

論文

[2056] RC はりのせん断抵抗機構に及ぼす繰り返し载荷の影響

正会員○越路卓也（東京ガス）

正会員 岡村 甫（東京大学工学部）

1. はじめに

正負交番载荷を受ける鉄筋コンクリート壁の力学的挙動を数値計算によって求めるために、我々の研究室は非線形有限要素解析プログラム『WCOMR』を開発した¹⁾。このプログラムは精度の良い材料モデルに基づいているために精度が高いばかりでなく汎用性に優れたものとなっている。一方、ハッサンらによって、繰り返し曲げせん断载荷を受ける鉄筋コンクリートはりの詳細かつ精度の良い実験結果が得られている²⁾。本研究は『WCOMR』を図-1に示すような、ハッサンらの実験に適用することによって、はりのせん断抵抗機構、特に、繰り返し载荷を受ける場合におけるせん断抵抗機構を考察したものである。

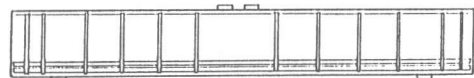


図-1 ハッサンらの実験供試体

『WCOMR』では、ひびわれ発生後の材料特性を表現する材料モデルとして、圧縮剛性モデル、引張剛性モデル、およびせん断伝達剛性モデルの3モデルを採用している。

圧縮剛性モデルは、圧縮を受けるコンクリートの応力-ひずみ関係を表現するモデルである。引張剛性モデルは、鉄筋コンクリートでは、ひびわれの発生後も鉄筋からの付着を通じてコンクリートに応力が伝達されることを表現するものである。せん断伝達剛性モデルは、ひびわれ面で応力が伝達されることを表現するものである。本研究は、繰り返し载荷を受ける鉄筋コンクリートはりの力学的挙動をこの材料特性の変化によって説明しようとするものである。

2. 単調载荷

申鉉穆の研究³⁾によると、単調载荷を受けるRCはりの場合、実験の結果と『WCOMR』による解析の結果を比較すると、変形と荷重の関係が非常によく一致することが確かめられている。そこで本研究では、まず斜めスターラップによってせん断補強されたはりが単調载荷を受ける場合に、内部応力状態と変形が良く一致することを確認し、次に、繰り返し载荷を受けた場合にはどのような違いが現れるかを確認する。

2.1 実験結果と解析結果の比較

実験結果と解析結果とを比較する際に、まず、せん断補強筋の負担する引張力に着目し、はり全体として、せん断補強筋がどの程度の引張力を負担するのかを考えることにした。図-2(a)は要素分割を示しているが、解析では分散ひびわれモデルを用いているため、鉄筋の位置は各要素中の鉄筋比で与えられることになる。解析の結果として、斜線部の要素に含まれる

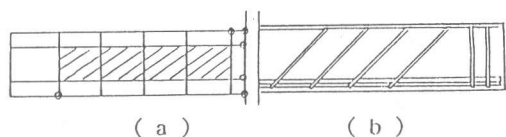


図-2 要素分割と実験供試体

せん断補強筋の引張力を合計したものをせん断補強筋の負担力とした。一方、実験の結果としては、実験供試体を示している図-2 (b)において、測定されたせん断補強筋のひずみから、それぞれの鉄筋の引張力を算出し、合計したものをせん断補強筋の負担力とした。このほうが単調荷重を受ける場合について、実験と解析とを比較すると、図-3に示すようにその結果は非常に良く一致している。また、ひびわれにおける局所的な変形に着目して実験と解析を比較した結果も、変形の方法はほぼ一致している。図-4は、変形の概略を表すものである。すなわち、ひびわれの開きとずれを解析がよく表現しているものと言える。以上の結果は、『WCOMR』が、このような曲げせん断を受けるRCはりの場合にも適用が可能であることを示すものである。

2.2 せん断補強筋比の影響

単調荷重を受ける場合には、この解析法を適用することが可能であることから、せん断補強筋比が異なる場合について解析を行った。せん断補強筋比が変化すると、主圧縮応力の角度およびせん断補強筋の負担する引張力が変化することが予想される。解析からせん断補強筋比の影響を調べたのが図-5および図-6である。せん断補強筋比が大きくなると、せん断補強筋の合計の負担分が増加し、圧縮斜材の角度が小さくなることが明瞭に示されている。

