

せん断クラック幅を対象とした損傷評価  
ーせん断力を指標とした残留ひび割れ幅の推定

正会員 ○山根英揮 1\*  
正会員 島崎和司 2\*\*

鉄筋コンクリート    せん断クラック    残留クラック幅  
損傷評価

1. 序

建物の損傷評価としてのクラック幅は、修繕の必要性や、再使用の可能性を検討する指標として重要である。曲げに対するひび割れ幅の評価に比べ、せん断ひび割れ幅に関しては、ひび割れに関するデータが十分に蓄積しておらず、その評価法は確立されているとはいえない。せん断クラック後のひび割れ幅は、単純に考えればせん断補強筋の平均ひずみをクラック間で積分したものと考えられ、主筋やせん断補強筋が降伏するまでは、せん断力に比例関係にあると仮定できる。本研究では、せん断ひび割れ幅と、せん断力の関係から、損傷量の評価指標としてのひび割れ幅の推定式を求めることを目的とする。

2. 実験データ

用いた実験データは、著者等の実験と、クラックに関するデータが公表されている表 1 に示した 49 体のデータとした。実験は、せん断クラック評価をするためのものだけでなく、せん断崩壊を検証するためのものも含まれており、せん断耐力以下で、主筋やせん断補強筋が降伏するまでのクラック幅データに関するものを Zone I、せん断耐破壊後のクラック幅に対応するものを Zone II と区分けした。本論では修復限界に対応する Zone I について述べる。

データ整理の方法としては、せん断力を  $f_s b_j$  (記号は RC 規準による) で除して規準化し、これをせん断力比として、ピーク時ひび割れ幅 ( $X$ ) との関係を図 1 に示すように、せん断クラック ( $Q_c = \alpha' f_s b_j$ ) 後から Zone I 区間では、加力サイクルのピーク時の基準化したせん断力とクラック幅が直線関係にあるとし、(1)式のように想定して検討する。

$$Q / f_s b_j = \alpha' + \beta X \quad \dots(1)$$

図 2 に代表的な試験体のせん断力比ーひび割れ幅関係とピーク時ひび割れ幅ー残留ひび割れ幅関係を示した。それぞれの試験体においては、線形関係が確保されているといえる。これを線形回帰し、切片( $\alpha'$ )と傾き( $\beta$ )を求め、各パラメータによる重回帰分析を行った。統計処理には、グラフからその値を読み取れるデータも含め、処女戴荷時のデータのみを用いた。また、せん断クラック荷重とピーク時 (短期許容応力度 or  $R=1/100$  以下) にひび割れ幅のみが記載されているものも用いた。せん断クラック荷重が明示されていないデータで、せん断補強筋の履歴のあるものについては、そのグラフの折れ点より読み取った値を用いた。

