

純ねじり交番載荷解析に基づく終局耐力の精度向上

九州大学大学院 学生会員 ○服部匡洋 九州大学大学院 フェロー 大塚久哲

1. 目的

RC アーチ橋のアーチリブ等，地震作用時に大きなねじりモーメントが生じる構造が増加しつつあり，ねじり骨格曲線を厳密に考慮した地震応答解析が求められている．本稿では，RC 部材のねじり骨格曲線の精度向上を目的とし，壁厚及び帯鉄筋間隔を変化させた純ねじり交番載荷実験に対するシミュレーション解析を実施し，実験値と解析値を比較した．さらに，コンクリート標準示方書¹⁾より終局耐力の設計値を計算し，示方書の終局耐力の精度向上に関する検討を行った．

2. 解析条件・解析ケース

解析モデルを図-1に示す．解析詳細については，参考文献2)を参照されたい．交番載荷は，ねじり角制御で行い，1ループ目はひび割れ発生まで，2ループ目はねじり初期剛性の急変が見られる部材降伏まで(10_y)，3ループ目以降は部材降伏の整数倍(20_y, 30_y, …)として載荷した．

解析ケース及び材料試験結果を表-1に示す．本検討では，中空壁厚と帯鉄筋間隔をパラメータとし，壁厚60mmと100mm，帯鉄筋間隔30mmと60mmの計4体に対してシミュレーション解析を実施した．各解析ケースにおける材料強度には，純ねじり交番載荷実験に際して実施した材料試験結果を使用した．

3. 終局耐力の実験値と解析値の比較

参考文献2)より，純ねじり交番載荷実験に対するシミュレーション解析は，ねじり履歴曲線やひび割れ進展状況等の再現性が良好であることが示された．本検討では，最大耐力点を終局点と定義し，終局点におけるねじり耐力に着目した．終局耐力の実験結果と解析結果の比較を表-2に示す．表-2より，No.3を除いて，解析は実験に比べ，わ

ずかに大きくなる．しかし，帯鉄筋間隔が疎になると，終局耐力が低下する等，実験より得られた傾向を概ね捉えることができている．終局耐力についても，シミュレーション解析は精度よく再現したといえる．

4. 終局耐力の実験値と設計値の比較

終局耐力の実験値と設計値の比較を表-3に示す．ここで，設計値はコンクリート標準示方書¹⁾を参照した．コンクリート標準示方書では，ねじり破壊形式として，コンクリートの圧壊と鉄筋降伏が想定され，それぞれの破壊形式に対する設計式が示されている．式(1)がコンクリートの圧壊，式(2)(3)が鉄筋降伏に対する耐力を表す．それぞれの破壊形式に対する耐力を計算し，小さい方を設計における破壊形式とする．

コンクリートの圧壊に対する耐力

$$M_{t\text{cud}} = K_t \cdot f_{wcd} / \gamma_b \quad (1)$$

$$f_{wcd} = 1.25 \sqrt{f'_{cd}} \text{ ただし, } f_{wcd} \leq 9.8 \text{ N/mm}^2$$

鉄筋降伏に対する耐力

$$M_{tyd} = 2A_m \sqrt{q_w \cdot q_l} / \gamma_b \quad (t/b \geq 0.25) \quad (2)$$

$$M_{tyd} = 2A_m (V_{odi})_{\min} \quad (t/b < 0.25) \quad (3)$$

$$q_w = A_{tw} \cdot f_{wd} / s$$

$$q_l = \sum A_{il} \cdot f_{ld} / u$$

ただし， $q_w \geq 1.25q_l$ となる場合には $q_w = 1.25q_l$ とし， $q_l \geq 1.25q_w$ となる場合には $q_l = 1.25q_w$ とする．

表-3には，ねじり破壊の形式の比較を併せて示す．表-3より，設計値は実験においてコンクリートの圧壊を呈したNo.1, No.3を過大に，鉄筋降伏が確認されたNo.2, No.4を過小に評価する傾向にあった．また，No.3では，設計において想定される破壊形式は実験での破壊形式が異なった．設計値の精度が悪い原因として，コンクリートの圧壊に対する耐力が大きく，鉄筋降伏に対する耐力が

