

[158] RC 部材の終局変位定量化に関する実験的研究

正会員 ○豊田 和彦 (埼玉大学大学院)
 正会員 陸好 宏史 (埼玉大学工学部)
 正会員 町田 篤彦 (埼玉大学工学部)

1. はじめに

RC 部材の耐震性能を評価する上で、耐力や復元力特性についての検討の他に変形性能についての検討が重要視され始めている。主鉄筋が降伏する以前には、せん断耐力が十分に大きな部材であっても、主鉄筋の降伏後に大きな変形を生じた時に斜めひびわれが発生し、最終的にせん断破壊の特徴を示して耐力を失うことがある。これは、変形の増大に伴って曲げひびわれの長さ、幅双方が増大し、それによってせん断耐力が低下するためであると考えられる。部材の変形性能は、このような場合にもせん断耐力によって定まるから、変形性能を定量化するには主鉄筋降伏後のせん断耐力を求めることが必要となる。しかし、せん断破壊そのものが完全に把握されていると言いがたい現状では、主鉄筋が降伏した後のせん断耐力の低下を解析的に求め、変形性能を定量化することは極めて困難である。本報は、RC 橋脚を想定した供試体を用いて実験を行い、せん断耐力に影響を与えるとされているいくつかの要因について各要因が変形性能に及ぼす影響を検討した結果を述べるものである。

表-1 実験要因

供試体 No.	主鉄筋比 P t (%)	帯鉄筋比 P w (%)	せん断支間比 a/d	軸応力 σ_o (kg/cm ²)	コンクリート強度 f_c (kg/cm ²)	耐力比 V a/M	じん性率 μ_{ut}
1	3010 0.89	0.12	3.0	0	330	1.38	3.74
2	2D13 1.06	0.12	3.0	0	309	1.18	3.02
3	3D10 0.89	0.12	4.0	0	357	1.73	5.83
4	2D10 0.59	0.12	4.0	0	406	2.19	≥6.96
5	2D13 1.06	0.12	4.0	0	203	1.38	≥5.07
6	2D13 1.06	0.23	4.0	0	318	1.77	6.11
7	2D13 1.06	0.077	4.0	0	400	1.38	4.03
8	2D13 1.06	0	4.0	0	413	1.18	3.00
9	2D16 1.66	0.12	4.0	0	338	1.23	2.97
10	2D16 1.66	0.12	5.0	0	379	1.48	3.01
11	2D13 1.06	0.12	5.0	0	404	1.76	4.60
12	2D13 1.06	0.12	6.0	0	395	2.01	≥3.99
13	2D13 1.06	0.12	4.0	0	279	1.44	4.00
14	2D13 1.06	0.12	4.0	10	294	1.31	4.99
15	2D13 1.06	0.12	4.0	20	301	1.21	2.99
16	2D13 1.06	0.12	3.0	10	307	1.08	3.04

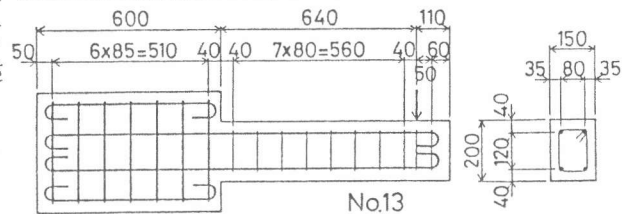


図-1 供試体の例

2. 実験概要

(1) 供試体

図-1に示すような片持ち梁型の供試体を表-1に示すように主鉄筋比Pt4種、帯鉄筋比Pw4種、せん断支間比 a/d 4種、軸圧縮応力 σ_o 3種に変化させ計16体作製した。供試体は全て曲げ降伏がせん断破壊に先行するように設計した。また、帯鉄筋を配する場合には、斜めひびわれが主鉄筋と45°をなして発生すると仮定し、固定端から断面の有効高さ d に相当する位置までの範囲に少なくとも1本の帯鉄筋が入るようにした。