表 1 実験データ一覧

| No. | 断面寸法 (mm)  |      |        | コンクリート<br>圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 鉄筋                          |                                    |                           | せん断スパン比 | 軸力比  | 参考文献 |   |
|-----|------------|------|--------|--|-----------------------------|------------------------------------|---------------------------|---------|------|------|---|
|     | 幅          | 有効せい | 応力中心距離 |  | 引張鉄筋比<br>P <sub>t</sub> (%) | せん断補強筋降伏強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 帯筋比<br>P <sub>w</sub> (%) |         |      |      |   |
| 1   | 7          | 200  | 175    | 153                                    | 22.2                        | 0.82                               | 477                       | 0.10    | 2.29 | 0.15 | 1 |
| 2   | 8          | 200  | 175    | 153                                    | 22.2                        | 0.82                               | 477                       | 0.10    | 2.29 | 0.15 |   |
| 3   | 9          | 200  | 175    | 153                                    | 22.2                        | 0.82                               | 477                       | 0.30    | 2.29 | 0.15 |   |
| 4   | 10         | 200  | 175    | 153                                    | 22.2                        | 0.82                               | 477                       | 0.30    | 2.29 | 0.15 |   |
| 5   | 11         | 200  | 175    | 153                                    | 22.2                        | 0.82                               | 477                       | 0.10    | 1.14 | 0.15 |   |
| 6   | 12         | 200  | 175    | 153                                    | 22.2                        | 0.82                               | 477                       | 0.10    | 1.14 | 0.15 |   |
| 7   | 13         | 200  | 175    | 153                                    | 22.2                        | 0.82                               | 477                       | 0.30    | 1.14 | 0.15 |   |
| 8   | 14         | 200  | 175    | 153                                    | 22.2                        | 0.82                               | 477                       | 0.30    | 1.14 | 0.15 |   |
| 9   | 8C         | 200  | 175    | 153                                    | 25.0                        | 0.82                               | 477                       | 0.10    | 2.29 | 0.15 | 2 |
| 10  | 12C        | 200  | 175    | 153                                    | 25.0                        | 0.82                               | 477                       | 0.10    | 1.14 | 0.15 |   |
| 11  | 14C        | 200  | 175    | 153                                    | 25.0                        | 0.82                               | 477                       | 0.30    | 1.14 | 0.15 |   |
| 12  | 1          | 320  | 278    | 243                                    | 24.3                        | 0.67                               | 391                       | 0.49    | 2.30 | 0.00 | 3 |
| 13  | 2          | 320  | 278    | 243                                    | 24.3                        | 0.67                               | 391                       | 0.49    | 1.73 | 0.20 |   |
| 14  | 3          | 320  | 278    | 243                                    | 23.8                        | 0.67                               | 391                       | 0.49    | 1.73 | 0.00 |   |
| 15  | 4          | 320  | 278    | 243                                    | 24.3                        | 0.67                               | 391                       | 0.49    | 1.73 | 0.20 |   |
| 16  | 5          | 320  | 278    | 243                                    | 23.8                        | 0.67                               | 391                       | 0.49    | 1.73 | 0.00 |   |
| 17  | 6          | 320  | 278    | 243                                    | 23.8                        | 0.67                               | 391                       | 0.25    | 1.73 | 0.00 |   |
| 18  | R-N-N5-N0  | 275  | 315    | 276                                    | 36.2                        | 0.59                               | 526                       | 0.71    | 1.11 | 0.00 | 4 |
| 19  | R-N-47     | 275  | 315    | 276                                    | 29.7                        | 0.59                               | 1277                      | 0.46    | 1.11 | 0.00 |   |
| 20  | R-N-73     | 275  | 315    | 276                                    | 29.7                        | 0.59                               | 1280                      | 0.71    | 1.11 | 0.00 |   |
| 21  | R-N-138    | 275  | 315    | 276                                    | 29.7                        | 0.59                               | 1317                      | 1.40    | 1.11 | 0.00 |   |
| 22  | R-H-73     | 275  | 315    | 276                                    | 57.7                        | 0.59                               | 1280                      | 0.71    | 1.11 | 0.00 |   |
| 23  | R-N-N-94-S | 275  | 315    | 276                                    | 34.8                        | 0.59                               | 289                       | 0.94    | 1.11 | 0.00 |   |
