

[132] RC 橋脚の躯体変形における曲げ変形とせん断変形との分離

正会員 ○島 弘 (東京大学大学院)

正会員 上田多門 (東京大学工学部)

1. まえがき

鉄筋降伏後におけるRC橋脚の天端変位は、躯体上部の弾性域の変形による成分、躯体下部に軸方向鉄筋が降伏することにより形成される塑性域の変形による成分、および、フーチングから鉄筋が引き抜けることによる成分とが組み合わさったものである。通常のRC橋脚模型実験では、用いる鉄筋の径が全体の寸法の縮小比で縮小したものよりも大きく、鉄筋の引抜けによる変位成分の割合が大である。しかし、実物ではこの変位成分の割合は小さく、実験と実物とでは、天端変位に占める各変位成分の割合が異なる。したがって、模型実験から実物橋脚の変形を算定するためには、模型実験において検討したい成分だけを取り出す必要がある。

弾性域の変形は計算でき、鉄筋の引抜けも現在解明されつつある¹⁾。したがって、本研究は、RC橋脚の模型実験を行い、それから実物橋脚の変位の大部分を占める躯体下部の塑性域の変形だけを取り出し、塑性域の変形性能を調べることを目的としたものである。実験要因としては、塑性域の性状を決定すると考えられるパラメーターのなかから、せん断補強量を選び、塑性域の変形を曲げ変形とせん断変形とに分離して検討を行った。

2. 実験の概要

(1) 供試体： 供試体は、図-1に示すように、せん断スパン長 $a=115\text{cm}$ 、断面 $30\times 20\text{cm}$ のもので、 a/d は4.3である。軸方向鉄筋には、引張鉄筋比が0.74%となるようにSD35のD16を4本用いた。せん断補強鉄筋は、帯鉄筋として直径3mmの異形鉄筋を用い、その間隔を変え、帯鉄筋比を0%、0.05%および0.15%に変化させた。なお、帯鉄筋比が0.10%の供試体を、曲率分布測定用として作製した。

(2) 載荷方法： 静的交番繰返し載荷を行った。引張側鉄筋が降伏しひずみに達した時の天端変位 δ_y を基準として、天端変位が $\pm\delta_y$ 、 $\pm 2\delta_y$ 、 $\pm 3\delta_y$...となるまで、各々3サイクルの載荷、除荷、再載荷を繰返し、荷重が急激に低下するまで続けた。

(3) 計測： 主鉄筋の躯体部最下端にシースに入れたワイヤーの先端を固着し、それを下方に延ばして変位計に接続し、フーチングからの主鉄筋の引抜け量を直接測定した。躯体部中心線において、載荷点の他に、躯体部最下端から2dの高さにおける変位 δ_{2d} 、さらにその位置における回転角 θ_{2d} を測るために、2dの位置を中心として、上下に0.25d離れた2点の変位を測定した。高さ2dにおける回転角 θ_{2d} は、それらの3点間の変位分布を2次放物線で近似し、その傾きから求めた。躯体下部の塑性域における曲率分布を調べるために、帯鉄筋比が0.10%の供試体について、躯体部最下端から高さ1.5dまでは0.25d間隔で、2.5dまでは0.5d間隔で各位置における引張側および圧縮側の主鉄筋のひずみを、それぞれ4点で測定した。他の供試体については、主鉄筋のひずみを、塑性域の高さを知るために、帯鉄筋比が0.10%の供試体と同じ位置において、それぞれ1点のみで測定した。

