

[122] コンファインドコンクリート(横拘束コンクリート)を
曲げ圧縮部に適用した PRC 梁の高靱性挙動

正会員 鈴木 計夫 (大阪大学工学部)
正会員 ○中塚 信 (大阪大学工学部)
平松 一夫 (奥村組)
長田 省作 (大阪大学工学部)

1. まえがき

プレストレスト(鉄筋)コンクリートや鉄筋コンクリート構造では、従来、比較的にもろい破壊を起すブレンコンクリートを主構成材料としてきたため、それら構造物の耐震化に必要な十分な靱性を確保する構造技術とその設計法の確立は重要な研究課題となっている。一方、近年コンクリートをスパイラル筋等で横拘束した、いわゆるコンファインドコンクリートに関する研究が進められ、そのすぐれた靱性性質が明らかにされると同時に、コンファインドコンクリートの曲げ圧縮部への適用がコンクリート部材の靱性改善方法として、設計面・施工面からも極めて有効な方法であることが示されてきた。

本研究は、各種横拘束筋を用いたコンファインドコンクリートを曲げ圧縮部に適用した、実大により近いプレストレスト鉄筋コンクリート(以下PRCと略記)梁部材の、大変形塑性域における多数回正負交番繰り返し荷重下での靱性に関する基礎性状、ならびに靱性の評価に不可欠な限界変形などについて考察したものである。

2. 実験概要

試験体は、試験梁部に柱部を付加した、図1に示すような横T型試験体である。梁部の断面は 24 x 40 cm で普通鉄筋とPC鋼棒が上下対称に配置され、またヒンジ部にはコンファインドコンクリートのための各種横拘束筋が配置されている。本実験で取りあげた実験要因は、表1に示すように鉄筋・鋼材係数 (ρ_{sp})、横拘束筋種類およびその補強程度である。すなわち、 ρ_{sp} の値としては、日本建築学会PRC指針(案)での制限値 0.25 およびそれを上まわる 0.35 もしくは 0.40 程度を計画した。曲げ圧縮部に対する横拘束筋としては $\phi 6$ 、 $\phi 9$ 、 $\phi 13$ の普通鉄筋や D9 の異形高張力鋼で製作された、巻径が 12 cm の円形スパイラル筋、ならびに D10 および D13 の普通鉄筋を用い、末端部を相互に溶接した閉鎖型の角型フープなどを使用した。横拘束筋の配置は、円形筋の場合には柱内 10 cm の位置から、角型

