

# 平成22年度（財）港湾空港建設技術サービス センター研究開発助成報告書

助成番号：平成 21年11月21日付 第09—3号

研究開発項目：（番号）⑧公共施設の維持・管理に関するもの

## コンクリート構造物の施工時初期欠陥の対策技術の開発

（繊維補強がコンクリート強度に及ぼす影響）

平成23年4月30日

早稲田大学創造理工学部社会環境工学科

清宮 理

## 目 次

|                        |    |
|------------------------|----|
| 1. はじめに                | 1  |
| 2. 研究概要                | 1  |
| 2. 1 概要                | 1  |
| 2. 2 小型RCはり試験の内容       | 2  |
| 2. 3 載荷方法              | 4  |
| 2. 4 計測内容              | 5  |
| 2. 5 使用材料              | 6  |
| 3. 要素試験の内容および結果        | 11 |
| 3. 1 圧縮強度試験            | 11 |
| 3. 2 切り欠き曲げ試験          | 16 |
| 4. 曲げ載荷試験              | 23 |
| 4. 1 試験結果              | 23 |
| 4. 2 耐力および変形性能         | 29 |
| 4. 3 鉄筋のひずみ            | 31 |
| 4. 4 コンクリートひずみ         | 32 |
| 4. 5 ひび割れの発生状況およびひび割れ幅 | 33 |
| 5. せん断載荷試験             | 39 |
| 5. 1 耐力および変形性能         | 39 |
| 5. 2 鉄筋のひずみ            | 43 |
| 5. 3 ひび割れ              | 44 |
| 6. まとめ                 | 46 |

## 1. はじめに

本報告書は、「表層部補強および繊維補強コンクリートのひび割れ抑制効果および耐久性の検討」における研究の一環として実施した力学的性能試験の結果について報告するものである。

## 2. 研究概要

### 2. 1 概要

本研究は、繊維補強コンクリートのひび割れ抑制効果など具体的な補強効果の検討を目的として実施したものである。ここで補強に用いた繊維は、①ガラス繊維、②PP 繊維、③ガラスメッシュ、④FRP 格子筋の4種類とした。

試験は、表-2.1 に示すように、力学的性能の確認を目的とした要素試験および小型RCはりによる載荷試験の2種類を実施した。前者においては、圧縮強度試験、静弾性係数、割裂引張強度、切り欠き曲げ強度に対する試験を実施した。また、後者においては曲げ試験とせん断試験を実施した。

表-2.2 は、各繊維の名称および標準混入量を示したものである。小型RCはりによる載荷試験では、各試験体に標準量の繊維を混入した。

表-2.1 各試験の試験項目と目的

| 項 目           | 試験名         | 規格／方法                            | 内 容                      |
|---------------|-------------|----------------------------------|--------------------------|
| 要素試験          | 圧縮強度(静弾性係数) | JIS A 1108, 1113                 | 各種強度特性                   |
|               | 割裂引張強度試験    |                                  |                          |
|               | 切り欠き曲げ強度    | JCI-S-001-2003<br>JCI-S-002-2003 | 引張軟化曲線とひび割れ吸収エネルギーの計算    |
| 小型RCはりによる載荷試験 | 曲げ試験        | 180×10×20cm 小型 RC はりに対する単純支持2点載荷 | ひび割れ抵抗性、初期剛性、曲げ耐荷力への影響など |
|               | せん断試験       | 90×10×20cm 小型 RC はりに対する単純支持1点載荷  |                          |

表-2.2 繊維詳細

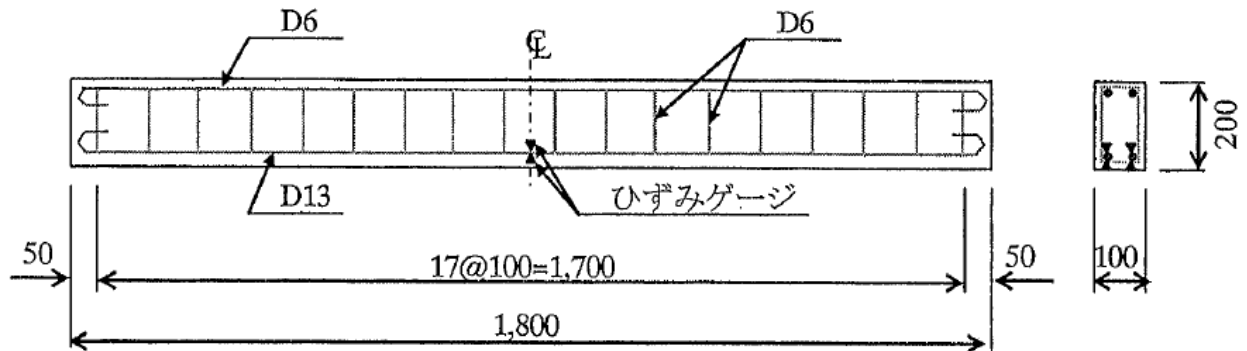
| 繊維種類    | 繊維名称       | 標準混入量                 |
|---------|------------|-----------------------|
| ガラス繊維   | アンチクラック HD | 0.60kg/m <sup>3</sup> |
| PP 繊維   | クラックバスター   | 0.91kg/m <sup>3</sup> |
| ガラスメッシュ | ハイパーネット 60 | 1 枚                   |
| FRP 格子筋 | FTG-C3     | 1 枚                   |

