

# 疲労荷重およびコンクリートの収縮が RC 部材の曲げひび割れ幅及ぼす影響

コンクリート研究室 鈴木 健一  
指導教員 下村 匠

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物およびプレストレスト鉄筋コンクリート構造物はひび割れの発生を許容し、ひび割れ幅を設定した限界値以下に抑える設計が可能である。

ひび割れ幅の制御は、a)たわみ、気密性、水密性および美観等の使用性、b)供用年限内でひび割れ部分の補強材の腐食抵抗性による構造物の安全性、耐久性、の2つの観点から重要であり、ひび割れ幅はこれらを示す重要な指標値である。限界状態設計法がはじめて取り入れられた土木学会コンクリート標準示方書の昭和61年の制定までひび割れ幅の照査は規定されていなかった。ひび割れ幅を予測する算定式は、この照査導入後にも、精力的な研究が行われ推定精度の向上が図られているが、現在においても、算定式による予測値と実構造物における実測値との間には精度は高くない。

2002年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編]<sup>1)</sup>において示されるひび割れ幅算定式は式(1)である。

$$w_{\max} = k_1 k_2 k_3 \left\{ 4c + 0.7(c_s - \phi) \right\} \left( \frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{cs} \right) \quad (1)$$

$$k_2 = \frac{15}{f'_c + 20} + 0.7, \quad k_3 = \frac{5(n+2)}{7n+8}$$

ここに、 $w_{\max}$ :最大ひび割れ幅、 $k_1$ :鋼材の付着性状を表す定数で、一般に異形鉄筋の場合に1.0、普通丸鋼およびPC鋼棒の場合に1.3としてよい、 $k_2$ :コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数、 $k_3$ :引張鋼材の段数がひび割れ幅に及ぼす影響を

表す係数、 $c$ :かぶり、 $c_s$ :鋼材の中心間隔、 $\phi$ :鋼材径、 $\varepsilon'_{cs}$ :コンクリートの乾燥収縮およびクリープによるひび割れ幅の増加を考慮するための数値で、一般に150[ $\mu$ ]としてよい、 $f'_c$ :コンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $n$ :引張鋼材の段数である。

$\varepsilon'_{cs}$ には、コンクリートの収縮、クリープなどの影響のほか、鉄筋とコンクリートの付着や、交通、列車などによる疲労荷重の影響が含まれる。この値は、現在はその構造物の各種条件によらず一定値で評価を行っているが、コンクリートの収縮はコンクリートの配合や環境条件により大きく異なり、またクリープ、疲労荷重の影響も構造物に作用する荷重の大きさや変動の程度により異なる。これらをそれぞれがひび割れ幅に与える影響をそれぞれ適切に評価することで、より精度の高いひび割れ幅の推定が可能となると思われる。

本研究では、RC部材に作用する疲労荷重およびコンクリートの収縮量がRC構造物のひび割れ幅、変形挙動に与える影響を検討するために、RCはり試験体の疲労試験、一軸RC部材の引張試験を行った。

## 2. RC部材の曲げ疲労載荷試験

### 2.1. 実験方法

RCはり試験体に静的載荷および繰返し載荷、持続載荷を行い、クリープおよび疲労荷重が曲げひび割れ幅に及ぼす影響を検討した。

実験に用いたはりを図-1に示す。載荷方法はスパン420[mm]、せん断スパン100[mm]の対称2点振分載荷とした。繰返し載荷は載荷周波数5[Hz]で100万

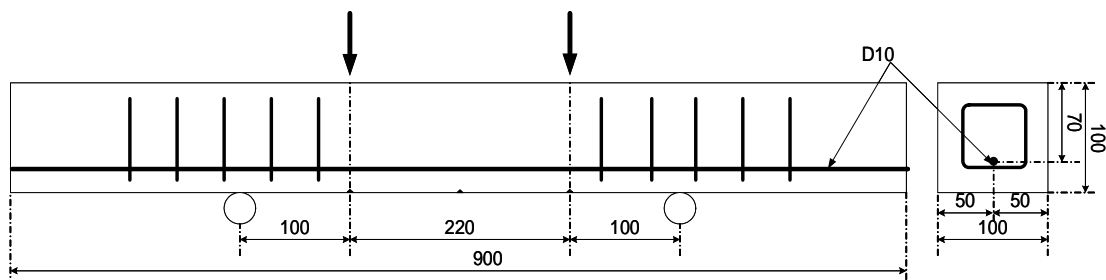


図-1 RC はりの曲げ疲労試験 試験体図

回まで行い，荷重振幅は静的載荷を行った試験体により得られた降伏荷重の 10～50[%]とした．

1,2,4,7×10<sup>n</sup> 回目の載荷は 1/120[Hz]で行い，このときに変位と鉄筋位置での曲げひび割れ幅を計測した．ひび割れ幅の計測はひび割れの確認後一旦除荷し，ひび割れを跨ぐように非接触変位計を設置して行った．