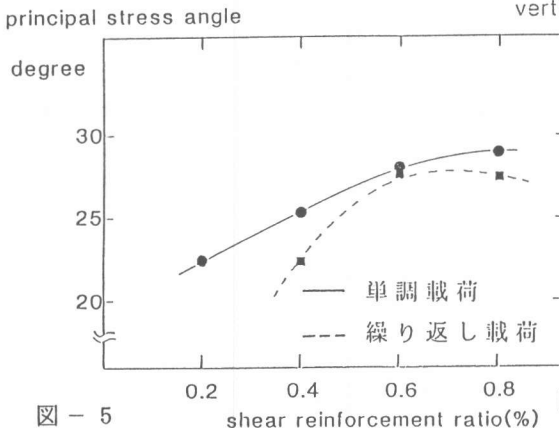


図-5 主圧縮応力角度とせん断補強筋比の関係
($v = 20 \text{ t}$ 時)

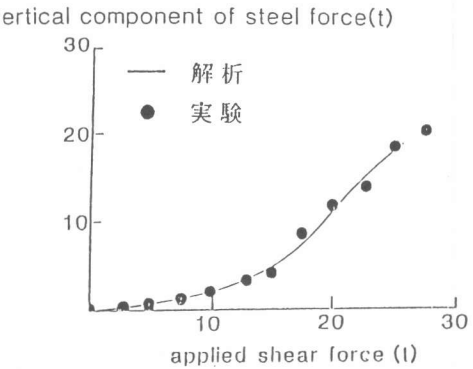


図-3 実験結果と解析結果

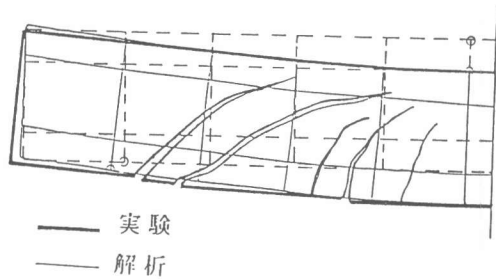


図-4 変形図 (単調荷重)

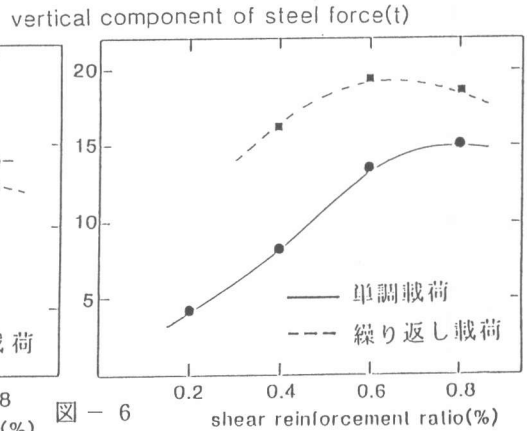


図-6 せん断補強筋の引張力とせん断補強筋比の関係
($v = 20 \text{ t}$ 時)

3. 繰り返し载荷

3. 1 繰り返し载荷が材料モデルに与える影響

繰り返し载荷を受ける場合、せん断補強筋の引張力はその繰り返しの回数にしたがって次第に増加する。ハッサンの実験においては図7-(a)に示す载荷を行った。単調载荷における解析結果と比較した場合、繰り返しによる影響は図7-(b)のように現れる。単調载荷の場合に実験と解析がよく適合したことから、図7-(b)の実験と解析の結果における差はそのまま繰り返しの影響であると考えられる。

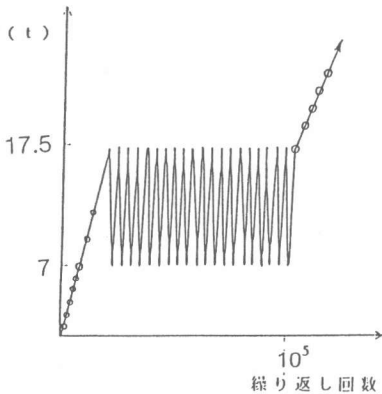


図-7(a) 载荷経路

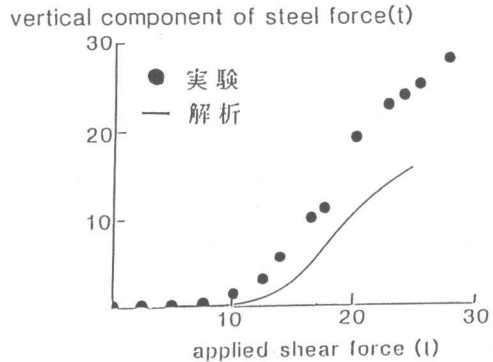


図-7(b)