3. 実験結果およびその考察

(1) 荷重-変位関係

躯体のみの変形性状を調べるために、各高さにおける変位は、その測定値からフーチングからの主鉄筋の引抜けによる変位を差

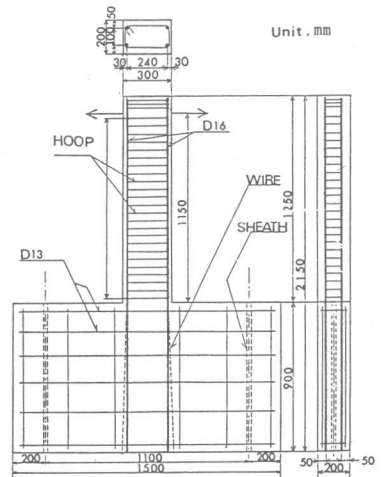


図-1 供試体および配筋

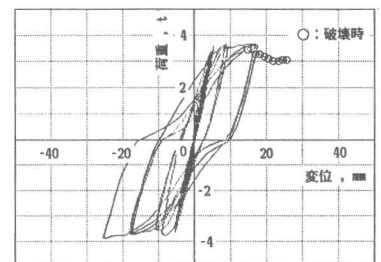


図-2 帯鉄筋比0.00%の荷重-変位曲線

し引き、引抜けの影響を取り除いた。各供試体における躯体の変形のみによる荷重-変位曲線を、図-2から図-4に示す。部材の破壊としては、荷重が急激に低下する点とし、それを図中に白丸で示す。帯鉄筋比が大となるほど破壊時の変位が大きくなっているが、帯鉄筋比の違いが、曲げ変形性能あるいはせん断変形性能のそれぞれにどのように影響を及ぼすかは、これらの図からはわからない。また、それぞれの変形性能が、他の成分の変形量によって影響される可能性が考えられる。したがって、塑性域の変形を、曲げ変形とせん断変形とに分離して、塑性域の変形性能の検討を行う。分離の手法としては、塑性域全体の変形から、曲げ変形を差し引き、残りをせん断変形とするものとする。

曲げ変形だけを直接求めることは不可能であり、それを求めるためには曲率分布を知る必要がある。曲率分布の測定方法としては、主鉄筋のひずみ分布あるいは変位計での測定による躯体の表面のひずみ分布から求めることが考えられるが、主鉄筋のひずみを終局状態まで測ることは困難であり、また、躯体の表面のひずみ分布測定はせん断変形に邪魔されるために、曲率分布を終局状態まで測定することは不可能であると思われる。

したがって、曲率分布の形を、帯鉄筋比0.10%の供試体を用いて測定した主鉄筋のひずみ分布を基にして仮定し、それが終局状態まで成り立つとし、その曲率分布形と、それぞれの供試体で実測した荷重 P 、塑性域高さ l_p および回転角 θ_{2d} とを利用して、その供試体の曲率分布を仮定することとする。塑性域高さ l_p は、引張側あるいは圧縮側の鉄筋が降伏したひずみの測定位置とその上の鉄筋が降伏していないひずみの測定位置との中間点とし、いずれの供試体においても、塑性域の上端は、 $2d$ の高さよりも低い位置にあることを確認した。さらに、高さ $2d$ における回転角 θ_{2d} の測定には $1.75d$ の高さにおける変位が必要であるが、 $1.75d$ における変位はせん断ひびわれによる影響を受けていないことをも確認した。

(2) 主鉄筋降伏後の曲率分布

帯鉄筋比0.10%の供試体の主鉄筋のひずみ分布から求めた曲率分布の例として、天端変位が $-4\delta_y$ および $5\delta_y$ の時のものを図-5に示す。この図から、鉄筋が降伏すると弾性域から塑性域にかけて曲率が急激に大きくなっており、モーメントシフトの影響がうかがわれる。ひずみ分布の正当性を確かめるために、包絡線および内部ループにおけるすべての測定点について、ひずみから求めた曲率を積分して求めた高さ $2d$ における回転角と、たわみから求めた回転角 θ_{2d} とを比較したものを図-6に示す。ひずみ分布から求めた回転角は、ほぼたわみから求めた回転角に一致しており、ひずみ分布が実際のものを表しているものと思われる。

このひずみから求めた曲率分布に基づいて、曲率分布の形を、図-5に示すように、弾性変形の曲率と塑性変形の曲率とに分けて仮定する。弾性変形の大きさは、全曲げ変形からその弾性変形を引いたものが除荷時において変化しないようにすることにより決定した。