## 2.2. 試験ケース

試験は全 6 ケース行った．使用したコンクリートの示方配合を表-1 に示す．

No.1 試験体は基準試験体である．No.2 試験体は疲労荷重振幅による差異の検討を目的とした高荷重試験体で，荷重の上限値を静的載荷試験体の降伏荷重の 70[%]とした．No.3, 4 試験体は短繊維混入試験体である．静的載荷時に確認されるごく少量の短繊維混入により生ずるひび割れ幅低減効果の疲労載荷時の挙動の検討を目的とした短繊維混入試験体である．それぞれの試験体に写真-1,2 に示す短繊維を体積比で 0.5[%]混入した．短繊維の諸元は表-2 に示すとおりである．No.5 試験体はひび割れの高さ方向の進展による影響の検討を目的とした模擬ひび割れ導入試験体である．あらかじめひび割れが進展した状態を模擬するために作製した試験体で，スパン中央および載荷点位置に 60×100mm の塩ビ板を埋設した．No.6 試験体は持続載荷を行った試験体である．持続荷重は，静的載荷試験体の降伏荷重 50[%]とした．

## 2.3. 実験結果

コンクリートの強度試験結果を表-3 に，鋼材の引張試験結果を表-4 に示す．強度試験は各配合の 1 体目載荷開始時に行った．

疲労載荷の上限荷重時の変位およびひび割れ幅を抽出し，載荷時間と比較した．図-2,3 は上限荷重時変位-載荷時間，上限荷重時平均ひび割れ幅-載荷時間関係である．いずれの試験体においても変位，ひび割れ幅は載荷時間の対数に比例して増加する傾向が見られた．

## 2.4. 疲労荷重が変形，ひび割れ幅に及ぼす影響

疲労載荷試験体(No.1)と持続載荷試験体(No.6)を比較し持続載荷，疲労載荷の影響を検討した．作用する



写真-1 No.3 試験体に使用した短繊維（短繊維 S）



写真-2 No.4 試験体に使用した短繊維（短繊維 L）

表-1 示方配合（単位:[kg/m<sup>3</sup>]）

| 水   | セメント | 細骨材 | 粗骨材 |
|-----|------|-----|-----|
| 190 | 306  | 799 | 985 |

表-2 短繊維補強材の物性値

|                         | 短繊維 S<br>(No.3 試験体) | 短繊維 L<br>(No.4 試験体) |
|-------------------------|---------------------|---------------------|
| 材質                      | アラミド                | アラミド                |
| 密度 [g/cm <sup>3</sup> ] | 1.39                | 12.6                |
| 引張強度 [MPa]              | 3430                | 1225                |
| 弾性係数 [GPa]              | 72.5                | 26.0                |
| 長さ [mm]                 | 6                   | 30                  |
| 径 [mm]                  | 0.012               | 0.6                 |

表-3 コンクリートの物性値

|       | 圧縮強度<br>[MPa] | 弾性係数<br>[GPa] | 試験体    |
|-------|---------------|---------------|--------|
| PL(1) | 33.7          | 31.0          | No.1,2 |
| PL(2) | 32.3          | 28.6          | No.5,6 |
| 短繊維 S | 27.8          | 24.5          | No.3   |
| 短繊維 L | 36.1          | 27.4          | No.4   |

表-4 鋼材の物性値

|                       | 主鉄筋<br>D10 | せん断補強筋<br>D6 |
|-----------------------|------------|--------------|
| 断面積[mm <sup>2</sup> ] | 71.33      | 31.67        |
| 降伏強度[MPa]             | 360        | 415          |
| 弾性係数[GPa]             | 177        | 165          |

応力（荷重）の時間積分値は持続荷重試験体の方が大きいのだが、疲労荷重試験体の方が変位、ひび割れ幅の増加が大きく部材の変形の進行に与える影響は疲労荷重の方が著しいことが確認された。