(2) 載荷方法

載荷は一方方向に荷重制御で降伏荷重に達するまで載荷し、その時の変位を + δy として、以後は変位制御で $\pm \delta y$, $\pm 2\delta y$, ……を各々10回繰り返した。なお、降伏荷重は、n=15とした弾性計算により主鉄筋が実降伏点に達する荷重として定めた。載荷状況を図-2に示す。

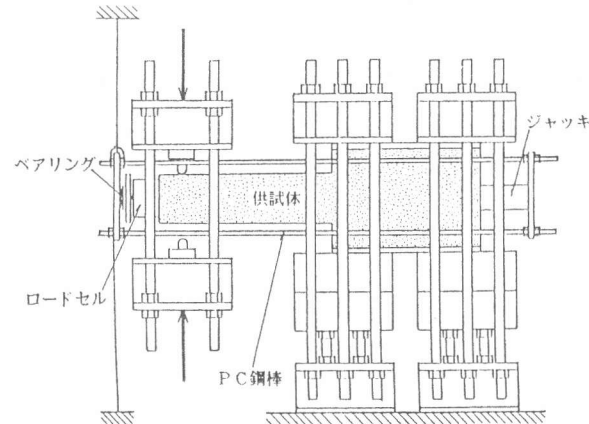


図-2 載荷装置

表-2 材料特性

鋼種	断面積 (cm ²)	降伏点 (kg/cm ²)	降伏ひずみ (μ)	
主鉄筋	D10	0.7133	3650	2440
	D13	1.267	3960	2480
	D16	1.986	3580	2090
帯鉄筋	D3	0.06905	2740	2030

3. 変形性能に及ぼす諸要因の影響

個々の供試体の試験より得られた荷重-変位 (P - δ) 曲線から正負の値を平均した包絡線を描き、荷重が最大荷重の80%以下に低下する直前の変位段階における変位を終局変位 δu として、これを変形性能の目安とし

た。既往の研究によってRC部材のせん断耐力 V と曲げ耐力(=作用せん断力=終局曲げモーメント/せん断支間) M/a との耐力比 $V \cdot a/M$ と変形性能との間には強い相関があることが認められている。²⁾このことから、せん断耐力に影響を与える要因別に各供試体の応答を検討した。

(1) 軸力の影響

図-3に $\sigma_0 = 0, 10, 20 \text{ kg/cm}^2$ に変えた場合の $P-\delta$ 包絡線を示す。図より $\sigma_0 = 20$ のNo.15は、他の2体に比べ荷重は上昇しているが、変形性能は劣っていることがわかる。また、軸力を作用させた供試体では終局変位以後の荷重の低下傾向が著しいこともわかる。このことをもとに σ_0 の影響によるじん性率 μ_{ut} ($=\delta u/\delta y$)の変化と $V \cdot a/M$ との間に何らかの関係があると考えて、これを求めた結果が図-4である。ここで V は、岡村・楢貝の式に古典的トラス理論による帯鉄筋の効果を加えたもので、軸力の影響は β_n (=断面に引張り応力を生ずるモーメント/作用曲げモーメント)なる係数によって考慮した。 M は圧縮縁のコンクリートの歪が 3500μ に達した時の曲げモーメントである。 σ_0 の影響に関するデータが少ないので断言することは出来ないが、部材の変形性能に及ぼす σ_0 の影響は $V \cdot a/M$ によって推定する可能性が示されたと考えられる。この点に関しては、今後さらに詳細かつ広範に検討する必要があると認められる。なお、No.14には計測を開始する前に誤って降伏荷重を越える荷重を作用させてしまったため、2~3 δy までの交番載荷において、ひびわれが十分に発達しなかった。従ってこの供試体の試験結果は信頼性に欠ける。