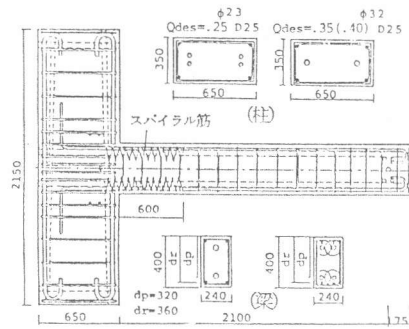


図1. 試験体配筋図

表1. 試験梁断面の概要

試験体	NO.1	NO.2	NO.3	NO.4	NO.5	NO.6	NO.7	NO.8	NO.9	NO.10	NO.11	NO.12	NO.13	NO.14	NO.15
梁断面 240 400 b x D = 24cm x 40cm															
P C 鋼棒	spiral [Mild] φ9E50	spiral [Mild] φ9E50	spiral [H.T.] φ9E45	spiral [H.T.] φ9E45	spiral [Mild] φ13E45	spiral [Mild] φ13E45	stirrup D10E150	stirrup D10E100	stirrup D10E50	stirrup D10E50	stirrup D13E50	stirrup D13E50	spiral [Mild] φ6E50	spiral [Mild] φ9E50	spiral [Mild] φ13E50
普通鉄筋	φ26x2 C-1 (5.309)	φ23x4 C-1 (4.155)	φ26x2 C-1 (5.309)	φ23x4 B-1 (4.155)	φ26x2 C-1 (5.309)	φ23x4 B-1 (4.155)	φ26x2 C-1 (5.309)	φ23x4 B-1 (4.155)	φ26x2 C-1 (5.309)	φ23x4 B-1 (4.155)	φ26x2 C-1 (5.309)	φ23x4 B-1 (4.155)	φ26x2 C-1 (5.309)	φ26x2 C-1 (5.309)	φ26x2 C-1 (5.309)
鋼材係数	ρ_{sp} 0.250 0.304 0.261 0.072	ρ_{sp} 0.400 0.351 0.455 0.104	ρ_{sp} 0.250 0.207 0.233 0.065	ρ_{sp} 0.350 0.286 0.322 0.094	ρ_{sp} 0.250 0.214 0.281 0.067	ρ_{sp} 0.350 0.296 0.353 0.097	ρ_{sp} 0.250 0.227 0.299 0.072	ρ_{sp} 0.350 0.305 0.409 0.104	ρ_{sp} 0.250 0.225 0.297 0.073	ρ_{sp} 0.350 0.313 0.411 0.073	ρ_{sp} 0.250 0.258 0.341 0.083	ρ_{sp} 0.350 0.359 0.471 0.112	ρ_{sp} 0.250 0.249 0.330 0.081	ρ_{sp} 0.250 0.249 0.330 0.081	ρ_{sp} 0.250 0.249 0.330 0.081
λ	0.762	0.771	0.760	0.753	0.760	0.753	0.745	0.794	0.756	0.761	0.756	0.761	0.754	0.754	0.754
拘束筋	spiral M9φ 50 120	spiral M9φ 50 120	spiral H9φ 45 120	spiral H9φ 45 120	spiral M13φ 45 120	spiral M13φ 45 120	stirrup D10 150	stirrup D10 100	stirrup D10 50	stirrup D10 50	stirrup D13 50	stirrup D13 50	spiral M6φ 50 120	spiral H9φ 50 120	spiral M13φ 50 120
スターラップ	□-D10 150	□-D10 100	□-D10 150	□-D10 100	□-D10 150	□-D10 100	□-D10 150	□-D10 100	□-D10 50	□-D10 50	□-D13 50	□-D13 50	□-D10 150	□-D10 150	□-D10 150
FC(kg/cm ²)	329	329	364	364	352	352	328	328	320	320	279	279	289	289	289

FC 鋼棒種別: 0-1 は C 種 1 号、B-1 は B 種 1 号、A-1 は A 種 1 号
鋼材係数: $\rho_{sp} = \frac{A_p \cdot \rho_{sp} + A_t \cdot \rho_t + A_c \cdot \rho_c}{b \cdot d_r \cdot F_c}$ $\lambda = \frac{T_{py} + T_{ry}}{T_{py} + T_{ry}}$
拘束筋種別: M は普通鋼、H は高張力鋼 FC: コンクリートシリンダー強度
 $\rho_{des} = \frac{T_{py} + T_{ry} - C_{ry}}{b \cdot d_r \cdot F_c}$ $\rho_r = \frac{T_{ry}}{b \cdot d_r \cdot F_c}$

筋の場合には柱面から 3 cm の位置より、梁のヒンジ領域になると考えられる範囲に余長を考慮した、梁せいの 1.5 倍の区間について行った。試験体の製作には、試験時でのコンクリート強度が約 300 kg/cm^2 となるような、早強セメントを用いたレディミクストコンクリートを使用した。試験梁部へのプレストレスの導入は原則としてコンクリート打設後約 1 週間で行い、導入後 PC 鋼棒には早強セメントペーストによるグラウトを施した。正負交番繰り返し荷重は、図 2 に示すように、反力壁に対し横 T 形の状態でセットした試験体の梁部の先端部に取りつけた荷重用治具を、ロードセルを兼ねた PC ロッドで上下に交互に引張ることによって行った。また、柱部には付着のない PC 鋼棒を用いて、平均応力が 50 kg/cm^2 となる圧縮軸力を加えた。荷重プログラムは原則として、梁の変位角が $1/70, 1/30, 1/20, 1/15$ および $1/10$ の各荷重階でそれぞれ 10 回ずつ、総計 50 回の塑性域における正負交番繰り返し荷重である。梁部分の変位の測定は、図 2 に示すように、柱面から $0.75 \cdot D$ (D : 梁せい) , $1.5 \cdot D$, $3 \cdot D$ および荷重点位置で、電気式のしゅう動形および巻込形変位計を用いて行った。また梁のヒンジ領域内付近における曲率分布は、柱面から測定検長をそれぞれ 15 cm とした 4 測定区間で、梁に固定した測定治具に取りつけたダイヤルゲージ式変位変換器を用いて測定した。

