯筋のせん断力負担は部材全体に分布しており、せん断ひび割れ発生後急激に増加した。

主筋本数の違いによる（すなわち付着力の違い）結果においては、主筋本数が多いほど曲げひび割れ形成が顕著で端部での帯筋によるせん断力負担も少なかった。一方、端部での主筋の付着を除去した供試体では柱付け根での曲げひび割れ以外の曲げひび割れは生じなかった（図-13）。

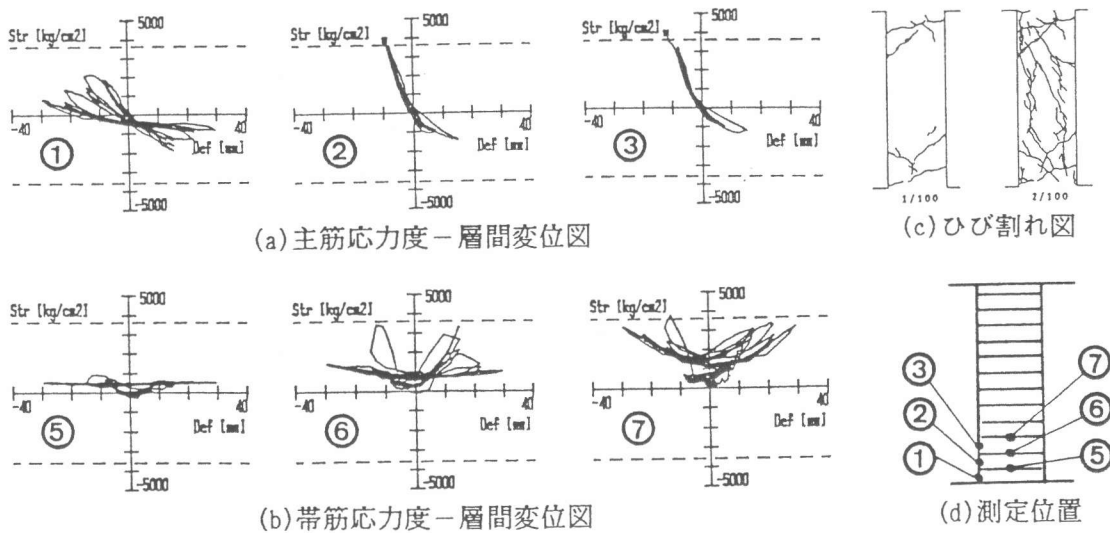


図-3 実験結果(15-0.85@60-6B)

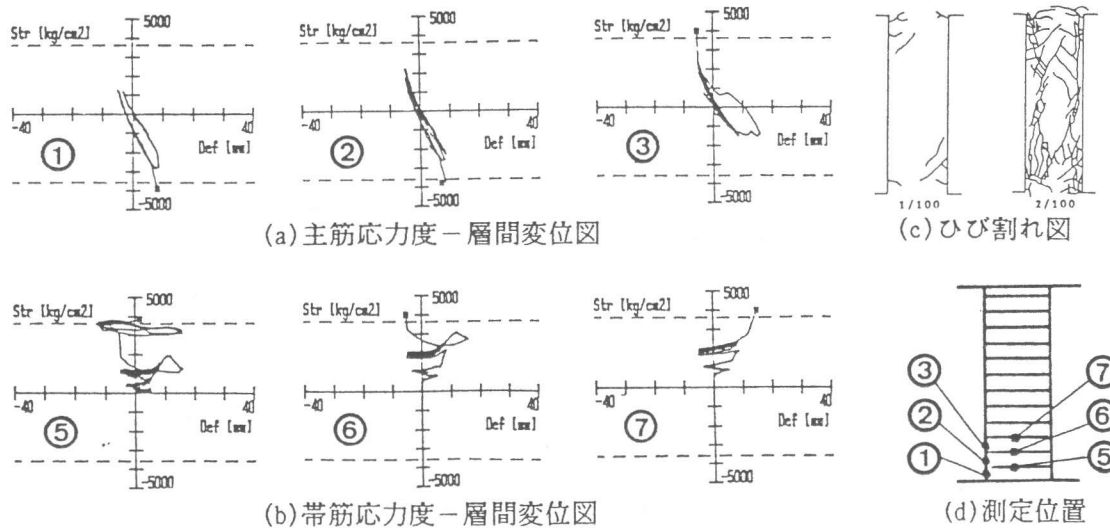


図-4 実験結果(45-0.85@60-6B)