短繊維混入の影響を検討するため、基準試験体、短繊維 S 試験体、短繊維 L 試験体について比較すると、短繊維を混入した試験体では、基準試験体に比べ初期の変位、ひび割れ幅が低減されている。しかし、その後の変位およびひび割れ幅の増加は基準試験体よりも著しく、荷重初期の変位、ひび割れ幅の差異は荷重に伴い消失する傾向が見られた。短繊維による静的荷重時に確認される様々な効果は繰り返して荷重を受けるうちに消失することが明らかとなった。

ひび割れ深さの進展を、疲労荷重の上下限時の変位差より平均曲げ剛性を求めることで検討した。図-4 は平均曲げ剛性-荷重時間関係である。いずれの試験体も平均曲げ剛性が時間の経過に伴い低下しており、これらがひび割れ幅増加の一因であることが示された。上限荷重の大きい No.2 試験体は、初期の平均曲げ剛性が基準試験体よりも小さいが、その後の剛性の低下はほぼ基準試験体と同程度であった。

### 3. RC 部材の一軸引張試験

#### 3.1. 実験目的

コンクリートの収縮量は、使用する混和材料の種類や水粉体比などのコンクリートの配合や環境条件により大きく異なる。2002 年度制定コンクリート標準示方書においても、水粉体比や乾燥開始材齢によって異なる収縮量が得られるよう示されているが、ひび割れ幅の予測においてはこれらの条件は考慮されない。本実験では、収縮量の差が RC 部材のひび割れ幅に及ぼす影響について検討を行った。

#### 3.2. 実験概要

一軸 RC 部材を作製し、その引張試験を行い部材の引張挙動およびひび割れ幅について検討を行った。

試験は、普通コンクリートを用いたケース(No.1)、高強度コンクリートを用いたケース(No.2)、高強度コンクリートに膨張材を混入し、収縮を低減させたケースの 3 通りを行った。各配合の示方配合は表-5 に示すとおりである。

図-5 に作成した一軸 RC 試験体の形状を示す。試験体は 150×150×2000[mm]のコンクリートの中心に D22 相当のねじ節 PC 鋼棒を配したものである。荷重時に部材端部で鉄筋が抜出すことを抑制するために、部材両端 250[mm]区間に D6 鉄筋で作製したス