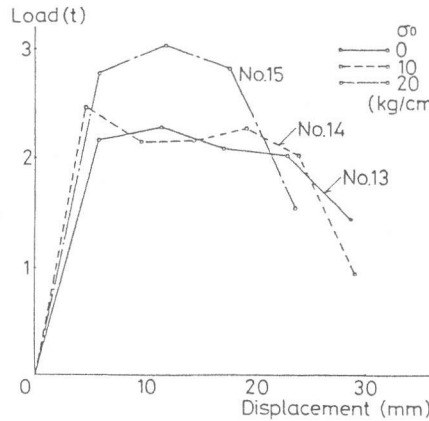


図-3 荷重-変位曲線(軸力の影響)

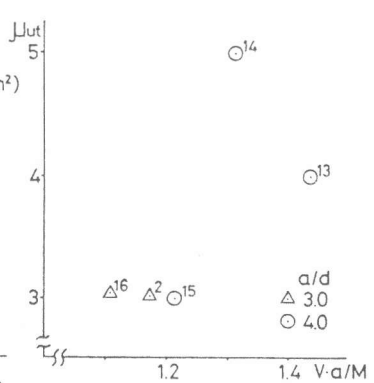


図-4 じん性率-耐力比関係(軸力の影響)

(2) 帯鉄筋比の影響

図-5は、 $P_t, a/d, \sigma_0$ を一定として P_w を $0, 0.077, 0.12, 0.23\%$ に変えた場合の $P-\delta$ 関係である。 P_w の大なる供試体ほど変形性能が優れていることが認められるので、(1)と同様に μ_{ut} と $V \cdot a/M$ との関係を求めた。その結果は、図-6のようになり、この場合も μ_{ut} と $V \cdot a/M$ は、ほぼ直線関係にあるとみなすことができる。

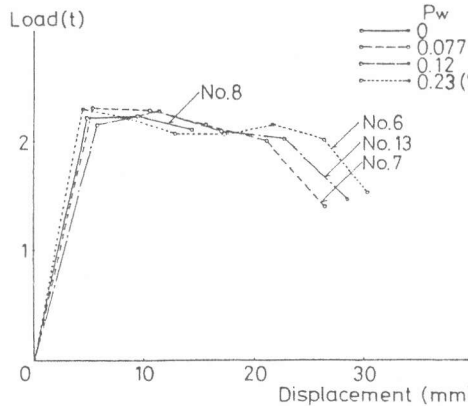


図-5 荷重-変位曲線(帯鉄筋比の影響)

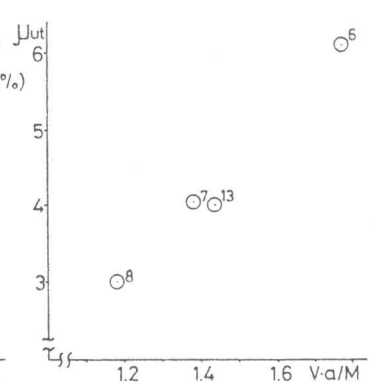


図-6 じん性率-耐力比関係(帯鉄筋比の影響)

(3) 主鉄筋比の影響

図-7は、 $P_t = 0.59, 0.89, 1.06, 1.66\%$ の各場合の $P-\delta$ 関係である。 P_t の大なる供試体ほど変形性能は劣っており、 a/d ごとに μ_{ut} と $V \cdot a/M$ との関係を図示すれば図-8のようになる。 a/d が等しい場合両者はほぼ直線関係にある。

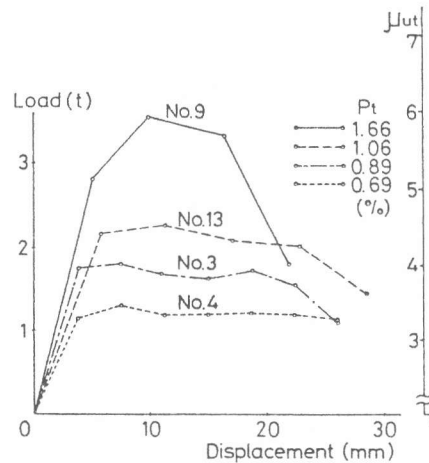


図-7 荷重-変位曲線(主鉄筋比の影響)