## 2. 2 小型RCはり試験の内容

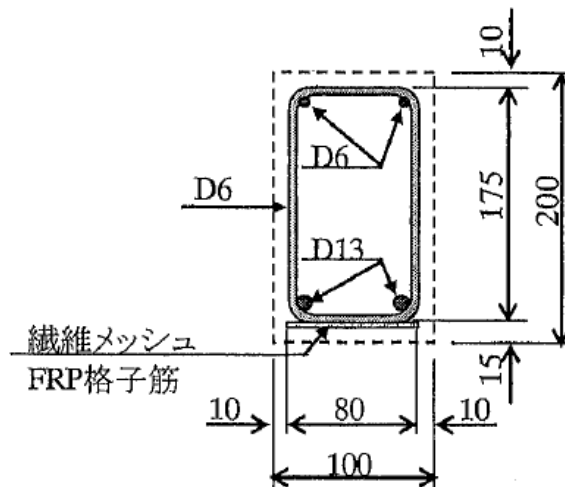
### (1) 曲げ載荷試験

曲げ載荷試験は、図-2.1 に示す全長 1800mm 幅 100mm、高さ 200mm のはりで行った。主鉄筋は、D13 が 2 本配置されており、有効高さは 172.5mm である。帯鉄筋は、D6 が 100mm 間隔で配置されている。

試験体は、表-2.3 に示すように、繊維を混入しない①無対策試験体、ガラス短繊維を標準量混入した②G 繊維試験体、PP 繊維を標準量混入した③PP 繊維試験体、ガラス繊維メッシュを 1 枚配置した④G メッシュ試験体、FRP 格子筋を配置した⑤FRP 試験体の 5 種類で各種類について実施した。試験体数は、当初試験の 2 体にひび割れ幅の測定のために追加した 1 体を加えた合計 3 体とした。なお、試験体番号 1、2 が当初試験、試験体番号 3 が追加試験でそれぞれ使用した試験体である。



(a) 全体図



(b) 断面図

図-2.1 曲げ載荷試験体

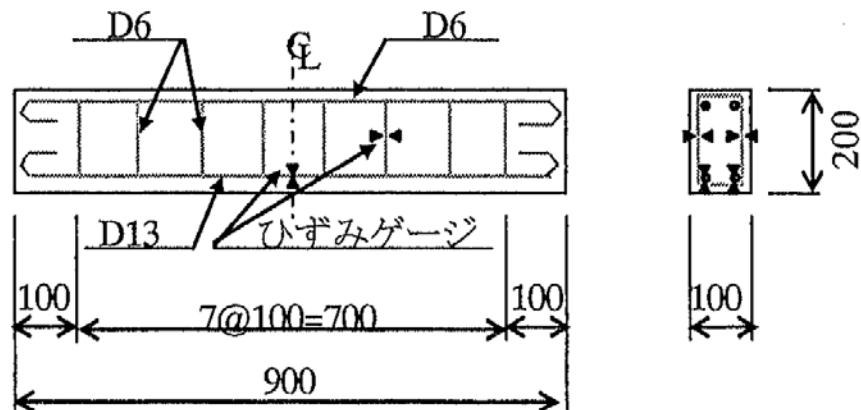
表-2.3 曲げ試験体概要

| 試験体名   | 補強仕様           | 試験体数 |      |
|--------|----------------|------|------|
|        |                | 当初試験 | 追加試験 |
| 無対策    | なし             | 2    | 1    |
| G 繊維   | ガラス繊維を標準量混入    | 2    | 1    |
| PP 繊維  | PP 繊維を標準量混入    | 2    | 1    |
| G メッシュ | ガラスメッシュを 1 枚配置 | 2    | 1    |
| FRP    | FRP 格子筋を配置     | 2    | 1    |

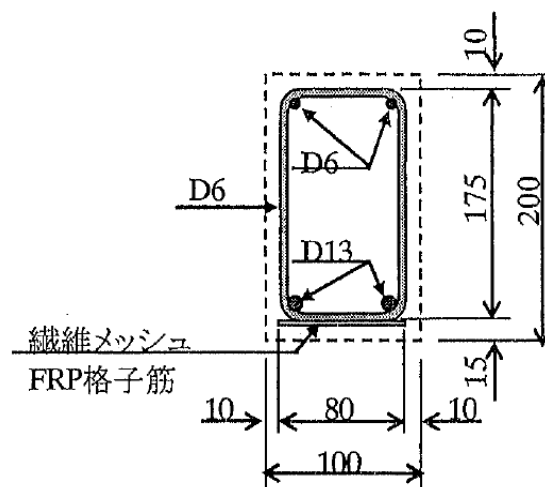
## (2) セン断載荷試験

せん断載荷試験は、図-2.2 に示す全長 900mm 幅 100mm、高さ 200mm の梁で行った。主鉄筋は、D13 が 2 本配置されており、有効高さは 172.5mm である。帯鉄筋は、D6 が 100mm 間隔で配置されている。

試験体は、表-2.4 に示すように、繊維を混入しない①無対策試験体、ガラス短繊維を標準量混入した②G 繊維試験体、PP 繊維を標準量混入した③PP 繊維試験体、ガラス繊維メッシュを 1 枚配置した④G メッシュ試験体、FRP 格子筋を配置した⑤FRP 試験体の 5 種類で各種類について 2 体ずつとした。