#### 4. 解析結果及び考察

##### 4. 1 軸力による影響

図-5に荷重-変位関係を、図-6にひび割れ図を、図-7に帯筋のひずみ分布を示す。初期部材剛性は軸力に関係なく一定で、軸力が低いほど曲げひび割れの発生が早く、部材剛性も小さくなった。全供試体ともせん断系のひび割れの発生により部材剛性が著しく低下し、特に45-0.85@40-6Bは急激な剛性低下を示した。

ひび割れの形成は、15-0.85@40-6Bでは、端部に曲げせん断ひび割れが完全に形成された後、中央部に向かってせん断ひび割れが伸展した。30-0.85@40-6Bでは、端部に曲げせん断ひび割れが完全に形成される前に中央部にせん断ひび割れが発生し、端部曲げせん断ひび割れも端部せん断ひび割れに移行した。45-0.85@40-6Bでは、端部曲げせん断ひび割れが形成される前に端部せん断ひび割れの形成が著しく、せん断系のひび割れが部材全体にわたって発生した。

帯筋のひずみは、15-0.85@40-6Bは、曲げせん断ひび割れの発生と伸展により端部で増加をはじめ、端部より中央部に達するせん断ひび割れの発生により中央部で大きく増加した。30-0.85@40-6Bは、15-0.85@40-6Bと同様に、はじめ曲げせん断ひび割れの発生により増加するが、せん断系のひび割れの発生と伸展により増加した。特に曲げせん断ひび割れが端部せん断ひび割れにかわることで端部でのひずみ増加が急激になった。

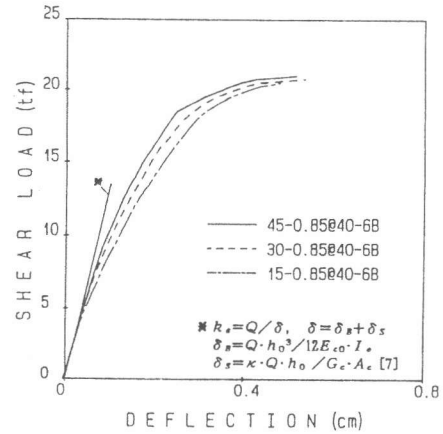
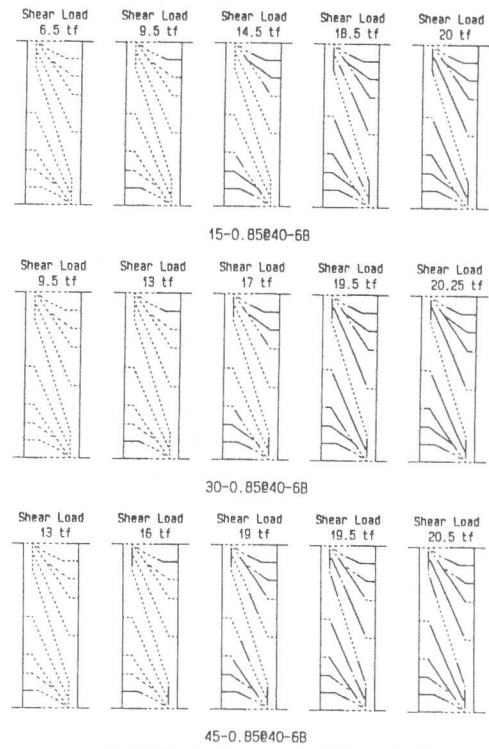


図-5 荷重-変位図(軸力パラメータ)



( — ひび割れている、... ひび割れてない )