繰り返し载荷時の実験結果と解析結果

このように繰り返し载荷を行うことによってせん断補強筋の引張力が増加する原因としては次の2つを考えることができる。

- ① 繰り返し载荷による破壊の進行
- ② 長時間载荷による塑性変形の増大

繰り返し回数が10万回にも及ぶとはりに与えられるエネルギーは莫大なものとなり、局部的に何等かの破壊が起こっているものと考えられる。また、繰り返し载荷を行うには、かなりの時間を必要とし、その間供試体はずっと载荷を受け続けることになり、少なくとも単調载荷時よりは、塑性変形が大きくなるものと予想される。このような現象が起こることにより、材料特性が変化すると仮定し、圧縮剛性モデル、引張剛性モデル、せん断伝達剛性モデルのそれぞれについて検討を行った。

1) 圧縮剛性モデル

繰り返し载荷の影響によって、『WCOMR』で用いている圧縮剛性を表す式(1)の塑性ひずみがさらに増加し、低減係数 ω がさらに低下すると考え、解析を行った。

$$\begin{aligned}
 S &= E_0 \cdot K \cdot (E - E_p) = E_0 \cdot K \cdot E_e \\
 E_p &= E_{max} - (20/7) \cdot (1 - \exp(-0.35 \cdot E_{max})) \\
 K &= \omega \cdot K_0 \\
 K_0 &= \exp(-0.73 \cdot E_{max} \cdot (1 - \exp(-1.25 \cdot E_{max}))) \quad \dots \dots \text{式(1)} \\
 E &= E_e + E_p
 \end{aligned}$$

ここで、S : 等価応力
 E e : 等価弾性ひずみ
 E o : コンクリートの初期剛性
 E max : 過去に経験した最大のひずみ
 E : 等価全ひずみ = E e + E p
 E p : 等価塑性ひずみ
 K o : 剛性の低減率
 ω : K o の低減係数

そこで、実際に圧縮剛性を低下した解析を行った結果、せん断補強筋の負担、主圧縮応力角度はあまり変化せず、圧縮剛性の低下の影響を受けないことが確認された。その理由は、RCはりのような部材ではそれほど高レベルの圧縮力を受けていないためであると考えられる。

2) 引張剛性モデル

繰り返し载荷によって、コンクリートと鉄筋の間の付着機構は徐々に破壊され、鉄筋の引張力がコンクリートに十分伝達されなくなると考えられる。そこで、『WCOMR』では、式(2)で表されていた引張剛性モデルを、付着性状を表すパラメータcを大きくすることによって図-8に示すように、ひびわれ発生後のコンクリートが負担する引張力を小さくして解析を行った。

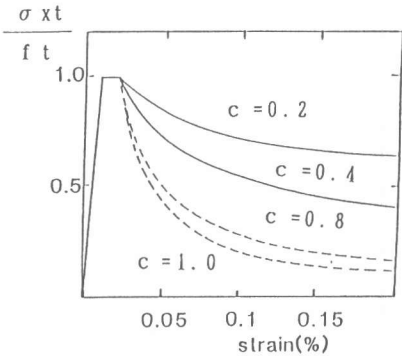


図-8 引張剛性モデル

$$\frac{\sigma_{xt}}{f_t} = \left(\frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_x} \right)^c \cdot \text{式(2)}$$

ここで、 σ_{xt} : ひびわれ直角方向のコンクリートの引張力 (kgf/cm²)

f_t : コンクリートの引張強度 (kgf/cm²)

ϵ_{cr} : ひびわれ発生時の平均引張ひずみ

ϵ_x : ひびわれ直角方向の平均引張ひずみ

c : 付着性状を表すパラメータ 0.2:溶接金網の場合、0.4:異形鉄筋の場合

引張剛性を低下させたモデルで解析した結果が図-9である。引張剛性が小さくなるにしたがってせん断補強筋の負担する引張力が大きくなり、実験の結果に近づくことが認められる。したがって、繰り返し载荷を受けることによって引張剛性の低下が起こり、せん断抵抗機構が大きく変化することが予測される。