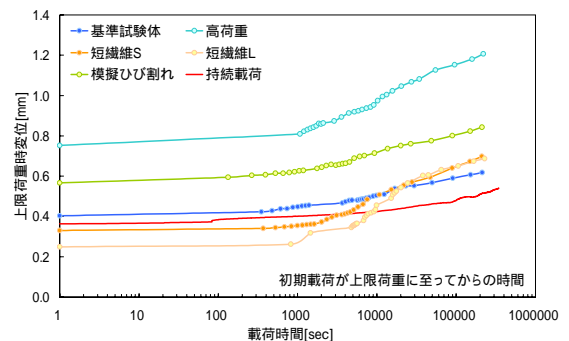


図-2 上限荷重時変位-荷重時間

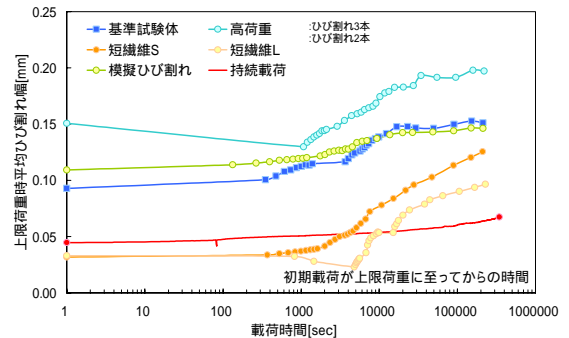


図-3 上限荷重時ひび割れ幅-荷重時間

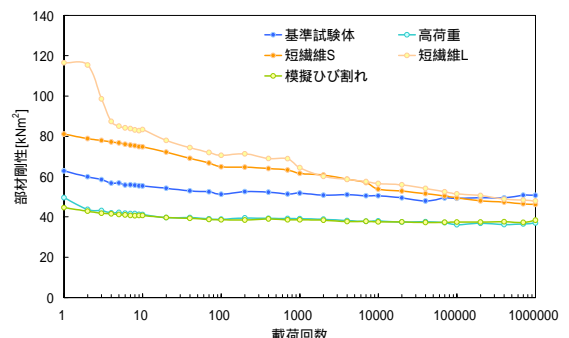


図-4 平均曲げ剛性-荷重時間

表-5 示方配合

|      | 水   | セメント | 高炉スラグ | シリカフューム | 細骨材 | 粗骨材  | 膨張材 | 備考        |
|------|-----|------|-------|---------|-----|------|-----|-----------|
| No.1 | 148 | 379  | -     | -       | 645 | 1191 | -   | 普通コンクリート  |
| No.2 | 170 | 510  | 340   | 43      | 545 | 739  | -   | 高強度コンクリート |
| No.3 | 170 | 490  | 340   | 43      | 545 | 739  | 20  | 高強度収縮低減   |

パイラル筋を配置した。

養生は材齢 21 日まで封緘養生を行い、その後引張試験まで気中養生とした

No.1 試験体は材齢 42 日、No.2,3 試験体は材齢 28 日で載荷を行った。

100 × 100 × 400[mm]のコンクリート角柱に熱電対内臓埋込み型ひずみ計を埋設し、その収縮量を観測した。

引張試験は図-6 に示すような載荷システムに試験体を設置し、油圧ジャッキにより鋼材に引張力を加力した。部材の変形は、試験体の内側 1500mm 区間を対象として検討した。対象区間両端にワイヤーおよび引張型変位計を設置することで、対象区間の伸びを計測した。ひび割れは、対象区間に生じたひび割れのうち、断面を貫通したのみを検討対象とし、ひび割れ発生直後にマイクروسコープまたはクラックスケールで初期ひび割れ幅を計測し、渦電流式非接触変位計および計測用治具をひび割れをまたぐように設置してその後のひび割れ幅の変化を観測した。

### 3.3. 収縮過程

養生期間中のコンクリートの自由収縮量を図-7 に示す。養生期間中の温度変化は線膨張係数を $[10 \mu / ]$ として補正した。高強度コンクリートを用いた試験体では載荷初期に著しい収縮が確認された。これは単位粉体量が多く自己収縮が著しいためと考えられる。No.3 試験体に使用したコンクリートの収縮は膨張材を混入することにより No.2 試験体に比べおよ

そ半減した。

### 3.4. 載荷実験

引張試験時のコンクリートの強度試験結果および鋼材の引張試験結果を表-6,7 に示す。

荷重-部材平均ひずみ関係を図-7、荷重-平均ひび割れ幅関係を図-8 に示す。図-7 に引張試験より得た鋼材単体の荷重-ひずみ関係も合わせて示している。高強度試験体(No.2)と高強度収縮低減試験体(No.3)のコンクリート引張強度は同等であるにもかかわらず、その発生荷重には大きな差が出た。また、高荷重時のひずみが、同一荷重時の鉄筋単体よりも大きな値

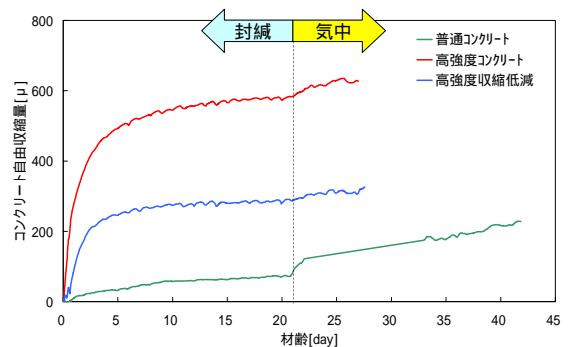


図 - 7 自由収縮量 - 材齢

表-6 コンクリートの物性値

|      |           | 圧縮強度 [MPa] | 引張強度 [MPa] | 弾性係数 [GPa] |
|------|-----------|------------|------------|------------|
| No.1 | 普通コンクリート  | 39.6       | 2.82       | 35.7       |
| No.2 | 高強度コンクリート | 81.1       | 4.87       | 50.2       |
| No.3 | 高強度収縮低減   | 94.6       | 4.72       | 43.4       |

表-7 鋼材の物性値

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| 断面積[mm <sup>2</sup> ] | 387.1 |
| 降伏強度[MPa]             | 1044  |
| 弾性係数[GPa]             | 204   |