(a) 全体図



(b) 断面図

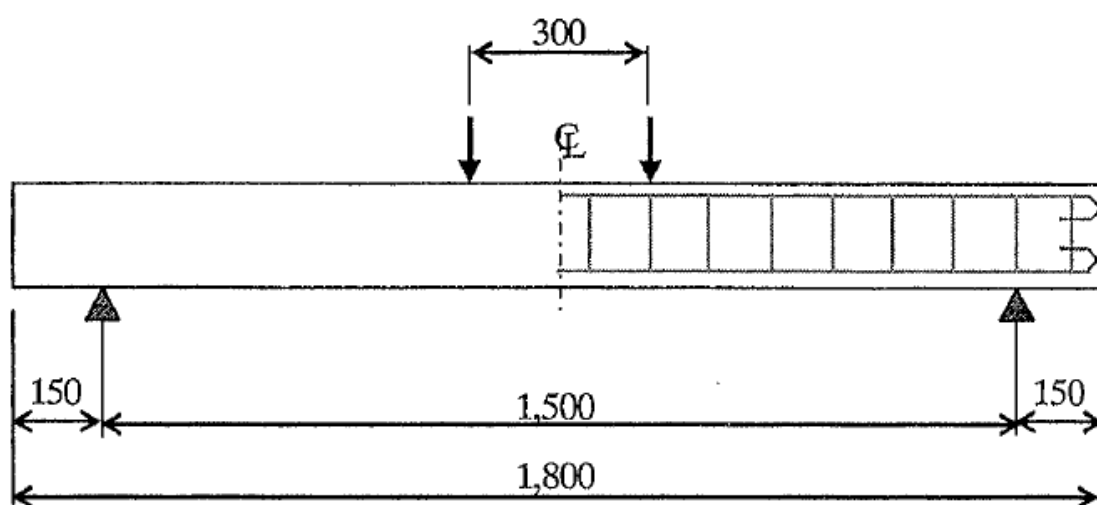
図-2.2 セン断載荷試験体

表-2.4 セン断載荷試験体の仕様

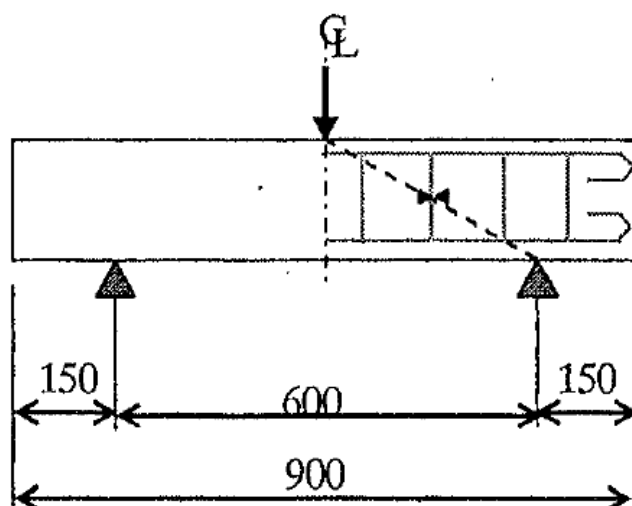
| 試験体名   | 補強仕様           | 試験体数 |
|--------|----------------|------|
| 無対策    | なし             | 2    |
| G 繊維   | ガラス繊維を標準量混入    | 2    |
| PP 繊維  | PP 繊維を標準量混入    | 2    |
| G メッシュ | ガラスメッシュを 1 枚配置 | 2    |
| FRP    | FRP 格子筋を配置     | 2    |

### 2. 3 荷重方法

図-2.3 は、小型 RC はりによる荷重試験の荷重方法を示したものである。曲げ荷重試験は、せん断スパン 600mm、等モーメント区間 300mm の 2 点荷重で実施した。また、せん断荷重試験はせん断スパン 300mm の 1 点荷重で実施した。



(a) 曲げ試験体



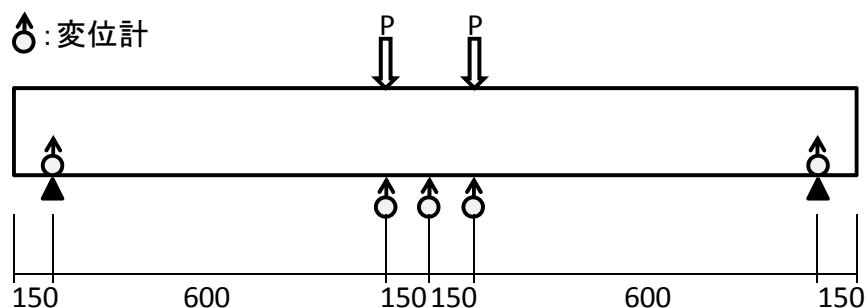
(b) せん断試験体

図-2.3 荷重方法

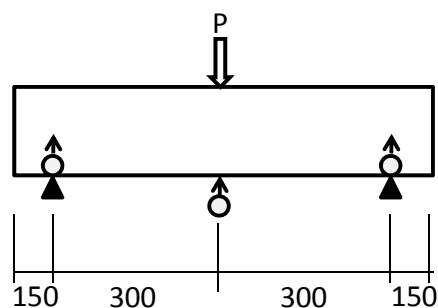
## 2. 4 計測内容

### (1) 変位計

図-2.4 は、変位計の設置位置を示したものである。曲げ試験は、スパン中央で 1 点、載荷点直下で 2 点、支点位置で 2 点の合計 5 点で変位を計測した。せん断試験は、スパン中央で 1 点、支点位置で 2 点の合計 3 点で変位を計測した。変位計は、梁側面に L 型の治具を取り付けて片面で測定した。



(1) 曲げ試験



(2) せん断試験体

図-2.4 変位計設置位置

### (2) ひび割れ幅

図-2.5 は、曲げ試験におけるひび割れ幅の計測位置を示したものである。計測には評点距離が 5cm の  $\pi$  ゲージを使用した。 $\pi$  ゲージは、載荷点直下を含む等曲げ区間全体を計測範囲とし、合計 10 点配置した。