3) せん断伝達剛性モデル

繰り返し载荷が、せん断伝達剛性の低下をもたらすだろうということは容易に予測できる。なぜなら、繰り返し载荷が行われた場合、ひびわれが開閉を繰り返し、ひびわれがずれることによって、ひびわれ面がぼろぼろと削られていくのが実験からも観察できるからである。そこで、繰り返し载荷が行われることにより、ひびわれ面で、次のような破壊が進行することを仮定した。

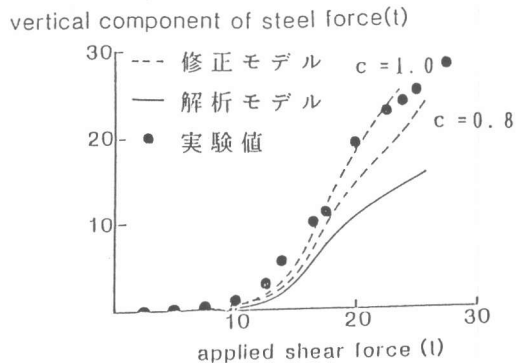


図-9 引張剛性を低下させた場合

一つは、大きな角度を持つひびわれ面が削り取られて、小さな角度のひびわれ面に変化すること、

もう一つは、ひびわれ面の小さな凹凸が、繰り返し擦り合わされることにより削り取られることから、ひびわれ面の平滑化が起こり、摩擦係数が小さくなることである。この2つの現象は式(3)で表される、ひびわれ面で伝達するせん断応力 τ とひびわれ面直交方向に働く圧縮応力 σ の関係を図-10のように変化させる。

$$\tau = f_{sk} \cdot \frac{\beta^2}{1 + \beta^2}$$

$$\sigma = -f_{sk} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{1}{\beta}\right) - \frac{\beta}{1 + \beta^2} \right) \quad \dots \dots \dots \text{式(3)}$$

ここで、 $f_{sk} = 18 \cdot f'_c{}^{1/3}$

τ : ひびわれ面に働くせん断応力

σ : ひびわれ面でひびわれ直角方向に働く圧縮応力

f'_c : コンクリートの一軸圧縮強度 (kgf/cm²)

β : パラメータ = δ / ω (δ : ひびわれのずれ、 ω : ひびわれ幅)

このことから、 $\tau - \sigma$ の関係を変化させて解析を行った結果が図-11である。

(kg/cm²)

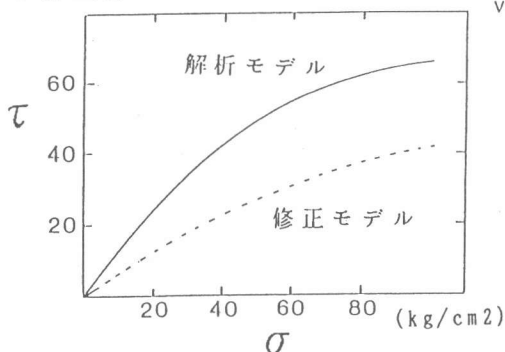


図-10 τ と σ の関係

vertical component of steel force(t)

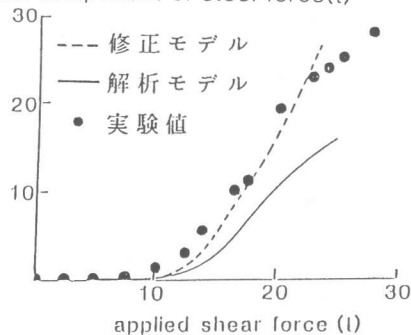


図-11 せん断伝達剛性を低下させた場合

これを見て分かるようにひびわれ面での破壊が進行することにより、せん断補強筋の引張力は増加し、実験の結果に近づくと言える。したがって、繰り返し载荷により、せん断伝達剛性の低下が実際にも起こっており、せん断抵抗機構を変化させるものと考えられる。

以上3つの材料モデルに関する検討から、繰り返し载荷を受けることにより、引張剛性の低下、せん断伝達剛性の低下の両方が起こり、せん断抵抗機構の変化に大きな影響が及ぼされるものと考えられる。この2

vertical component of steel force(t)