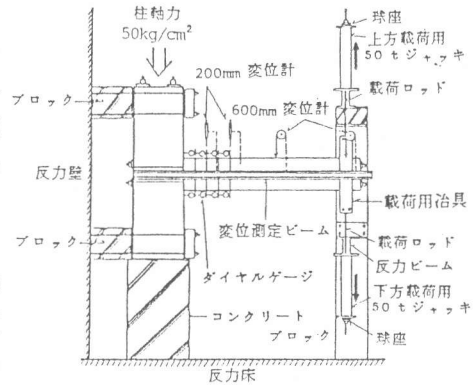


図 2. 荷重および測定方法

図 2 に示すように、柱面から $0.75 \cdot D$ (D : 梁せい) , $1.5 \cdot D$, $3 \cdot D$ および荷重点位置で、電気式のしゅう動形および巻込形変位計を用いて行った。また梁のヒンジ領域内付近における曲率分布は、柱面から測定検長をそれぞれ 15 cm とした 4 測定区間で、梁に固定した測定治具に取りつけたダイヤルゲージ式変位変換器を用いて測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 荷重-変形関係の概要

図 3 は試験体の荷重点位置における変位と荷重との関係 ($P-\delta$ 関係) を示した例である。同図に示されるように、各繰り返し階の第 1 サイクルに対する包絡線は、いずれの試験体でも靱性的な性状を示したが、第 10 サイクルに対する包絡線は試験体によって極めてぜい性的な性状となる場合もみられた。このことは耐震性を目的としてコンクリート部材のじん性を考える場合、塑性域での繰り返し回数は従来のような 1 回程度ずつでは不十分であり、繰り返し荷重によるじん性の劣化を考慮しなければならないことを示している。次に、図 3 (b) の No. 2 試験体は同図 (a) の No. 8 試験体に $\phi 9$ の普通鉄筋による円形スパイラル筋を付加配筋したものである。また図 3 (c) の No. 12 試験体は D13 の普通鉄筋による閉鎖形溶接スターラップを用いて、No. 8 試験体の角形の横補強筋量を増加させたものである。これら試験体の $P-\delta$ 関係を比較すると、梁の曲げひびわれ発生点、引張主筋降伏点および最外縁コンクリートの圧壊開始点などで代表される小変形領域の $P-\delta$ 関係は、横拘束筋の種類およびその量にかかわらずほぼ同じである。これは、曲げ圧縮部のひずみがこの変形領域では差程大きくなく、従って横拘束筋が有効に作用する程の横膨張変形がコンクリートに十分生じていないためと考えられる。これに対して、