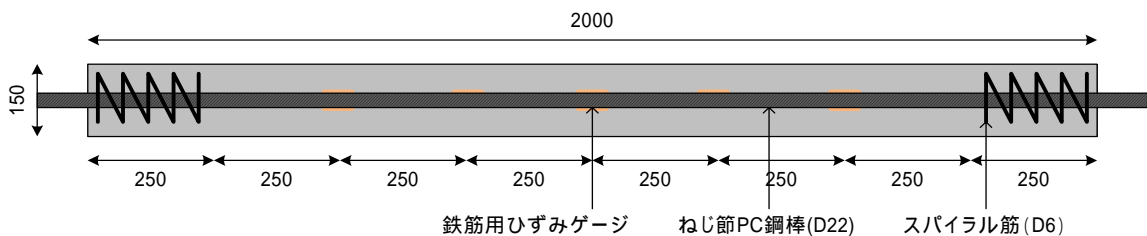


図-5 試験体形状

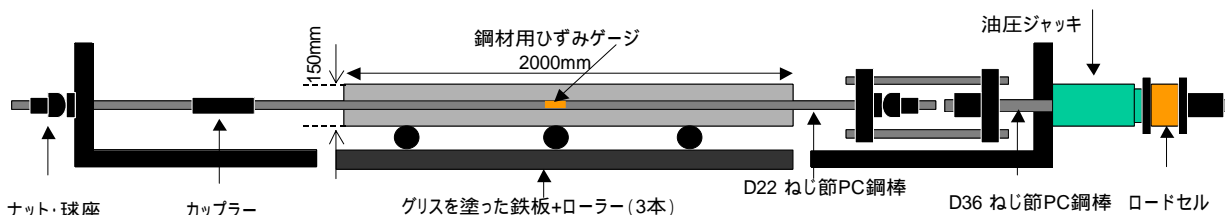


図-6 載荷システム模式図



を示した。これらについては次節で考察する。

### 3.5. コンクリートの収縮がひび割れ幅に及ぼす影響

高強度試験体と高強度収縮低減試験体のひび割れ発生荷重の差異について検討を行う。RC 部材中の鋼材はコンクリートの収縮に伴い、圧縮される。これによりコンクリートには引張が作用する。そのため、載荷前の段階で収縮により引張応力および引張ひずみが生じる。これらは、式(2)~(4)により推定できる。

$$\varepsilon'_{s0} = \varepsilon'_{sh} / (1 + A_s E_s / A_c E_c) \quad (2)$$

$$\varepsilon_e = \varepsilon'_{sh} - \varepsilon'_{s0} \quad (3)$$

$$\sigma_{c0} = \varepsilon_e E_c \quad (4)$$

ここに、 $\varepsilon'_{s0}$ :載荷前に部材(鋼材)に生ずるひずみ、 $\varepsilon_e$ :載荷前にコンクリートに生ずるひずみ(有効ひずみ)、 $\varepsilon'_{sh}$ :コンクリートの自由収縮ひずみ、 $A_s, A_c$ :鋼材、コンクリートの断面積、 $E_s, E_c$ :鋼材、コンクリートの弾性係数、 $\sigma_{c0}$ :載荷前にコンクリートに生ずる応力、である。これらを考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係が図-10である。コンクリートの応力およびひずみは式(5),(6)により求めた。

$$\overline{\varepsilon_{cm}} = \varepsilon_e + \varepsilon_s \quad (5)$$

$$\overline{\sigma_{cm}} = \sigma_{c0} + (P - A_s E_s \varepsilon_s) / A_c \quad (6)$$

ここに、 $\overline{\varepsilon_{cm}}$ :載荷前の変形を考慮したコンクリート平均ひずみ、 $\overline{\sigma_{cm}}$ :載荷前の応力を考慮したコンクリート平均応力、 $P$ :荷重、である。

載荷前に生じたひずみおよび応力を考慮することで、高強度試験体と高強度収縮低減試験体、双方のコンクリートの応力-ひずみ関係がほぼ一致し、収縮の程度によらない Tension Stiffness の評価が行えることが示された。

次に、高荷重時の変形について検討したい。前述のとおり、載荷前にあらかじめ収縮によって部材(鋼材)に圧縮ひずみ  $\varepsilon'_{s0}$  が生じている。このひずみはコンクリートがひび割れ、鉄筋周囲の損傷が進行するに解放されるものと考えられる。つまり、載荷前を基準とした場合、載荷前ひずみの分だけ大きい変形を生ずるということである。鋼材単体のひずみを  $\varepsilon'_{s0}$  だけシフトさせて比較することで、この影響を除去した評価が行えると思われる。図-11 は特に収縮の大きい高強度試験体の荷重-ひずみ関係と  $\varepsilon'_{s0}$  の影響を考慮した鋼材単体の荷重-ひずみ関係を比較したものである。結果、高荷重時の荷重-ひずみ関係は、ほぼ鋼材単体の応力-ひずみ関係と一致する結果とな