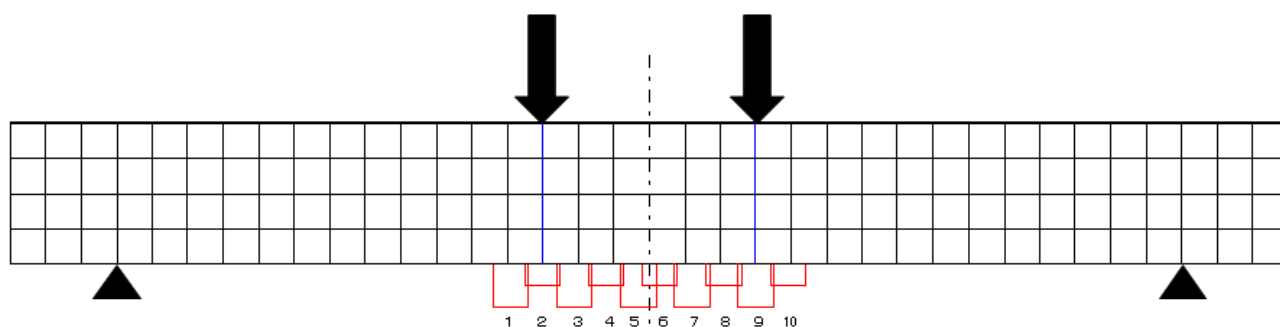


図-2.5  $\pi$  ゲージ設置位置

## 2. 5 使用材料

### (1) コンクリート

表-2.5 にコンクリートの配合を示す。試験体用コンクリートは、W/C=48.5%のレディーミクストコンクリートとし、高炉セメント B 種使用で、呼び強度を  $30\text{N/mm}^2$  とした。

表-2.6 は、材齢 3、7、28 日における管理供試体の圧縮強度を示したものである。G 繊維補強供試体の圧縮強度は、材齢 3 日から無対策を上回っており、材齢 28 日では標準混入量で 5%、混入量 1.5 倍で 10%、混入量 2.0 倍で 26%、無対策より大きな値を示している。PP 繊維補強供試体の圧縮強度は、材齢 3 日では無対策を下回るか同程度だが、材齢 28 日では標準混入量で 11%、混入量 1.5 倍で 12%、混入量 2.0 倍で 5%無対策より大きな値を示している。G メッシュ補強供試体の圧縮強度は、全ての材齢において無対策との比が 0.95~1.04 と無対策とほぼ同等の値を示している。このように、G 繊維および PP 繊維の混入により圧縮強度が増加した。

表-2.7 は、材齢 3、7、28 日のヤング係数を示したものである。G 繊維補強供試体のヤング係数の無対策の供試体との比は、材齢 28 日では標準混入量で 1.00、混入量 1.5 倍で 0.96、混入量 2.0 倍で 1.03 と、無対策とほぼ同等の値を示している。PP 繊維補強供試体のヤング係数の無対策の供試体との比は、材齢 28 日では標準混入量で 0.99、混入量 1.5 倍で 1.01、混入量 2.0 倍で 0.95 と、無対策とほぼ同等の値を示している。G メッシュ補強供試体のヤング係数の無対策の供試体との比は、材齢 28 日では 1 枚で 1.00、2 枚で 0.97 と、無対策とほぼ同等の値を示している。このように、G 繊維、PP 繊維および G メッシュによる補強のヤング係数に対する影響は見られない。

表-2.8 は、材齢 3、7、28 日における引張強度（割裂引張強度）を示したものである。G 繊維補強供試体の引張強度は、材齢 3 日から無対策を上回っており、材齢 28 日で比較した場合、標準混入量で 8%、混入量 1.5 倍で 17%、混入量 2.0 倍で 23%無対策供試体をそれぞれ上回った。すなわち、繊維の添加量が増えるに従って引張強度の増加が見られる。PP 繊維補強供試体の引張強度は、材齢 3 日から無対策を上回っており、材齢 28 日では標準混入量で 15%、混入量 1.5 倍で 9%、混入量 2.0 倍で 13%無対策供試体を上回っている。G メッシュ補強供試体の引張強度は、材齢 28 日では配置 1 枚で 5%、配置 2 枚で 11%無対策と比べて大きな値を示している。このように、G 繊維、PP 繊維および G メッシュの混入によって引張強度の増加が見られる。

管理供試体に対する強度試験結果から下記の点が確認された。

- ①G 繊維および PP 繊維の混入により圧縮強度が増加した。
- ②G 繊維、PP 繊維および G メッシュの混入によって引張強度が増加した。

表-2.5 コンクリートの配合

| 名称             | W/C<br>(%) | s/a<br>(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |      |      |
|----------------|------------|------------|--------------------------|-----|-----|------|------|
|                |            |            | W                        | C   | S   | G    | Ad   |
| 30-12-20<br>BB | 48.5       | 43.3       | 159                      | 328 | 784 | 1041 | 3.49 |

\*Ad:AE 減水剤(ボゾリス No. 70)