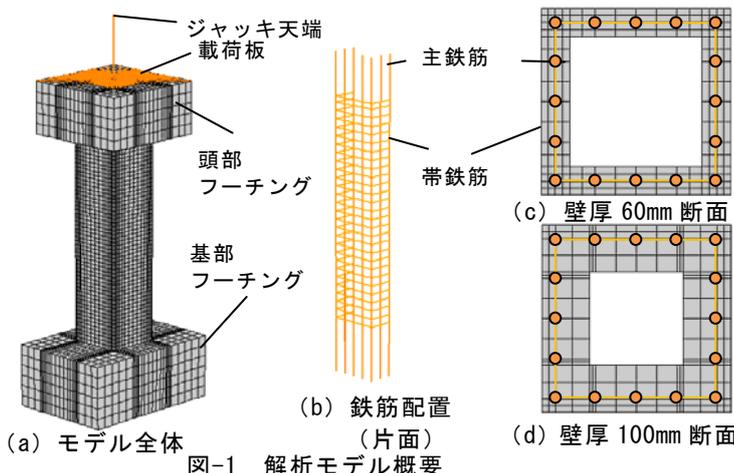


図-1 解析モデル概要

表-1 解析ケース

パラメータ	No.1	No.2	No.3	No.4
軸応力比(%)	N ₀	10	10	10
壁厚(mm)	t	60	60	100
壁厚比	t/b	0.15	0.15	0.25
帯鉄筋間隔(mm)	s	30	60	60
圧縮強度(N/mm ²)	f _{ck}	60.3	61.6	57.4
ヤング率(N/mm ²)	E _c	27800	27100	25100
引張強度(N/mm ²)	f _t	3.5	3.6	3.4
主鉄筋比(%)	ρ _{sl}	2.48	2.48	1.69
帯鉄筋体積比(%)	ρ _{sw}	1.88	0.94	1.28

表-2 終局耐力の解析値と実験値の比較

	No.1	No.2	No.3	No.4
解析 (kNm)	108.0	88.3	105.5	93.6
実験 (kNm)	106.6	80.7	107.0	90.7
解析/実験	1.01	1.09	0.99	1.03

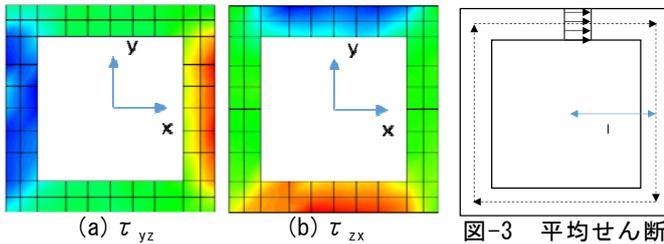


図-2 せん断応力分布

図-3 平均せん断応力のイメージ

表-3 終局耐力の設計値と実験値の比較

	No.1	No.2	No.3	No.4
コンクリートの圧壊に対する耐力 (kNm)	108.2	108.2	140.4	140.4
鉄筋降伏に対する耐力 (kNm)	117.8	58.9	123.8	65.8
設計 (kNm)	108.2	58.9	123.8	65.8
実験 (kNm)	106.6	80.7	107.0	90.7
設計/実験	1.02	0.73	1.16	0.73
設計における破壊形式	コンクリート圧壊	鉄筋降伏	鉄筋降伏	鉄筋降伏
実験における破壊形式	コンクリート圧壊	鉄筋降伏	コンクリート圧壊	鉄筋降伏

小さく評価されるためと考えられる。

5. 終局耐力設計値の精度向上

コンクリートの圧壊に対する耐力に関して、シミュレーション解析の再現性が良好であるため、解析結果に基づいた平均せん断応力 f_{wcd} の精度向上を試みる。平均せん断応力 f_{wcd} は図-2 に示す解析より得られた終局耐力時のせん断応力分布を基に、式(4)を用いて平均せん断応力 f_{wcd} を求めた。図-3 のように壁厚内に一定にせん断応力が発生すると仮定し、式(4)より計算した。

$$f_{wcd} = \frac{\sum \tau_{yz} x dA + \sum \tau_{zx} y dA}{\sum l dA} \quad (4)$$