躯体部下端における弾性変形の曲率 ϕ_0 は

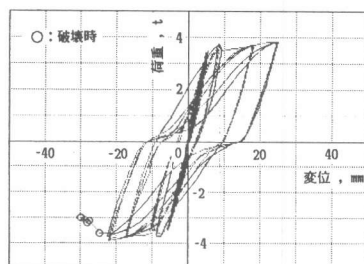


図-3 帯鉄筋比0.05%の荷重-変位曲線

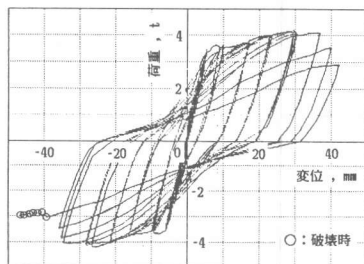


図-4 帯鉄筋比0.15%の荷重-変位曲線

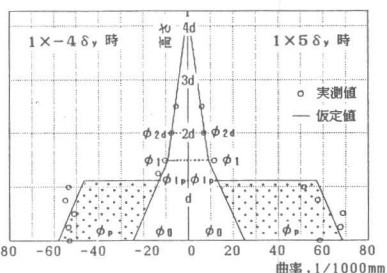


図-5 曲率分布の仮定と実測値

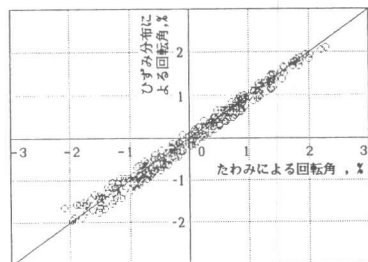


図-6 ひずみ分布およびたわみから求めた回転角

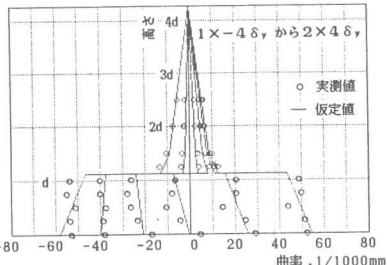


図-7 内部ループにおける曲率分布の変化

$$\phi_0 = M_0 / \alpha E_s I_r$$

とする。ここで、 M_0 は曲げモーメントで $M_0 = P \times a$ 、 E_s は鉄筋のヤング係数、 I_r はコンクリートを無視した鉄筋だけの断面2次モーメントで $I_r = A_s / 2 \times (d - d')^2$ 、 $\alpha = 0.83$ である。曲げ変形において除荷剛性が低下することを考えると、弾性剛性を過去に経験した最大変形によって変化させるべきであると思われるが、その手法は計算が複雑となるので、ここでは、場所によって剛性を変えることにより剛性低下を間接的に表現した。塑性域上端における弾性変形の曲率 ϕ_{1p} は

$$\phi_{1p} = (M_{1p} + M_e) / E_c I_{cr}$$

とする。ここで、 M_{1p} は塑性域上端における曲げモーメントで $M_{1p} = P(a - l_p)$ 、 M_e はモーメントシフトで $M_e = P(d - d')$ 、 E_c はコンクリートのヤング係数、 I_{cr} はひびわれ断面の断面2次モーメントである。塑性域上端から2つ上のひずみ測定点、すなわち $3d/8$ 以上の高さではモーメントシフトがなくなると考えて、その高さにおける曲率 ϕ_1 および $2d$ の高さにおける曲率 ϕ_{2d} を、それぞれ

$$\phi_1 = P(a - l_p + 3d/8) / E_c I_{cr}$$

$$\phi_{2d} = P(a - 2d) / E_c I_{cr}$$

とする。

塑性変形は除荷時において変化がないため、除荷時剛性がみかけ上無限大となり、その曲率 ϕ_p は、モーメントによらず、塑性域のどの位置においても一定であり、 $2d$ の高さにおける実測回転角 θ_{2d} を利用して、

$$\phi_p = (\theta_{2d} - \theta_e) / l_p$$

とする。ここで、 θ_e は $2d$ の高さにおける弾性変形による回転角で、 $\theta_e = (\phi_0 + \phi_{1p}) \times l_p / 2 + (\phi_{1p} + \phi_1) \times 3d/8 / 2 + (\phi_1 + \phi_{2d}) \times (2d - l_p - 3d/8) / 2$ である。

荷重-変位曲線が内部ループにある場合について、仮定した曲率分布の変化と実測値とを比較したものを図-7に示す。この図から、仮定した曲率分布の形は、内部ループにおいても、実際のものとほぼ一致しているものといえる。