図-6 ひび割れ図

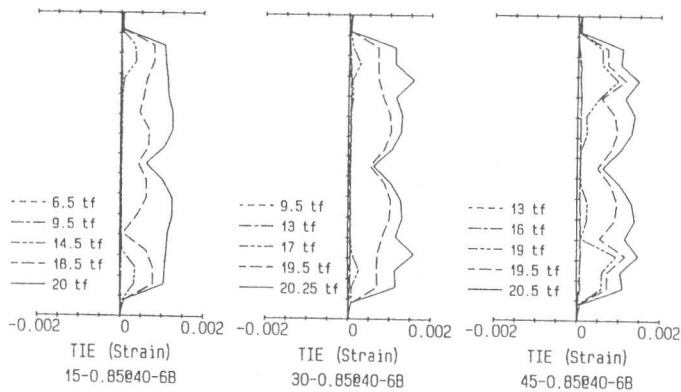


図-7 帯筋ひずみ分布図

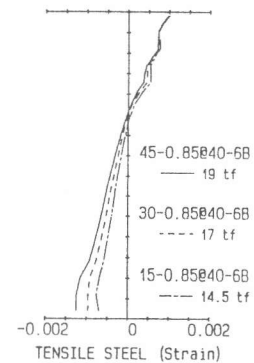


図-8 曲げせん断ひび割れまたは端部せん断ひび割れ発生時の主筋のひずみ分布図

45-0.85@40-6Bは、端部せん断ひび割れの発生と伸展により急激に増加し、部材全体にせん断系のひび割れの発生と伸展により増加した。

図-8に曲げせん断ひび割れまたは端部せん断ひび割れ発生時の各供試体の主筋のひずみを示す。主筋の引張力分担は軸力が低いほど広い範囲に及んである。

これより、軸力の増加とともに端部の曲げせん断ひび割れから端部せん断ひび割れに移行傾向が見られ、鉄筋のひずみ分布は3項の実験結果と同様の傾向を示した。

#### 4. 2 付着による影響

図-9と10に荷重-変位関係を、図-11にひび割れ図を示す。主筋本数の多いほど曲げ系のひび割れが早く発生したが、曲げ系のひび割れの発生による部材剛性の差はなかった。せん断系のひび割れの発生以後、部材剛性に差が見られ、軸力との比較を行った荷重-変位関係より、30-0.85@40-4Bは45-0.85@40-6Bと、30-0.85@40-10Bは15-0.85@40-6Bと同様の部材剛性低下を示した。ひび割れ分布も同様の傾向が見られた。

部材剛性の低下が著しい最大耐力近傍での主筋と帯筋のひずみ分布を図-12に示す。主筋のひずみ分布より、30-0.85@40-4Bの方が曲げひび割れ幅が広く（ひび割れ間のひずみの差で推測できる）、主筋の圧縮ひずみも大きいことから、30-0.85@40-4Bにより高い圧縮力が作用したと考えられる。

30-0.85@40-6UEは、柱付け根の曲げひび割れ発生以後部材の剛性低下が著しく、端部での曲げおよび曲げせん断ひび割れの形成はなく、柱付け根の曲げひび割れ幅が非常に大きく、コンクリートの圧壊が早かった(図-13)。主筋の応力負担は付着のない領域で一定であった。

これより、同一引張主筋比においては、周長の長い方が曲げせん断ひび割れが形成しやすく、耐力も上昇する傾向があった。一方、周長の短い方は、曲げ系のひび割れの形成時、ひび割れの幅が大きくなりやすく、そのためコンクリート圧縮域の応力負担が大きくなり、コンクリートの圧縮降伏またはせん断ひび割れが生じやすい。特に端部での主筋の付着除去は、端部の曲げ及びせん断ひび割れの形成をなくし、柱付け根の曲げひび割れ幅が大きくなり、コンクリートの圧壊が生じやすい。

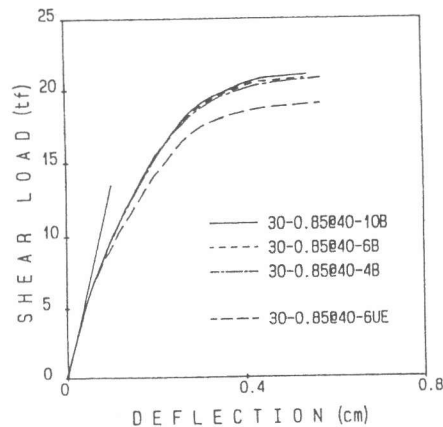


図-9 荷重-変位図(付着パラメータ)

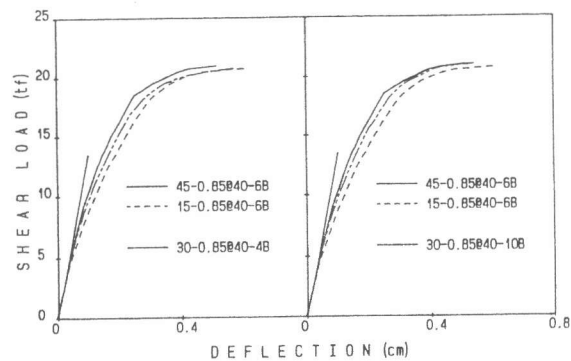
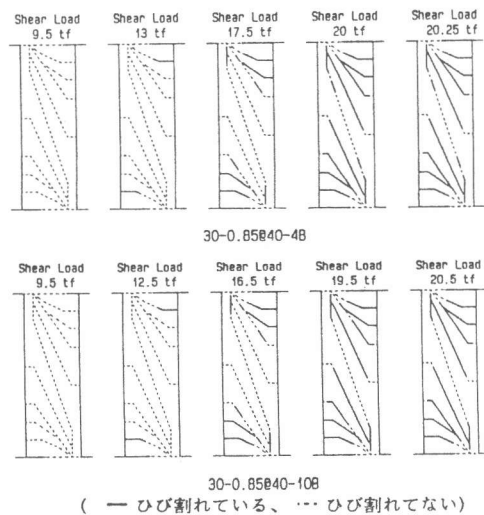