表－2.6 管理供試体圧縮強度

| 材齢  | No.     | 無対策  | 圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> ) |        |      |      |        |      |       |      |
|-----|---------|------|--------------------------|--------|------|------|--------|------|-------|------|
|     |         |      | G繊維                      |        |      | PP繊維 |        |      | Gメッシュ |      |
|     |         |      | 標準                       | 標準×1.5 | 標準×2 | 標準   | 標準×1.5 | 標準×2 | 1枚    | 2枚   |
| 3日  | 1       | 18.2 | 17.4                     | 18.0   | 20.3 | 16.8 | 17.4   | 15.9 | 16.8  | 17.5 |
|     | 2       | 17.3 | 17.8                     | 17.2   | 20.7 | 17.2 | 17.6   | 16.6 | 17.6  | 17.6 |
|     | 3       | 16.8 | 17.7                     | 17.7   | 20.7 | 17.0 | 17.7   | 16.5 | 17.4  | 18.3 |
|     | 平均      | 17.4 | 17.6                     | 17.6   | 20.6 | 17.0 | 17.6   | 16.3 | 17.3  | 17.8 |
|     | 無対策との比較 | 1.00 | 1.01                     | 1.01   | 1.18 | 0.98 | 1.01   | 0.94 | 0.99  | 1.02 |
| 7日  | 1       | 22.5 | 23.8                     | 24.8   | 31.2 | 25.8 | 26.5   | 25.2 | 22.4  | 23.2 |
|     | 2       | 22.0 | 24.7                     | 25.2   | 30.3 | 25.6 | 27.4   | 25.6 | 23.8  | 22.3 |
|     | 3       | 22.2 | 24.2                     | 26.5   | 31.2 | 25.8 | 26.1   | 25.2 | 23.1  | 23.1 |
|     | 平均      | 22.2 | 24.2                     | 25.5   | 30.9 | 25.7 | 26.7   | 25.3 | 23.1  | 22.9 |
|     | 無対策との比較 | 1.00 | 1.09                     | 1.15   | 1.39 | 1.16 | 1.20   | 1.14 | 1.04  | 1.03 |
| 28日 | 1       | 41.2 | 42.9                     | 45.2   | 51.6 | 45.2 | 45.6   | 42.6 | 41.1  | 39.4 |
|     | 2       | 39.4 | 42.5                     | 44.9   | 51.4 | 45.1 | 45.8   | 42.7 | 38.7  | 40.0 |
|     | 3       | 41.9 | 43.3                     | 44.1   | 51.1 | 46.2 | 45.9   | 43.4 | 40.3  | 36.6 |
|     | 平均      | 40.8 | 42.9                     | 44.7   | 51.4 | 45.5 | 45.8   | 42.9 | 40.0  | 38.7 |
|     | 無対策との比較 | 1.00 | 1.05                     | 1.10   | 1.26 | 1.11 | 1.12   | 1.05 | 0.98  | 0.95 |

表－2.7 管理供試体ヤング係数

| 材齢  | No.     | 無対策  | ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> ) |        |      |      |        |      |       |      |
|-----|---------|------|----------------------------|--------|------|------|--------|------|-------|------|
|     |         |      | G繊維                        |        |      | PP繊維 |        |      | Gメッシュ |      |
|     |         |      | 標準                         | 標準×1.5 | 標準×2 | 標準   | 標準×1.5 | 標準×2 | 1枚    | 2枚   |
| 3日  | 1       |      | 22.2                       | 21.3   | 23.0 | 21.7 | 18.0   | 20.2 | 23.0  | 20.2 |
|     | 2       | 20.7 | 22.7                       | 20.5   | 23.0 | 21.4 | 22.2   | 21.2 | 21.4  | 21.4 |
|     | 3       | 20.6 | 22.6                       | 21.0   | 23.2 | 22.5 | 21.4   | 20.4 | 21.6  | 22.7 |
|     | 平均      | 20.7 | 22.5                       | 20.9   | 23.1 | 21.9 | 20.5   | 20.6 | 22.0  | 21.4 |
|     | 無対策との比較 | 1.00 | 1.09                       | 1.01   | 1.12 | 1.06 | 0.99   | 1.00 | 1.07  | 1.04 |
| 7日  | 1       | 22.7 | 23.0                       | 22.0   | 24.8 | 23.9 | 23.7   | 23.0 | 22.3  | 23.1 |
|     | 2       | 21.8 | 23.9                       | 22.8   | 23.7 | 24.3 | 24.9   | 23.4 | 23.3  | 23.0 |
|     | 3       | 22.2 | 23.2                       | 22.6   | 25.0 | 23.9 | 24.0   | 23.4 | 23.2  | 22.9 |
|     | 平均      | 22.2 | 23.4                       | 22.5   | 24.5 | 24.0 | 24.2   | 23.3 | 22.9  | 23.0 |
|     | 無対策との比較 | 1.00 | 1.05                       | 1.01   | 1.10 | 1.08 | 1.09   | 1.05 | 1.03  | 1.03 |
| 28日 | 1       | 30.5 | 30.4                       | 28.9   | 31.3 | 30.5 | 30.8   | 28.3 | 30.4  | 30.6 |
|     | 2       | 30.3 | 29.3                       | 29.4   | 30.8 | 29.5 | 30.2   | 29.3 | 30.4  | 28.3 |
|     | 3       | 30.1 | 30.8                       | 28.6   | 31.1 | 30.0 | 30.5   | 28.8 | 30.2  | 29.4 |
|     | 平均      | 30.3 | 30.2                       | 29.0   | 31.1 | 30.0 | 30.5   | 28.8 | 30.3  | 29.4 |
|     | 無対策との比較 | 1.00 | 1.00                       | 0.96   | 1.03 | 0.99 | 1.01   | 0.95 | 1.00  | 0.97 |