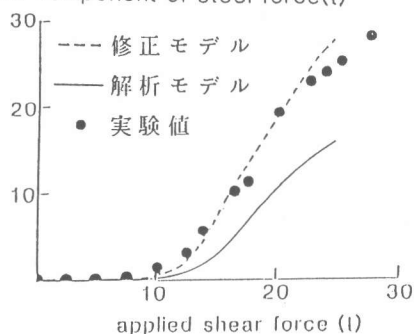


図-12 剛性低下の組合せ

種類の剛性低下を組み合わせることによって図-12のように解析結果を実験結果とよく一致させることができた。この例は、引張剛性モデルで用いられる鉄筋の付着性状を表すパラメータ c を0.7とし、 $\tau - \sigma$ 関係を0.7倍に低下させた結果を示している。さらにこの時のひびわれにお

ける局所変形をひびわれ図から幾何的に再現し、解析による変形と重ね合わせたものが図-13である。この変形を見ると解析結果はかなり実験結果と一致しているものと言える。したがって、変形からもこの剛性低下の組合せがある程度精度が良いことを示していると言える。

3. 2. せん断補強筋比が与える影響

せん断補強筋比が高くなると、せん断補強筋の負担する引張力は増加し、主圧縮応力角度が大きくなることは、既に2. 2で述べた。繰り返しによる剛性の低下が3. 1で述べた程度に起こっているものと仮定すると、主圧縮応力の角度は、繰り返し载荷を受けることによってやや小さくなる。(図-5破線)

また、せん断補強筋の負担する引張力は、単調载荷時にはせん断補強筋比による違いが大きかったが、繰り返し载荷を受けた場合には、せん断補強筋比の違いによる影響が小さくなるのが認められる。

(図-6破線)この理由としては、鉄筋

比が小さい場合には、すでにコンクリートの負担する引張力が大きく、繰り返しの影響を顕著に受けるため、せん断補強筋による負担の増加が大きいことを示している。このことは上田らの研究⁴⁾によっても示されていることであり、繰り返しを受ける場合に行った材料モデルの修正の妥当性を示すものの一つであると言える。

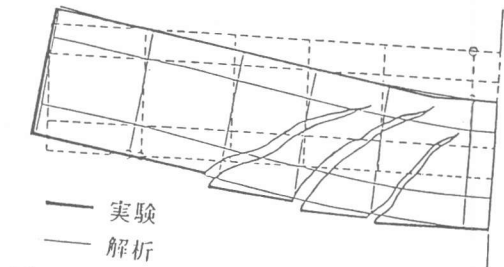


図-13 変形図(繰り返し载荷)

3. 結論

- 1) 単調载荷を受けるはりにおいても『WCOMR』による解析の結果は、せん断補強筋の負担する引張力、変形に関して、よく実験と適合している。
- 2) 繰り返し载荷を受けることにより、RCはりのせん断抵抗機構は変化する。その原因は引張剛性の低下とせん断伝達剛性の低下が起こることによるものであると考えられる。その結果として、せん断補強筋の負担応力が増加する。
- 3) せん断補強筋比によって、主圧縮応力角度、せん断補強筋による負担引張力の合計は変化する。特に、せん断補強筋比の小さい場合には、繰り返し载荷によってコンクリートの負担引張力の減少が顕著に起こり、せん断補強筋の負担力が増大する。

参考文献

- 1) 申、出雲、前川、岡村：鉄筋コンクリート壁の復元力特性の有限要素解析法、コンクリート工学年次論文報告集第10巻第1号、1988年
- 2) HUSSEIN MOKHTAR HASSAN: SHEAR CRACKING BEHAVIOR AND SHEAR RESISTING MECHANISM OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH WEB REINFORCEMENT, A DOCTOR THESIS SUBMITTED TO THE UNIVERSITY OF TOKYO, MARCH, 1988
- 3) 申鉉穆：繰り返し面内力を受ける鉄筋コンクリート部材の有限要素法解析、東京大学土木工学科博士論文、1988年6月
- 4) Tamon UEDA and Hajime OKAMURA : Behavior in Shear of Reinforced Concrete Beams under Fatigue Loading, JOURNAL OF FACULTY OF ENGINEERING, THE UNIVERSITY OF TOKYO Vol. XXXVII, NO. 1, 1983