図-10 荷重-変位図(軸力との比較)



( — ひび割れている、--- ひび割れてない)

図-11 ひび割れ図

## 5. まとめ

シアスパン比1.5の鉄筋コンクリート短柱に対して、有限要素法による数値解析を行い、端部での曲げとせん断ひび割れの形成と、それ以降の最大耐力近傍までの破壊特性の把握を試みた。これより、適切なひび割れモデルを用いることにより、解析による部材の破壊性状をより明確に把握できることが示された。付着に関わる要素（引張鉄筋の形状と周長など）によるせん断破壊性状の検討が行われ、主筋の付着力が少ないと、曲げひび割れ幅の増加・コンクリート圧縮域への応力負担の増加・せん断ひび割れ発生・耐力低下の傾向があり、一方、主筋の付着力を増加させることにより、曲げ系のひび割れを形成の容易によるせん断破壊性状の制御が可能となる為、耐力の上昇が期待できる。しかし、主筋の付着力の増加は付着割裂ひび割れ発生を容易にさせるため、その検討が必要である。

## 参考文献

- 1) 田中彌壽雄他：繰り返し加力を受ける鉄筋コンクリート短柱の破壊性状に関する研究（その 1-14）、日本建築学会大会学術講演梗概集、1984年10月～1991年9月
- 2) Darwin, D. and Pecknold, D.A.W.: Inelastic Model for Cyclic Biaxial Loading of Reinforced Concrete, University of Illinois, UILU-ENG-74-2018, pps.169, 1974
- 3) Kupfer, H.B. and Gerstle, K.h.: Behavior of Concrete under Biaxial Stresses, Journal of the Engineering and Mechanical Division, ASCE, Vol. 99, No. EM4, pp. 852-862, 1973
- 4) 森田司郎、角徹三：繰り返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究、日本建築学会論文報告集、第229号、PP. 15-24、1976年3月
- 5) Gerstle, W., Ingraffea, A.R. and Gergely, P.: The Fracture Mechanics of Bond in Reinforced Concrete, Department of Structural Engineering Report 82-7, Cornell University, Ithaca, NY, pps.144, 1982
- 6) Walraven, J.C. and Reinhardt, H.W.: Cracks in Concrete Subject to Shear, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 108, No. ST1, pp.207-224, 1982
- 7) 菅野俊介他：鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する総合的研究(その18)、日本建築学会大会学術講演梗概集、PP. 1323-1324、1975年10月

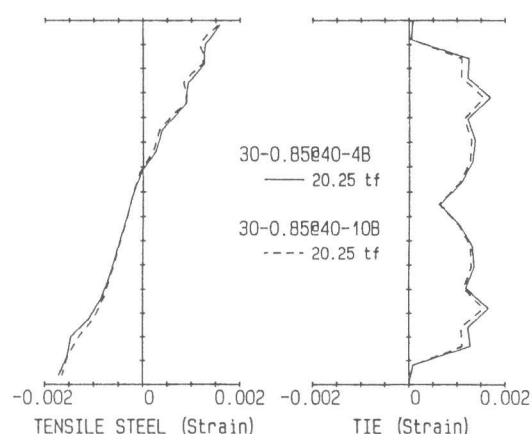


図-12 最大耐力近傍での鉄筋ひずみ分布図

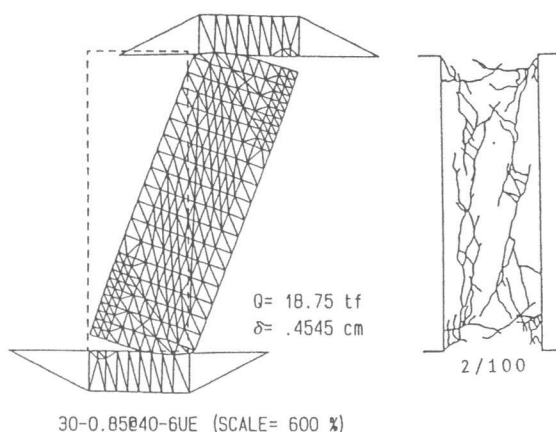


図-13 解析での変形図及び実験でのひび割れ図