| 24  | R-N-N-94-B | 275  | 315    | 276                                    | 34.8                        | 0.59                               | 289                       | 0.94    | 1.11 | 0.00 |   |
| 25  | 1B         | 200  | 249    | 218                                    | 39.9                        | 1.99                               | 303                       | 0.42    | 1.81 | 0.00 | 5 |
| 26  | 2B         | 200  | 249    | 218                                    | 39.9                        | 1.99                               | 353                       | 0.42    | 1.81 | 0.00 |   |
| 27  | 3B         | 200  | 249    | 218                                    | 39.9                        | 1.99                               | 353                       | 0.42    | 1.81 | 0.13 |   |
| 28  | 4B         | 200  | 249    | 218                                    | 39.9                        | 1.99                               | 353                       | 0.84    | 1.81 | 0.00 |   |
| 29  | 5B         | 200  | 249    | 218                                    | 39.9                        | 1.99                               | 353                       | 0.84    | 1.81 | 0.13 |   |
| 30  | B-1        | 320  | 310    | 271                                    | 36.4                        | 1.95                               | 362                       | 0.32    | 4.30 | 0.00 | 6 |
| 31  | B-2        | 320  | 310    | 271                                    | 36.4                        | 1.95                               | 362                       | 0.64    | 4.30 | 0.00 |   |
| 32  | 1B'        | 200  | 261    | 228                                    | 35.5                        | 1.65                               | 307                       | 0.25    | 1.72 | 0.00 |   |
| 33  | 2B'        | 200  | 261    | 228                                    | 35.5                        | 1.65                               | 307                       | 0.58    | 1.72 | 0.00 |   |
| 34  | 3B'        | 200  | 261    | 228                                    | 35.5                        | 1.65                               | 357                       | 0.57    | 1.72 | 0.00 |   |
| 35  | 4B'        | 200  | 261    | 228                                    | 35.5                        | 1.65                               | 357                       | 1.02    | 1.72 | 0.00 |   |
| 36  | 5B'        | 200  | 261    | 228                                    | 35.5                        | 1.65                               | 355                       | 1.01    | 1.72 | 0.00 |   |
| 37  | 6B'        | 200  | 261    | 228                                    | 38.8                        | 1.65                               | 357                       | 0.57    | 1.72 | 0.06 |   |
| 38  | 7B'        | 200  | 261    | 228                                    | 38.8                        | 1.65                               | 357                       | 0.57    | 1.72 | 0.13 |   |
| 39  | 8B'        | 200  | 261    | 228                                    | 38.8                        | 1.65                               | 357                       | 1.02    | 1.72 | 0.06 |   |
| 40  | 9B'        | 200  | 261    | 228                                    | 38.8                        | 1.65                               | 357                       | 1.02    | 1.72 | 0.13 |   |
| 41  | 10B'       | 240  | 261    | 228                                    | 38.8                        | 1.37                               | 357                       | 0.48    | 1.72 | 0.00 |   |
| 42  | 11B'       | 240  | 261    | 228                                    | 38.8                        | 1.37                               | 357                       | 0.85    | 1.72 | 0.00 |   |
| 43  | 12B'       | 300  | 261    | 228                                    | 35.5                        | 1.10                               | 357                       | 0.38    | 1.72 | 0.00 |   |
| 44  | 13B'       | 200  | 261    | 228                                    | 35.5                        | 1.65                               | 357                       | 0.58    | 1.72 | 0.00 |   |
| 45  | 14B'       | 200  | 261    | 228                                    | 35.5                        | 1.65                               | 357                       | 0.58    | 1.72 | 0.00 |   |
| 46  | 1B''       | 160  | 352    | 308                                    | 32.2                        | 2.12                               | 486                       | 0.50    | 1.95 | 0.00 | 7 |
| 47  | 2B''       | 160  | 352    | 308                                    | 32.2                        | 2.12                               | 486                       | 1.00    | 1.95 | 0.00 |   |
| 48  | 3B''       | 160  | 352    | 308                                    | 34.2                        | 2.12                               | 1257                      | 0.50    | 1.95 | 0.00 |   |
| 49  | 4B''       | 160  | 352    | 308                                    | 34.2                        | 2.12                               | 1257                      | 1.00    | 1.95 | 0.00 |   |