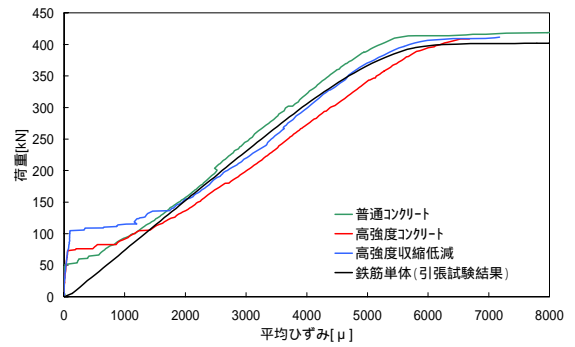


図-8 荷重-平均ひずみ関係

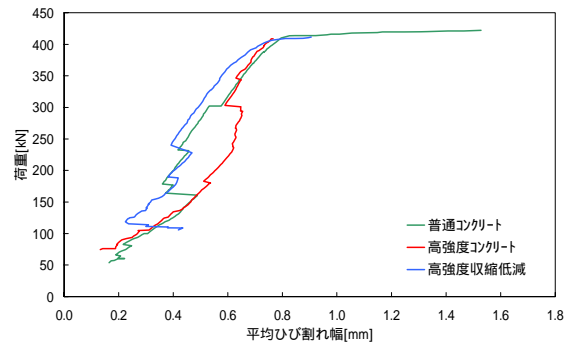


図-9 荷重-平均ひび割れ幅

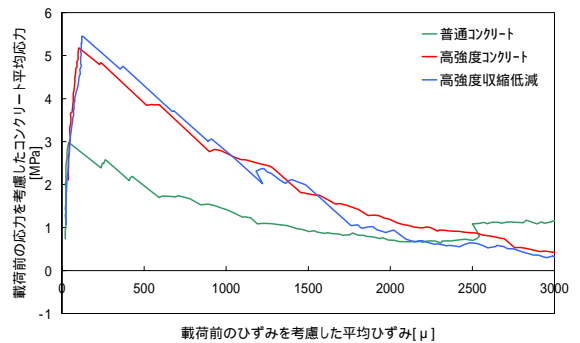


図-10 コンクリート応力-コンクリートひずみ関係

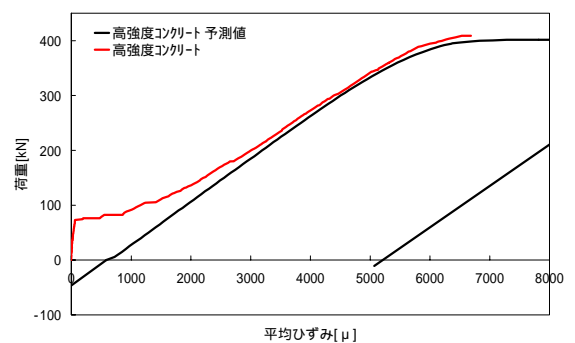


図-11 載荷前ひずみを考慮した平均ひずみの予測

り、収縮により載荷前に生ずる変形を考慮することで、収縮の程度によらない部材ひずみの検討が可能であった。

図-12 に示したのはひび割れ間隔-平均ひずみ関係である。式(7)による予測値もあわせて示す。

$$l_{cat} = k_2 \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \quad (7)$$

ここに、 $l_{cal}$ :ひび割れ間隔予測値, である。ひび割れ間隔は, 式(7)によりいずれも概ね妥当な評価が行えている。

ひび割れ幅はひび割れ間隔と鉄筋・コンクリート間のひずみ差(平均ひずみ)の積として考えることができる。ひび割れ幅の推定値はコンクリートの応力負担を無視した場合, コンクリートの収縮, 応力を考慮した場合の2ケースで検討した。