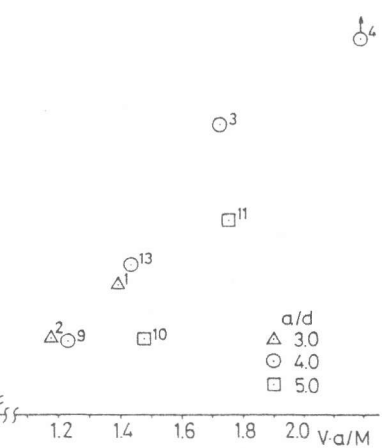


図-8 じん性率-耐力比関係(主鉄筋比の影響)

(4) せん断支間比の影響

図-9は、 P_w, P_t を一定として a/d を3.0, 4.0, 5.0, 6.0に変えた場合の $P-\delta$ 関係である。アクチュエータのストロークの都合により、荷重が低下するまで荷重できなかった $a/d=6.0$ のNo.12を除けば a/d の小なる供試体ほど変形性能が劣っている。図-10に $\mu_{ut}-V \cdot a/M$ 関係を示す。 P_t が等しい場合、両者はほぼ直線関係にある。

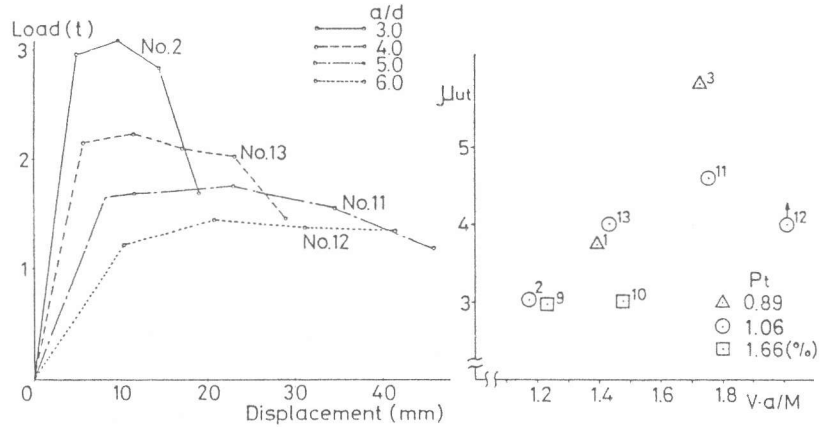


図-9 荷重-変位曲線(せん断支間比の影響) 図-10 じん性率-耐力比関係(せん断支間比の影響)

4. 変形性能の定量化

前節で述べたように、せん断耐力に影響を与える要因を変化させても各要因ごとに $\mu_{ut}-V \cdot a/M$ 関係は、ほぼ直線となることが確認された。従って、これらの要因が μ_{ut} に及ぼす影響の重みは同程度であって $V \cdot a/M$ という一つの指標によって表せると考えられる。またRC橋脚の全変位は、曲げひびわれ域(弾性域)による変位 δ_1 , せん断ひびわれ域(塑性域)による変位 δ_2 及びフーチング部からの主鉄筋の引き抜けによる変位 δ_3 の3つの成分に分けられ、このうち δ_2 が部材の変形性能に最も大きな影響を与えること、及び δ_2 と $V \cdot a/M$ とは、ほぼ直線関係にあることが既往の研究によって認められている^{1),3)}。そこで今回試験を行った全ての供試体について δ_2 と $V \cdot a/M$ との関係を求めた。そ