表－2.8 管理供試体引張強度

|     |         |      | 引張強度(N/mm <sup>2</sup> ) |        |      |      |        |      |       |      |
|-----|---------|------|--------------------------|--------|------|------|--------|------|-------|------|
| 材齡  | No.     | 無対策  | G繊維                      |        |      | PP繊維 |        |      | Gメッシュ |      |
|     |         |      | 標準                       | 標準×1.5 | 標準×2 | 標準   | 標準×1.5 | 標準×2 | 1枚    | 2枚   |
| 3日  | 1       | 1.9  | 1.8                      | 1.9    | 2.1  | 1.5  | 1.7    | 1.9  | 1.7   | 1.8  |
|     | 2       | 1.5  | 1.7                      | 1.7    | 2.2  | 1.6  | 1.9    | 1.6  | 1.7   | 1.8  |
|     | 3       | 1.4  | 1.6                      | 1.8    | 1.9  | 1.8  | 2.0    | 1.9  | 1.8   | 2.0  |
|     | 平均      | 1.6  | 1.7                      | 1.8    | 2.1  | 1.6  | 1.9    | 1.8  | 1.7   | 1.9  |
|     | 無対策との比較 | 1.00 | 1.05                     | 1.11   | 1.28 | 1.01 | 1.16   | 1.11 | 1.06  | 1.16 |
| 7日  | 1       | 2.1  | 2.1                      | 2.2    | 2.5  | 2.2  | 2.4    | 2.1  | 2.1   | 2.3  |
|     | 2       | 2.1  | 2.3                      | 2.4    | 2.8  | 2.4  | 2.3    | 2.6  | 1.8   | 2.3  |
|     | 3       | 2.0  | 2.0                      | 2.1    | 2.9  | 2.5  | 2.0    | 2.5  | 2.1   | 2.2  |
|     | 平均      | 2.1  | 2.1                      | 2.2    | 2.7  | 2.4  | 2.2    | 2.4  | 2.0   | 2.3  |
|     | 無対策との比較 | 1.00 | 1.03                     | 1.07   | 1.32 | 1.15 | 1.08   | 1.16 | 0.95  | 1.09 |
| 28日 | 1       | 2.9  | 3.2                      | 3.5    | 4.1  | 3.4  | 3.2    | 3.8  | 3.1   | 3.1  |
|     | 2       | 3.1  | 3.1                      | 3.5    | 3.5  | 3.1  | 2.8    | 3.1  | 3.0   | 3.4  |
|     | 3       | 2.9  | 3.3                      | 3.5    | 3.3  | 3.8  | 3.6    | 3.1  | 3.3   | 3.4  |
|     | 平均      | 3.0  | 3.2                      | 3.5    | 3.6  | 3.4  | 3.2    | 3.4  | 3.1   | 3.3  |
|     | 無対策との比較 | 1.00 | 1.08                     | 1.17   | 1.23 | 1.15 | 1.09   | 1.13 | 1.05  | 1.11 |

## (2) 鉄筋

鉄筋は、SD345 の D6 および D13 の 2 種類を使用した。

表-2.9 に鉄筋の引張試験の結果を示す。D6 は、降伏強度が  $356\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数が  $199\text{ kN/mm}^2$ 、引張強さが  $546\text{ N/mm}^2$  であった。D13 は、降伏強度が  $379\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数が  $174\text{ kN/mm}^2$ 、引張強さが  $468\text{ N/mm}^2$  であった。

表-2.9 鉄筋の引張試験結果

| 項目                          | 呼び名 |     |
|-----------------------------|-----|-----|
|                             | D6  | D13 |
| 降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )   | 356 | 379 |
| ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> ) | 199 | 174 |
| 引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )   | 546 | 468 |

### (3) 繊維

表-2.10～2.13 に本研究で使用したガラス短繊維、PP 繊維、ガラスメッシュおよび FRP 格子筋の物性を示す。

表-2.10 ガラス短繊維の物性

|        |            |
|--------|------------|
| 繊維径    | 14 $\mu$ m |
| 弾性係数   | 72000MPa   |
| 引張強度   | 1700MPa    |
| 繊維数/kg | 2 億本       |

表-2.11 PP 繊維の物性

|    |             |
|----|-------------|
| 材質 | 100%ポリプロピレン |
| 比重 | 0.91        |

表-2.12 ガラスメッシュの物性

|      |                           |
|------|---------------------------|
| 重量   | 330g/m <sup>2</sup>       |
| 引張強さ | 15000N/mm <sup>2</sup> 以上 |
| 幅    | 21cm                      |

表-2.13 FRP 格子筋の物性

|       |                         |
|-------|-------------------------|
| 引張強度  | 1400N/mm <sup>2</sup>   |
| 引張弾性率 | 100000N/mm <sup>2</sup> |

### 3. 要素試験の内容および結果

#### 3. 1 圧縮強度試験

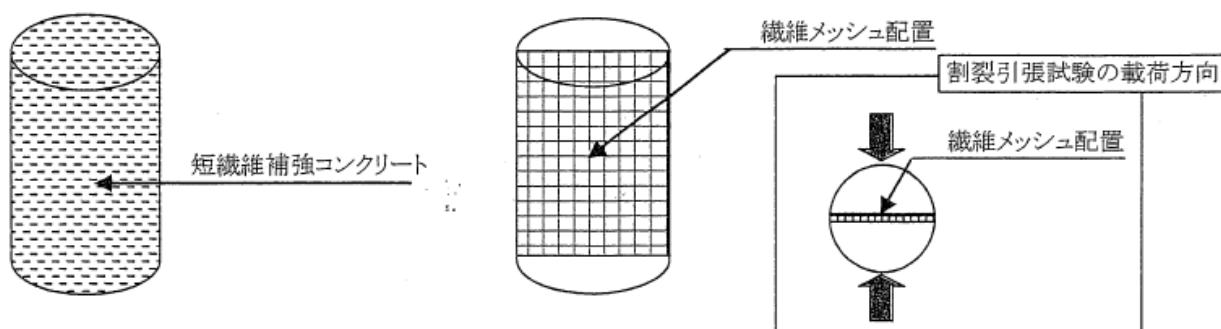
##### (1) 内容

圧縮強度試験は、JIS A 1108, 1113 に基づいて円柱供試体を用いて実施した。試験体の概要を表－3.1 に示す。圧縮試験は、曲げ試験（当初、追加）、せん断試験の各載荷試験実施日の前後 1 日以内に実施した。なお、圧縮強度試験時には、あわせて供試体側面に貼付したひずみゲージによりコンクリートのひずみを測定した。