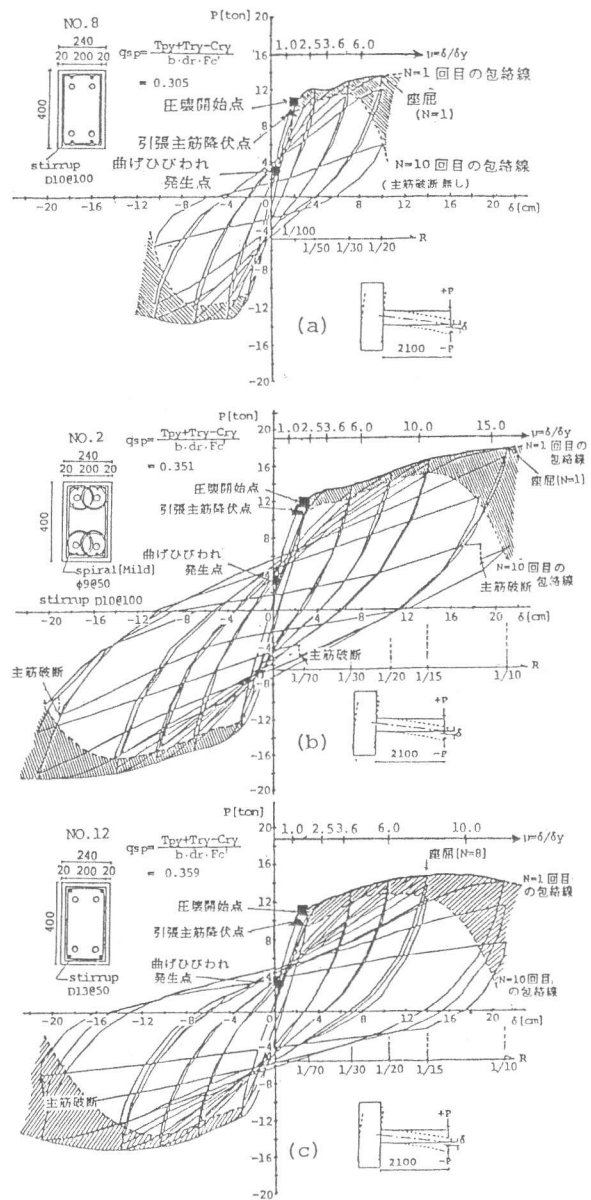


図 3. 荷重-変形関係

変位角Rが1/20以上の大変形領域におけるP-δ関係には明確な差がみられ、円形スパイラル筋および密な閉鎖形溶接スターアップの使用によって、梁のじん性ならびに繰り返し荷重に対する安定性が画的に改善されることが示されている。

3.2 繰り返し荷重に対する安定限界変形とじん性

繰り返し荷重に対して安定した挙動を示す変形の限界は、コンクリート構造物の耐震設計における重要な指標である。本報告では、耐力低下性状に基づく既往の評価方法を参考にして、繰り返し荷重下での変形限界を次のように定義した。図4は各定変位載荷階での繰り返し回数(N)を横軸にとり、縦軸に各載荷階での第1回目ループ時の最大荷重(P1)に対するN回目ループ時の最大荷重(PN)との比(PN/P1)をとって、耐力低下性状を示した例である。他の試験体の場合も同様であったが、(PN/P1)の値に収束傾向がみられ、かつ第10サイクル時での(P10/P1)が0.85以上となる載荷階では試験体の破壊は生じなかった。したがって、この両条件を満足する最大の変位階の変形を本報告では便宜的に安定限界変形とした。なお、安定変形階に続く載荷階を破壊階と呼ぶ。次に図5は、梁のヒンジゾーンに適用したコンファインドコンクリートの横拘束筋体積比($P_v = 4\alpha_0 / SD, 4\alpha_0 / S1$; α_0 :拘束筋の断面積, D:円形筋の巻径, l:角形筋の一辺長さ)を横軸にとり、縦軸には柱面に隣接する曲率測定区間(ϕ_1 区間)で測定した限界変形時曲率(ϕ_{st})を、弾性曲げ剛性(EI)とPC鋼材降伏時モーメントの計算値とから決まる降伏時曲率(ϕ_y)で除した曲率じん性率($\mu_\phi = \phi_{st} / \phi_y$)を示したものである。同図によれば、円形スパイラル筋補強がじん性率におよぼす効果は角形筋補強よりも大きい。また、横補強筋量の増加によってじん性率は増加するが、その増大率は P_v の増加に伴って減少する傾向がみられる。なお、補強筋量の測定として降伏強度(σ_{sy})を考慮した $P_v \cdot \sigma_{sy}$ を用いる方法もあるが、本実験では高強度補強筋の効果がとくに明確ではなくまた資料数も少ないため、 P_v で補強筋量を表現した。

3.3 安定限界変形点と終局域指標点との関連

繰り返し荷重下における安定限界変形点を容易に推定できることは、部材の耐震性を評価する上で極めて有用である。安定限界変形点の厳密な解析による推定は可能であると思われるが、推定手法としては繁雑で実用的ではない。それ故本研究では、梁断面の単調解析から容易に求まる曲げモーメント-曲率関係(M-φ関係)での終局域指標点と、実験より得られた安定限界変形点との対応について検討した。なお、単調解析にあたっては、コンクリートおよび鋼材