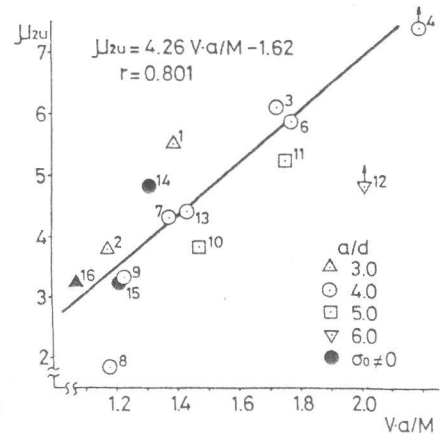


図-11 δ_2 のじん性率-耐力比関係

の結果が、図-11である。縦軸は、無次元化のため δ_2 に関するじん性率 μ_{2u} (=終局時の δ_2 / 降伏時の δ_2) を用いた。図より、 μ_{2u} と $V \cdot a/M$ は軸力の有無や P_t, P_w の相違にも関わらず、ほぼ直線関係になっていることがわかる。No. 4, 12を除いた $\mu_{ut}-V \cdot a/M$ 関係の相関係数は $r=0.775$ であったのに対して $\mu_{2u}-V \cdot a/M$ 関係では $r=0.801$ であった。従って μ_{2u} を用いれば、より精度の良いじん性率の推定が可能であると考えられる。しかし、図に見られるように斜め引張破壊を起こしたNo. 8は他の供試体に比べ特に μ_{2u} が小さく、また a/d の相違によって $\mu_{2u}-V \cdot a/M$ 関係の直線の傾きが異なっている。

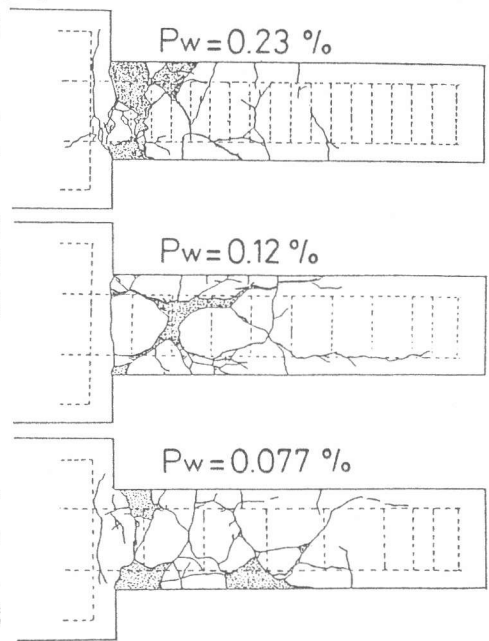


図-12 ひびわれ状況(帯鉄筋比の影響)

5. 供試体のひびわれ状況ならびに破壊状況

図-11では、 δ_2 を計算するにあたって暫定的にせん断ひびわれ域を固定端から d だけ離れた点までとしている。しかし、実際にはせん断ひびわれ域は、斜めひびわれの発生によって塑性ヒンジ的な挙動を示し、有限な回転能を有する領域であるから、種々の要因によって変化するものであると考えられる。そこで、各供試体のひびわれ状況と破壊状況について検討し、せん断ひびわれ域の大きさを解明しようとした。

(1) ひびわれのパターンおよび発生範囲

一般に交番荷重を受けるRC片持ち梁に斜めひびわれが発生する場合、固定端から d 程度離れた位置に発生した曲げひびわれが斜めひびわれに伸展し、上下縁から伸びた斜めひびわれがX字状をなして交差する。このような傾向は、本実験でも観察されたが、X字状のひびわれは1組とは限らず、また斜めひびわ

れの発生する範囲は、個々の供試体によって異なった。一例として、 P_w の相違によってひびわれ状況が変化の様子を図-12に示す。明らかに P_w が小なる供試体ほど、斜めひびわれの発生する領域が広がっている。部材の曲げひびわれは固定端に近いほど長さ、幅ともに大きいので骨材のかみあいが少なくなり、せん断耐力は低下して斜めひびわれが発生しやすくなる。従って、作用せん断力に比べせん断耐力が小であれば広範囲に斜めひびわれが発生し、逆に大であれば固定端近傍にのみ斜めひびわれが発生することになると考えられる。このような観点から $V \cdot a / M$ を再び採用し、これと斜めひびわれ発生範囲の長さ L_s との関係をまとめてみた(図-13)。