(3) 塑性域における曲げ変形およびせん断変形

以上の曲率分布の仮定により、塑性域の変形による天端変位を、弾性曲げ変形、塑性曲げ変形およびせん断変形による成分に分離したそれぞれの荷重-変位曲線を、図-8から図-14に示す。ここで、塑性曲げ変形による天端変位成分 δ_p は、

$$\delta_p = p \delta_{1p} + p \theta_{1p} (a - l_p)$$

とし、 $p \delta_{1p} = \phi_p \times l_p^2 / 2$ 、 $p \theta_{1p} = \phi_p \times l_p$ である。また、せん断変形による天端変位成分 δ_s は、

$$\delta_s = \delta_{2d} - p \delta_{2d} - e \delta_{2d}$$

とし、高さ $2d$ における変位 δ_{2d} から、その高さにおける塑性曲げ変形 $p \delta_{2d}$ および弾性変形 $e \delta_{2d}$ を差し引いたものである。

図-8は、塑性域における弾性曲げ変形による荷重-変位曲線の一例であるが、変形が大きくなるにしたがって、剛性が小さくなっていることを示している。

図-9から図-11の塑性曲げ変形による荷重-変位曲線は完全

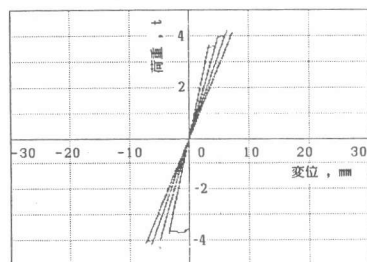


図-8 帯鉄筋比0.15%における塑性域の弾性曲げ変形による荷重-変位曲線

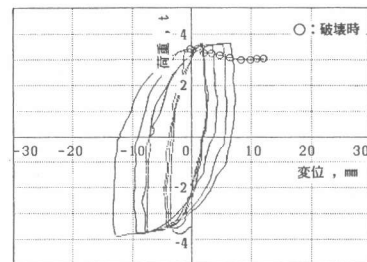


図-9 帯鉄筋比0.00%における塑性曲げ変形による荷重-変位曲線

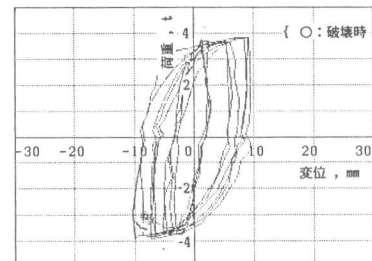


図-10 帯鉄筋比0.05%における塑性曲げ変形による荷重-変位曲線

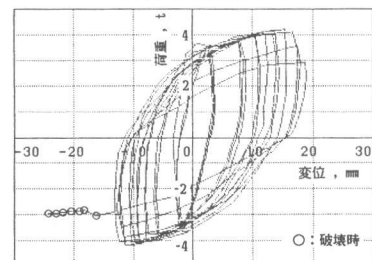


図-11 帯鉄筋比0.15%における塑性曲げ変形による荷重-変位曲線

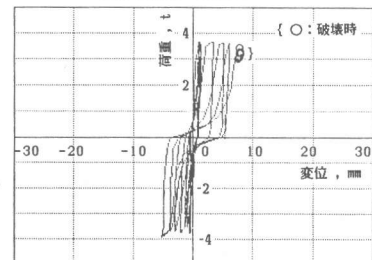


図-12 帯鉄筋比0.00%におけるせん断変形による荷重-変位曲線

な紡錘形のループを示しており、図-12から図-14のせん断変形の荷重-変位曲線は痩せ細ったループを示している。帯鉄筋比が大きくなるほど、最大曲げ変形量および最大せん断変形量も大きくなっているが、内部曲線の形には、終局状態を除いて、帯鉄筋比の影響はみられないようである。

塑性曲げ変形およびせん断変形の荷重-変位関係に及ぼす帯鉄筋比の影響をみるために、各供試体の荷重-変位曲線の破壊した載荷方向の包絡線を、それぞれ図-15および図-16に示す。塑性曲げ変形の包絡線は、最大荷重までは帯鉄筋比の違いにかかわらず同じである。また、帯鉄筋比が大きくなるほど、塑性曲げ変形およびせん断変形における最大荷重時の変形量が大きくなっている。