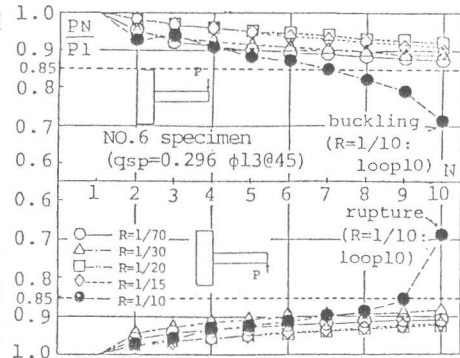


図4. 定変位繰り返し荷重による耐力低下性状

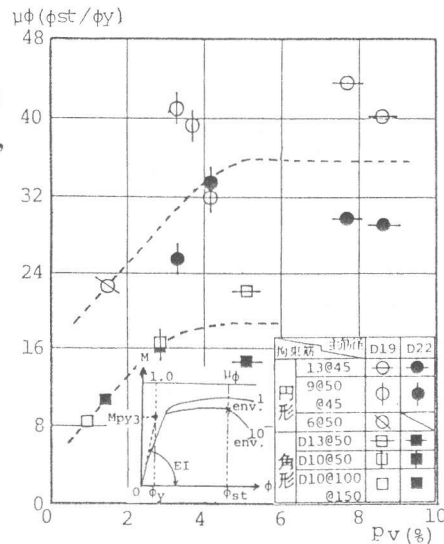


図5. 断面じん性率と横拘束筋体積比との関係

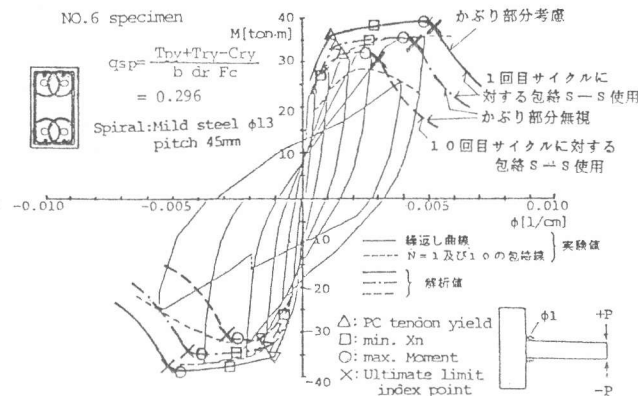


図6. 繰り返しM-φ関係の包絡線に対する解析的検討

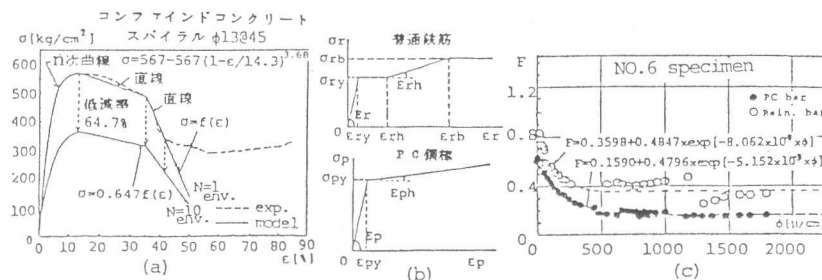


図7. コンクリートと鋼材のモデル応力度-ひずみ度関係およびひずみ適合係数(F値)-曲率関係

の図7に示すような応力度-ひずみ度関係，ならびにコンクリートと引張鋼材の付着劣化性質（ひずみ適合係数Fによる評価）を仮定し，さらに圧縮側となるPC鋼材は無視し，圧縮鉄筋の付着は完全であるとした。

まず，図6は柱面に隣接するφ1区間で測定した，繰り返しM-φ関係における第1および第10ループのそれぞれに対する包絡線と，梁断面の各種の単調M-φ関係の解析結果とを比較したものである。同図によれば，安定限界変形に関する第10ループ包絡線は，コンファインドコンクリートの繰り返し載荷による耐力低下を考慮した単軸応力度-ひずみ度関係を用いる，かぶり部分のない梁断面についてのM-φ関係とほぼ対応すると考えられる。次に図8は，繰り返し荷重下での真の安定限界曲率が存在すると考えられる，安定限界時曲率(φ_{st})から破壊時曲率(φ_F)までの区間と，第10ループの包絡線に対する上記の解析M-φ関係における終局限界点時曲率(φ_L⁴)との関連を調べたものである。同図よりφ_Lはφ_{st}~φ_F区間と，他のどの終局域指標点よりも，良好な相関関係を示し，φ_Lが繰り返し加力を受ける部材の安定限界変形時に対する指標として扱える可能性を示している。一方，殆どの試験体では破壊階において主筋の座屈が生じており，繰り返し載荷におけるφ_{st}~φ_F区間と座屈発見時曲率(φ_{BU})との間には図9に示すような良好な相関関係がみられた。このことはφ_{BU}が上述のφ_Lと同様，繰り返し加力を受ける部材の安定限界変形時に対する指標として取り扱える可能性を示している。しかし，φ_Lとφ_{BU}との関係，言い換えれば圧縮部コンクリートの著しいひずみ軟化時点と座屈発見時点との相互関係などについてはより詳細な検討が必要であろう。なお，図10に本実験で得られた座屈時圧縮鉄筋位置ひずみ(ε_{BU})と横拘束筋体積比(P_v)との関係を示しているが，P_vの増加は圧縮筋の座屈防止に非常に有効である。