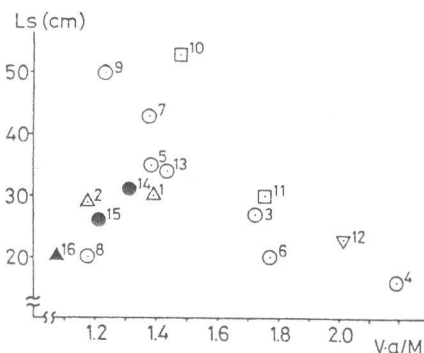


図-13 斜めひびわれ発生範囲長-耐力比関係

ここで L_s は固定端から最も離れた斜めひびわれが主鉄筋と交差する位置までの長さである。図より明らかに $a/d=4.0$ のグループでは、破壊形態(次項参照)の異なるNo. 8及びNo.14, 15を除き $V \cdot a / M$ と L_s とはほぼ直線の関係があることが認められる。それ以外の供試体については $a/d=4.0$ の場合の直線と離れており、上述のような関係が成立するかどうか定かでない。

(2) 破壊形態

軸力を作用させていない供試体は、帯鉄筋を配していないNo. 8を除いて斜めひびわれが発生しても耐力を失うことはなく、その後さらに大きな変位において圧縮部が圧壊し、主鉄筋の座屈を伴うかぶりコンクリートのはく落により耐力を失った。はく落する範囲は上記の L_s の影響を強く受け、固定端から最も離れた斜めひびわれまでのかぶりコンクリートのはく落した。No. 8は、付着ひびわれを伴う斜め引張破壊を起こして耐力を失った。軸力を作用させた供試体では、固定端に最も近い斜めひびわれが、かぶりコンクリートを斜めに貫通すると間もなく、そのひびわれより固定端よりのかぶりコンクリートのはく落して耐力を失った。

以上のように、斜めひびわれの発生範囲は供試体によって異なるので、せん断ひびわれ域の大きさも実験で採用した種々の要因や塑性率によって変化するものと考えられる。このことをとり入れて図-11を書き直せば、より良好な相関が示されると考えられるが、現在までの段階では、斜めひびわれが発生する範囲と塑性ヒンジとしてのせん断ひびわれ域の範囲との関係が明確になっていないので、これらの要因のある関数としてのせん断ひびわれ域の大きさを用いて δ_2 を算定するには至っていない。この点については、今後も検討を続ける必要が認められる。

6. 結論

本研究において次のようなことが明らかとなった。

- 1.) $\sigma_o, P_t, P_w, a/d$ などの要因が変形性能に及ぼす影響は、一括して $V \cdot a / M$ で推定できることが確認された。ただし、 a/d は他の要因と変形性能との関係についてのパラメータとしての影響もある。
- 2.) 斜めひびわれの発生範囲 L_s は、 $V \cdot a / M$ によって変化することが明かとなった。
- 3.) せん断ひびわれ域の範囲を固定端から d までと仮定しても、ある程度の精度でじん性率を推定できるが、2.及び種々の破壊形態を考慮したせん断ひびわれ域の範囲を定義できれば、さらに精度の良い推定ができると思われる。

本研究は、文部省科学研究費補助金試験研究(1)(課題番号58550320)によって行ったものである。ここに付記して謝意を表する。

<参考文献>

- 1.) 橋本他. 静的交番荷重を受けるRC橋脚の終局変位に関する研究 第38回土木学会大会 1983
- 2.) 檜貝他. 大変位繰返しによる鉄筋コンクリート部材のせん断耐力 第6回JCI大会 1984
- 3.) 豊田他. RC部材の終局変位定量化に関する研究 第39回土木学会大会 1984