最大荷重以降の荷重降下域においては、破壊時を除いて、せん断変形が大きく増加しているが、塑性曲げ変形は増加していない。したがって、最大荷重を決定する要因は、曲げ変形性能ではなくせん断変形性能であると言える。すなわち、いずれの供試体においても、曲げ変形性能がせん断変形性能よりも大きいわけであり、変形挙動としては、せん断力あるいはせん断変形量がある値に達した時に、せん断変形とともに荷重低下が始り、塑性曲げ変形はそれがクリティカルでないため、その変形量は荷重低下により変化しないものと考えられる。

そして、最終的には、これらの図から、帯鉄筋比が0%および0.15%の供試体では、あるせん断変形量に達した時に、曲げ変形だけが增加し、せん断変形はまったく増加しておらず、帯鉄筋比が0.05%の供試体では、逆にせん断変形だけが增加し、曲げ変形量は増加していないことがわかる。実際に、帯鉄筋比が0%および0.15%の供試体で、かぶりコンクリートのはく離が生じ、帯鉄筋比が0.05%の供試体では、目視においてせん断破壊の様子であった。したがって、最終的な破壊挙動としては、せん断変形量がある値に達した時に、かぶりコンクリートのはく離とともに圧縮側の鉄筋が座屈して塑性域が回転するか、あるいは急激にせん断破壊するものとがあらわれる。

4. 結論

せん断卓越型のRC橋脚の躯体下部の塑性域の変形のみを取り出した本実験の範囲で、以下のような結論を得た。

- (1) 最大荷重を決定する要因は、せん断変形性能であり、その時の荷重およびせん断変形量は、帯鉄筋比が大きくなるほど大となる。
- (2) 最大荷重以降の荷重降下域では、せん断変形のみが増加し、曲げ変形は増加しない。
- (3) 最終的な破壊は、せん断変形量がある値に達した時に、かぶりコンクリートがはく離して鉄筋が座屈する場合と、そのまま急激にせん断破壊する場合とがある。

参考文献

- 1) Niwa, J. et.al., "Nonlinear Spring Element for Strain-Slip Relationship of a Deformed Bar," Seminar on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, Vol.2, Tokyo, JCI, 1985.

本研究に対し、日本スパンクリート協会研究助成金を頂きました。ここに謝意を表します。

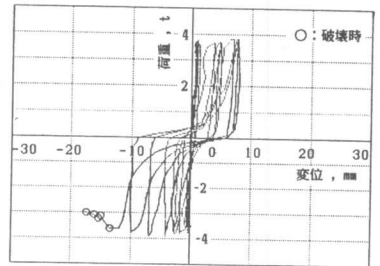


図-13 帯鉄筋比0.05%におけるせん断変形による荷重-変位曲線

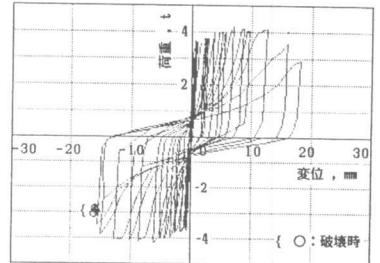


図-14 帯鉄筋比0.15%におけるせん断変形による荷重-変位曲線

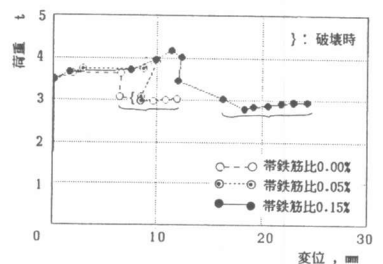


図-15 各供試体の塑性曲げ変形による荷重-変位曲線の包絡線

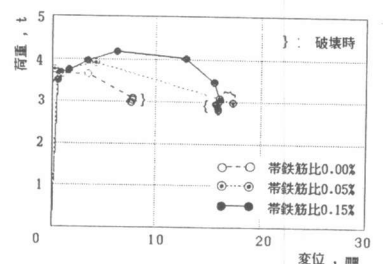


図-16 各供試体のせん断変形による荷重-変位曲線の包絡線