表－3.1 圧縮強度試験体

| 試験体名   | 補強      | 本数             |                |       |
|--------|---------|----------------|----------------|-------|
|        |         | 曲げ試験<br>(当初試験) | 曲げ試験<br>(追加試験) | せん断試験 |
| 無対策    | なし      | 3              | 3              | 3     |
| G 繊維   | ガラス繊維   | 3              | 3              | 3     |
| PP 繊維  | PP 繊維   | 3              | 3              | 3     |
| G メッシュ | ガラスメッシュ | 3              | 3              | 3     |
| FRP    | FRP 格子筋 | 3              | 3              | 3     |

図－3.1 は、円柱供試体の繊維補強方法を示したものである。短繊維補強コンクリートの供試体は、コンクリートに短繊維を標準量混入して作成した。繊維メッシュ補強の供試体は、供試体の中央にメッシュを 1 枚配置して作成した。



図－3.1 円柱供試体の補強方法

## (2) 試験結果

図-3.2 にコンクリート供試体の応力-ひずみ曲線を示す。応力-ひずみ曲線は、繊維補強の種類に関わらず、ひずみが  $1600 \times 10^{-6}$  程度まで直線的に応力が上昇した後徐々に勾配が小さくなり、 $2200 \times 10^{-6}$  程度で最大応力に達して破壊に至っている。

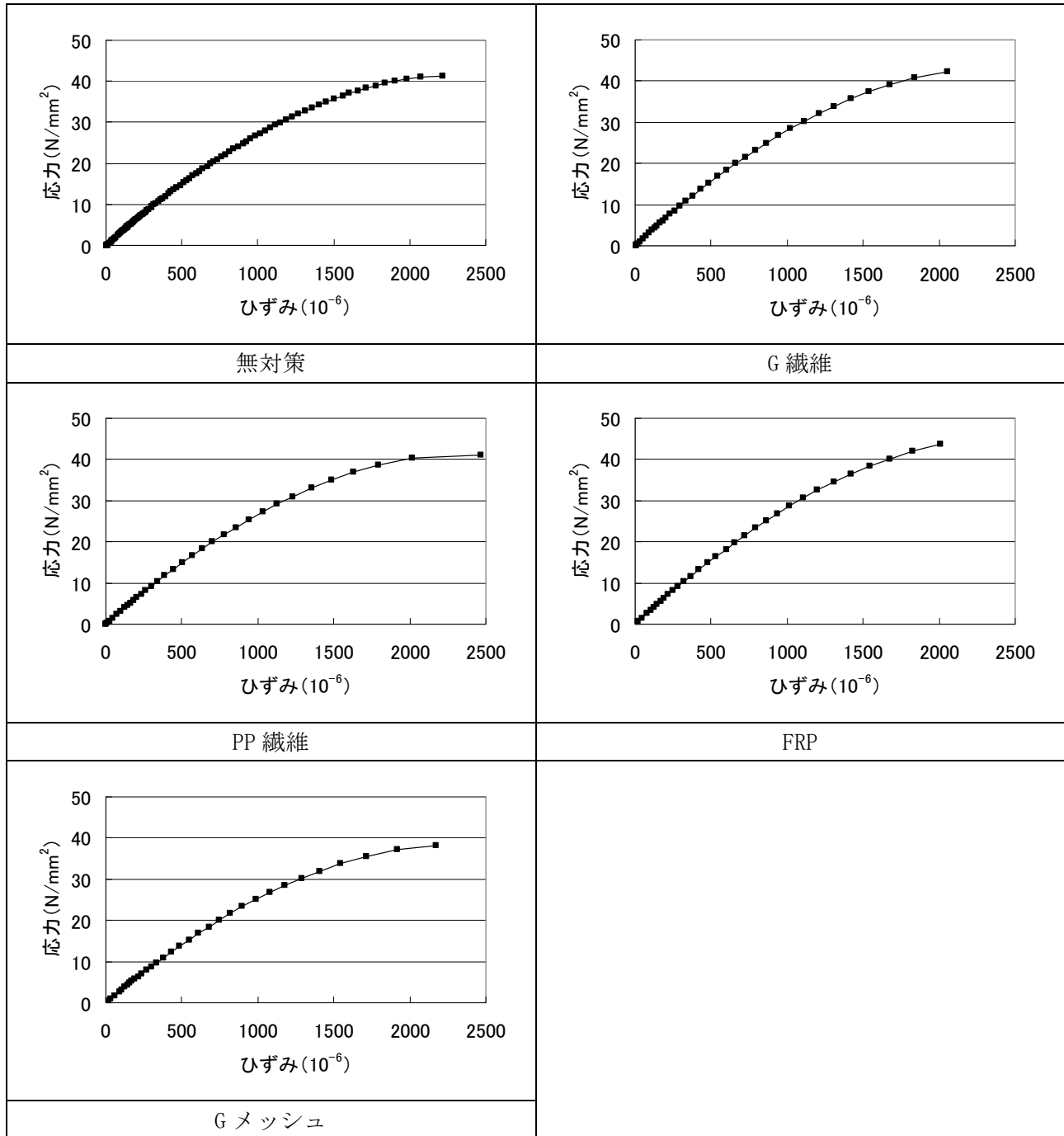


図-3.2 コンクリート供試体の応力-ひずみ曲線

表-3.2 は、圧縮強度の結果を示したものである。曲げ試験の当初試験用の供試体の結果をみると、圧縮強度は、無対策で  $41.7 \text{ N/mm}^2$ 、G 繊維で  $43.9 \text{ N/mm}^2$ 、PP 繊維で  $43.1 \text{ N/mm}^2$ 、FRP で  $43.5 \text{ N/mm}^2$ 、G メッシュで  $39.7 \text{ N/mm}^2$  と、繊維補強した供試体と無対策の供試体との強度差は  $\pm 5\%$  以内となっている。