4. まとめ

1) 耐震性を目的として，コンクリート部材のじん性を論ずる場合，繰り返し載荷によるじん性の劣化を考慮しなければならない(図3参照)。

2) 極めて大きな鉄筋・鋼材係数(α_{SP}=0.35程度)を有する場合でも，円形スパイラル筋あるいは密に配筋された閉鎖形溶接スターラップの使用によって，梁のじん性ならびに繰り返し荷重に対する安定性は画期的に改善される(図3参照)。

3) 横補強筋量の増大によってPRC梁部材のじん性は増大するが，その増加率は補強筋量の増加とともに減少する傾向がある(図5参照)。

4) 繰り返し荷重をうける梁部材のモーメント-曲率関係の包絡線は，コンファインドコンクリートの繰り返し載荷による応力低下および引張鋼材の付着劣化などを考慮した梁断面についての単調解析によってほぼ推定できる。さらに，繰り返し荷重下で破壊しない限界変形点に対する指標としては，繰り返し載荷の影響を取り入れた単調解析から求まる終局限界点，ならびに圧縮筋の座屈発見時点などが有用である(図8，9参照)。

参考文献 1. 日本建築学会；地震荷重と建築構造の耐震性，1976，PP.272~305（鈴木計夫担当）
 2. 鈴木，中塚，吉田；円形補強筋を用いたコンファインドコンクリートの強度および変形特性，材料 昭和60年1月
 3. 山本；鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する総合研究（その4；各実験シリーズの共通次項）日本建築学会大会梗概集，昭和48年 PP.1419
 4. 鈴木，中塚，阿波野；PRC梁断面の終局限界点とその特性，セメント技術年報，昭和57年

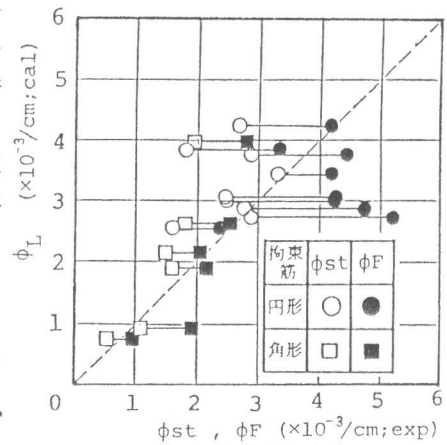


図8. 終局限界点時曲率φ_Lと(φ_{st}~φ_F)区間の関係

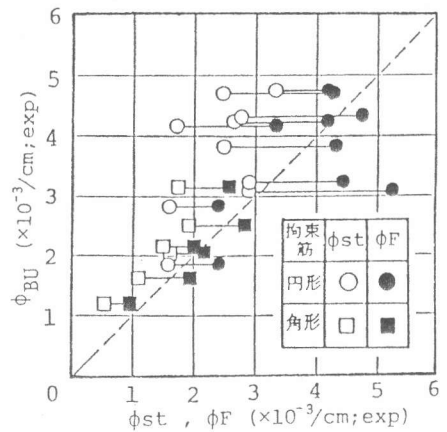


図9. 座屈発見時曲率φ_{BU}と(φ_{st}~φ_F)区間の関係

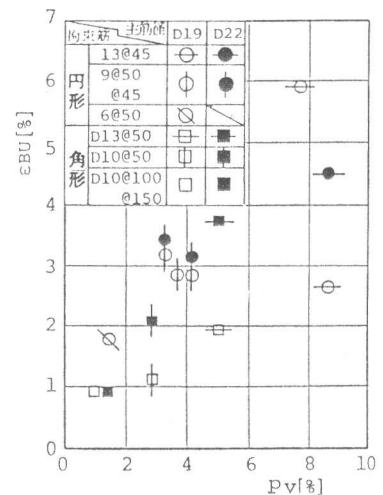


図10. 座屈時圧縮鉄筋位置ひずみと横補強筋比との関係