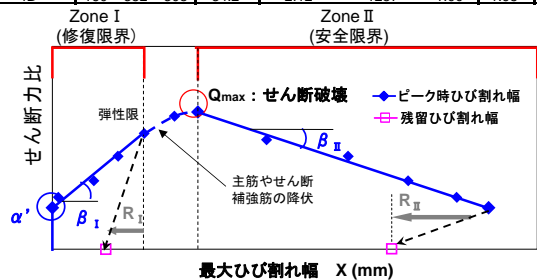


図 1 せん断力比ーひび割れ幅模式図

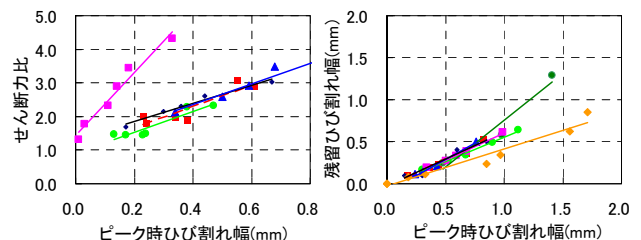


図 2 各試験体のひび割れ幅の関係

Damage estimation of RC members based on diagonal crack width  
Estimation of diagonal crack width by shear force index

YAMANE Hideki and SHIMAZAKI Kazushi

### 3. 回帰式

ピーク時ひび割れ幅 (X) の実験データから  $b, d, p_t, w_f, p_w, Qd/M$ , 軸力比  $n$ (記号は RC 規準による)をパラメータとして(1)式の  $\alpha$  と  $\beta$  に対する線形重回帰分析を行った (単位: mm, kN, 鉄筋比%)。その結果を表 2,3 に示す。 $\alpha$  は、 $p_t, p_w, Qd/M, n$  が、 $\beta$  は  $b, p_t, p_w, Qd/M$  が主要因となっている。クラック幅が、せん断補強筋のひずみの積分であるとする有効せいとクラック幅は比例することになるが、せん断力を  $f_s b j$  で無次元化することにより、本データ範囲では  $\alpha, \beta$  に関して有効せいとの関連性は少ない。せん断補強筋のひずみの積分だけでは、ひび割れ幅に達しないとの研究<sup>4)</sup>もあり、せいが高くなるとクラック本数が増大し、また乾燥収縮等の影響もあり、理論的な検討によるクラック幅の推定は現状では難しいといえる。

パラメータを主要因のものに縮約して線形重回帰分析を行い、推定式として次式を得る。

$$\begin{aligned} \alpha &= -0.43 + 0.51p_t + 0.47p_w + 0.94Qd/M + 5.77n \\ \beta &= 8.58 - 1.42 \times 10^{-2}b - 1.25p_t + 3.23p_w - 4.86Qd/M \quad \dots(2) \end{aligned}$$

図 3 に推定値と実験値との比較を示す。ばらつきはあるが概ね実験値と対応している。

ピーク時ひび割れ幅に対する、残留ひび割れ幅の残留率(R)に対し、主要因子での線形重回帰分析を行なった結果を表 4 に示す。これより、推定式として次式を得る。

$$R = -0.272 + 0.340p_t - 0.258p_w + 0.743Qd/M \quad \dots(3)$$

代表的な試験体の(2)(3)式で得られる値を(1)式に代入して求めたせん断力比-残留ひび割れ幅関係と実験値の対応を図 5 に示す。No.4 の実験値のせん断力比が小さいが、それ以外は、おおむねよい対応を示しているといえる。

これより、修復限界内での Zone I における残留クラック幅 ( $X_r$ ) は次式により算定することが可能となる。

$$X_r = R \cdot (Q / f_s b j - \alpha) / \beta \quad \dots(4)$$

### 4. 結論

ひび割れ幅の実験結果を線形重回帰分析を行い、相関度の高いパラメータを用いた推定式を求めた。この式により、概ね残留ひび割れ幅を推定することができた。なお、本論でのデータはパラメータが限定されているので、実大スケールへの適用には、別途考慮が必要となる。

### 参考文献

- 1) 岩松、五十嵐泉、島崎和司: RC 造柱の地震後の残存軸耐力に関する研究 その 2 繰り返し載荷とせん断スパン比の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2, pp.313-314, 2007年8月 他
- 2) 曾根大貴、金本清臣、坂田弘安、田村和夫、和田章、鉄筋コンクリート柱部材の地震時損傷評価に関する実験的研究(その 1.実験計画および結果の概要)、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) 2001.9 他
- 3) 中村陽介、鉄筋コンクリート柱の損傷過程におけるせん断ひび割れ幅挙動および評価法に関する研究、2004年度 東京工業大学修士論文 他

表2 係数  $\alpha$  に関する線形重回帰分析結果

|                | 係数        | 標準誤差     | t     | 回帰統計               |      |
|----------------|-----------|----------|-------|--------------------|------|
| 切片             | -1.68E+00 | 6.95E-01 | -2.41 | 重相関 R              | 0.80 |
| b              | 2.83E-03  | 1.72E-03 | 1.64  | 重決定 R <sup>2</sup> | 0.64 |
| d              | 3.18E-04  | 1.90E-03 | 0.17  | 補正 R <sup>2</sup>  | 0.58 |
| p <sub>t</sub> | 7.46E-01  | 1.90E-01 | 3.92  | 標準誤差               | 0.34 |
| w <sub>f</sub> | -9.12E-05 | 2.11E-04 | -0.43 |                    |      |
| p <sub>w</sub> | 3.95E-01  | 2.16E-01 | 1.83  |                    |      |
| Qd/M           | 1.37E+00  | 3.93E-01 | 3.49  |                    |      |
| n              | 6.59E+00  | 9.73E-01 | 6.77  |                    |      |