コンクリートの応力負担を無視した場合のひび割れ幅の予測値は式(8), コンクリートの収縮, 応力を考慮したひび割れ幅の予測値は式(9)により計算した。

$$w_{cal} = l_{exp} (P / A_s E_s) \quad (8)$$

$$w_{cal} = l_{exp} \varepsilon_{exp} \quad (9)$$

ここに、 $w_{cal}$ :ひび割れ幅の予測値,  $l_{exp}$ :ひび割れ間隔実測値,  $\varepsilon_{exp}$ :平均ひずみ実測値, である。

上記によるひび割れ幅の予測値と実測値の相関を図-13, 14 に示す。コンクリート応力を考慮しない場合, 1:1 の線から大きくずれが生じているが。コンクリート応力, 収縮を考慮して(実測値に基づいて)評価した場合, おおむね 1:1 の線に乗り, ほぼ妥当な評価行えていることがわかり, ひび割れ幅の推定はひずみを精度良く予測することが重要であり, ひび割れ幅の推定時も収縮に起因する載荷前の変形を考慮することで精度よい予測が行える。

#### 4. まとめ

RC 部材の曲げ疲労載荷, 曲げ持続載荷, 一軸引張試験を行い, 以下の知見を得た。

- ・ 疲労載荷に伴うひび割れ幅の増加は持続荷重を載荷した場合と比べ大きい。
- ・ 少量の短繊維補強材の混入による初期変位, ひび割れ幅の低減効果は疲労載荷によって徐々に消失する。
- ・ 疲労載荷に伴うひび割れ幅増加の要因としてひび割れ深さの進展が挙げられた。
- ・ 収縮量の著しいコンクリートを用いた RC 部材では, 収縮に起因する載荷前の応力, ひずみを考慮することで部材ひずみやコンクリートの Tension Stiffness の評価が可能である。
- ・ 収縮量の著しいコンクリートを用いた RC 部材のひび割れ幅は, 載荷前ひずみを考慮したひずみを用いることで, 精度良く予測可能である。

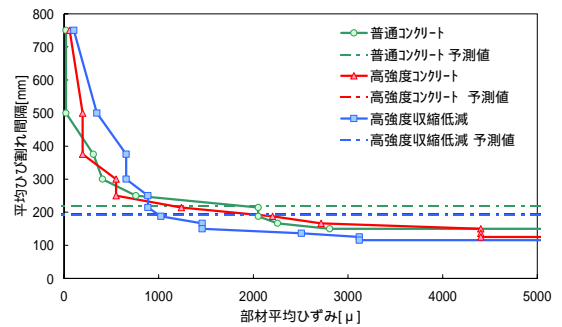


図-12 ひび割れ間隔-平均ひずみ

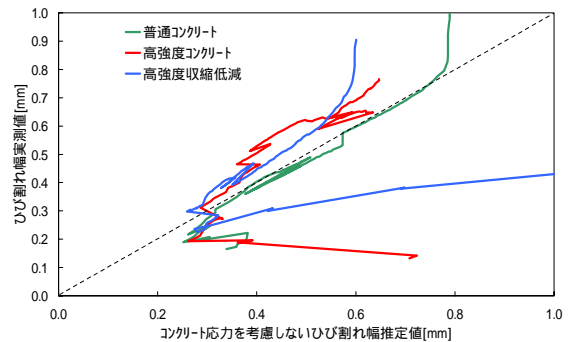


図-13 コンクリート応力を考慮しないひび割れ幅予測

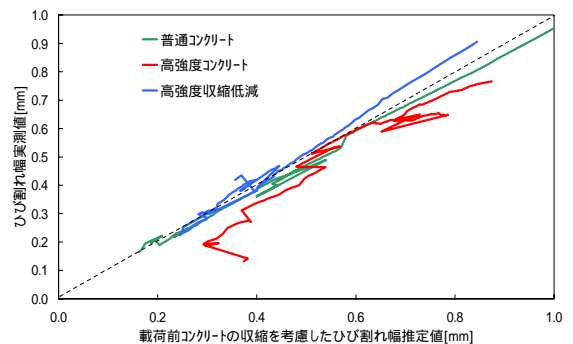


図-14 コンクリート応力を考慮したひび割れ幅予測

#### 参考文献

- 1) 土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書 [構造的な性能照査編], pp.100-102, 2002.03
- 2) 鈴木健一, 田中泰司, 下村匠：疲労荷重を受ける短繊維補強 RC 部材の曲げひび割れ幅に関する実験的検討, 第 62 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 5-315, pp.629-630, 2007.09