また、解析結果より得られた平均せん断応力 f_{wcd} を図-4 に示す。本実験では圧縮強度 f'_{ck} が比較的大きかったため、平均せん断応力 f_{wcd} の設計値は 9.8 N/mm^2 となる。図-4 より、設計では平均せん断応力 f_{wcd} が壁厚比によらず一定であるのに対し、解析結果から得られた平均せん断応力は壁厚の影響により、大きく変化することがわかる。また、全てのケースにおいて、解析より得られた平均せん断応力は、設計値に比べて小さくなった。解析より得られた平均せん断応力 f_{wcd} が設計値に比べて小さくなった原因として、本実験供試体は比較的壁厚が厚いため、図-2 に示すようにせん断応力が壁厚内で一定ではなく、壁厚内面でせん断応力が小さくなっているためと考えられる。

また、鉄筋降伏に対する耐力に関して、本実験供試体では、主鉄筋量が帯鉄筋量に比べて過大で

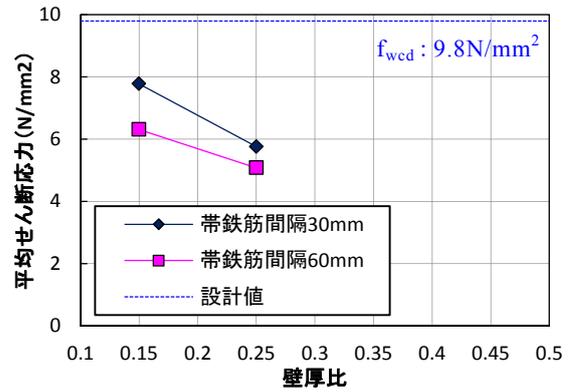


図-4 解析結果より得られた平均せん断応力

表-4 変更後の終局耐力の設計値と実験値の比較

	No.1	No.2	No.3	No.4
コンクリートの圧壊に対する耐力 (kNm)	107.9	87.5	103.7	91.4
鉄筋降伏に対する耐力 (kNm)	123.8	80.7	123.8	80.7
設計 (kNm)	107.9	80.7	103.7	80.7
実験 (kNm)	106.6	80.7	107.0	90.7
設計/実験	1.01	1.00	0.97	0.89
設計における破壊形式	コンクリート圧壊	鉄筋降伏	コンクリート圧壊	鉄筋降伏
実験における破壊形式	コンクリート圧壊	鉄筋降伏	コンクリート圧壊	鉄筋降伏

あり、式(2)における過大鉄筋の抵抗制限により、全てのケースで主鉄筋抵抗分 q_l が帯鉄筋抵抗分 q_w の 1.25 倍に制限されるため、主鉄筋抵抗分 q_l が小さく評価されていると予想される。鉄筋ひずみについては、シミュレーション解析の再現性が悪く、解析結果より q_l/q_w を導くのは難しい。このため、実験時に測定した軸方向鉄筋及び横方向鉄筋ひずみを使用し、 q_l/q_w を逆算すると 1.88 程度であることが確認された。

以上の検討によって得られた平均せん断応力 f_{wcd} 及び q_l/q_w を代入し、計算した設計値と想定される破壊形式を表-4 に示す。No.3 について、表-3 では実験と破壊形式が異なっていた。しかし、平均せん断応力 f_{wcd} が低減されることで、コンクリートの圧壊に対する耐力が小さくなり、破壊形式が鉄筋降伏からコンクリートの圧壊となった。このため、全ケースで想定される破壊形式が、実験の破壊形式と一致し、設計値の精度も向上した。

6. 結論

本検討では、中空壁厚及び帯鉄筋間隔を変化させた純ねじり交番載荷実験及び解析より得られた平均せん断応力 f_{wcd} 及び q_l/q_w を使用することで、ねじり終局耐力の精度が向上することを示した。

参考文献

- 1) 土木学会：2012年度制定コンクリート標準示方書[設計編]
- 2) 服部・大塚・梶田・崔：中空断面柱部材に対する純ねじり交番載荷実験のシミュレーション解析、第16回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、2012.7