表3 係数  $\beta$  に関する線形重回帰分析結果

|                | 係数        | 標準誤差     | t     | 回帰統計               |      |
|----------------|-----------|----------|-------|--------------------|------|
| 切片             | 1.16E+01  | 1.87E+00 | 6.22  | 重相関 R              | 0.79 |
| b              | -2.49E-02 | 7.58E-03 | -3.29 | 重決定 R <sup>2</sup> | 0.62 |
| d              | 8.62E-03  | 9.63E-03 | 0.89  | 補正 R <sup>2</sup>  | 0.53 |
| p <sub>t</sub> | -2.04E+00 | 5.77E-01 | -3.53 | 標準誤差               | 0.86 |
| w <sub>f</sub> | 5.23E-04  | 6.31E-04 | 0.83  |                    |      |
| p <sub>w</sub> | 2.53E+00  | 7.20E-01 | 3.51  |                    |      |
| Qd/M           | -6.91E+00 | 1.44E+00 | -4.80 |                    |      |
| n              | -5.90E+00 | 2.98E+00 | -1.98 |                    |      |

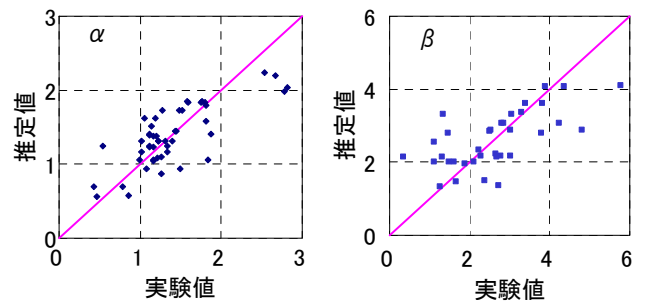


図 3 推定値と実験値の対応

表4 係数 R に関する線形重回帰分析結果

|                | 係数        | 標準誤差     | t     | 回帰統計               |      |
|----------------|-----------|----------|-------|--------------------|------|
| 切片             | -2.72E-01 | 1.35E-01 | -2.01 | 重相関 R              | 0.79 |
| p <sub>t</sub> | 3.40E-01  | 5.60E-02 | 6.07  | 重決定 R <sup>2</sup> | 0.62 |
| p <sub>w</sub> | -2.58E-01 | 9.43E-02 | -2.73 | 補正 R <sup>2</sup>  | 0.58 |
| Qd/M           | 7.43E-01  | 1.59E-01 | 4.68  | 標準誤差               | 0.13 |

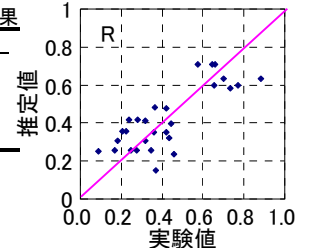


図 4 推定値と実験値の対応

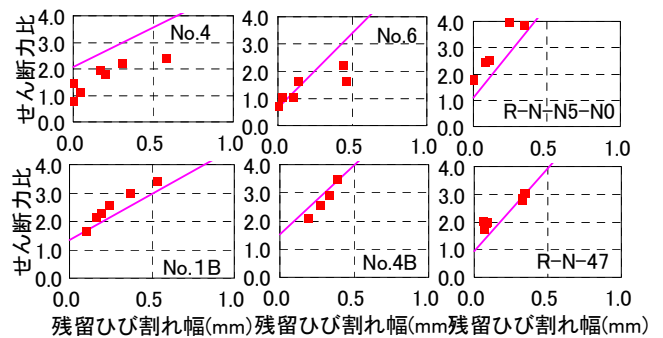


図 5 推定式による算定値と実験値の対応

- 4) 柳瀬圭兒、大野義照、鉄筋コンクリート梁部材のせん断ひび割れ幅、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸) 2002.8
- 5) 高見信嗣、江戸宏彰、RC 部材のひび割れ幅特性に関する実験、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北) 2000.9
- 6) 柳瀬圭兒、大野義照、中川隆夫、RC および PRC 梁のせん断ひび割れ幅、コンクリート工学年次論文集 Vol.25, No.2, 2003
- 7) 松石長之、川西泰一郎、久田祐司、渡辺史夫、鉄筋コンクリート造梁のせん断ひび割れ幅制御に関する研究、(その 1)実験概要と結果の考察、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国) 1999.9 他

\*神奈川大学 共同研究者

\*\*神奈川大学 工学部 建築学科 教授 博士 (工学)

\* Kanagawa University

\*\* Professor, Kanagawa University, Dr. Eng.