表-3.3 は、ヤング係数を示したものである。曲げ試験の当初試験用の供試体の結果をみると、ヤング係数は、無対策で  $30.8 \text{ kN/mm}^2$ 、G 繊維で  $30.4 \text{ kN/mm}^2$ 、PP 繊維で  $28.4 \text{ kN/mm}^2$ 、FRP で  $30.6 \text{ kN/mm}^2$ 、G メッシュ  $29.3 \text{ kN/mm}^2$  と、無対策の場合が最も大きな値を示した。

表-3.4 は、破壊時のひずみを示したものである。曲げ試験の当初試験用の供試体の結果をみると、破壊時のひずみは、無対策で  $2056 \times 10^{-6}$ 、G 繊維で  $2205 \times 10^{-6}$ 、PP 繊維で  $2165 \times 10^{-6}$ 、FRP で  $2066 \times 10^{-6}$ 、G メッシュで  $2532 \times 10^{-6}$  と、G メッシュが無対策の場合と比べて  $23\%$  大きな値を示した。

表-3.2 圧縮強度

|               |        | 圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> ) |      |      |      | 無対策との比 |
|---------------|--------|--------------------------|------|------|------|--------|
|               |        | 1                        | 2    | 3    | 平均   |        |
| 曲げ試験<br>—当初試験 | 無対策    | 41.2                     | 41.3 | 42.5 | 41.7 | 1.00   |
|               | G 繊維   | 45.1                     | 45.3 | 41.4 | 43.9 | 1.05   |
|               | PP 繊維  | 41.3                     | 44.0 | 43.9 | 43.1 | 1.03   |
|               | FRP    | 44.3                     | 44.1 | 42.0 | 43.5 | 1.04   |
|               | G メッシュ | 38.3                     | 41.3 | 39.3 | 39.7 | 0.95   |
| 曲げ試験<br>—追加試験 | 無対策    | 34.9                     | 33.9 | 33.6 | 34.1 | 1.00   |
|               | G 繊維   | 32.0                     | 32.3 | 33.0 | 32.4 | 0.95   |
|               | PP 繊維  | 32.3                     | 33.6 | 32.6 | 32.8 | 0.96   |
|               | FRP    | 33.3                     | 32.9 | 33.2 | 33.1 | 0.97   |
|               | G メッシュ | 32.7                     | 31.5 | 31.8 | 32.0 | 0.94   |
| せん断試験         | 無対策    | 43.6                     | 42.5 | 42.6 | 42.9 | 1.00   |
|               | G 繊維   | 44.1                     | 43.6 | 44.8 | 44.1 | 1.03   |
|               | PP 繊維  | 43.6                     | 43.1 | 44.7 | 43.8 | 1.02   |
|               | FRP    | 40.7                     | 39.7 | 40.9 | 40.4 | 0.94   |
|               | G メッシュ | 43.1                     | 43.4 | 42.6 | 43.1 | 1.00   |

表-3.3 ヤング係数

|               |        | ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> ) |      |      |      | 無対策との比 |
|---------------|--------|----------------------------|------|------|------|--------|
|               |        | 1                          | 2    | 3    | 平均   |        |
| 曲げ試験<br>—当初試験 | 無対策    | 30.3                       | 30.2 | 31.7 | 30.8 | 1.00   |
|               | G 繊維   | 31.3                       | 28.4 | 31.5 | 30.4 | 0.99   |
|               | PP 繊維  | 29.4                       | 28.7 | 27.1 | 28.4 | 0.92   |
|               | FRP    | 31.0                       | 32.5 | 28.3 | 30.6 | 0.99   |
|               | G メッシュ | 28.5                       | 28.5 | 30.9 | 29.3 | 0.95   |
| 曲げ試験<br>—追加試験 | 無対策    | 28.0                       | 28.2 | 27.3 | 27.8 | 1.00   |
|               | G 繊維   | 27.6                       | 25.7 | 28.0 | 27.1 | 0.97   |
|               | PP 繊維  | 29.0                       | 26.9 | 27.3 | 27.7 | 1.00   |
|               | FRP    | 29.5                       | 25.6 | 27.5 | 27.6 | 0.99   |
|               | G メッシュ | 27.0                       | 24.6 | 24.6 | 25.4 | 0.91   |
| せん断試験         | 無対策    | 30.6                       | 30.4 | 30.9 | 30.6 | 1.00   |
|               | G 繊維   | 31.9                       | —    | 31.8 | 31.8 | 1.04   |
|               | PP 繊維  | 27.7                       | 29.9 | 28.4 | 28.7 | 0.94   |
|               | FRP    | 29.7                       | 31.9 | 28.5 | 30.0 | 0.98   |
|               | G メッシュ | 29.5                       | 29.6 | 29.2 | 29.4 | 0.96   |

表－3.4 破壊ひずみ

|               |        | 破壊ひずみ( $10^{-6}$ ) |      |      |      | 無対策との比 |
|---------------|--------|--------------------|------|------|------|--------|
|               |        | 1                  | 2    | 3    | 平均   |        |
| 曲げ試験<br>－当初試験 | 無対策    | 2216               | 2072 | 1882 | 2056 | 1.00   |
|               | G 繊維   | 2008               | 2206 | 2400 | 2205 | 1.07   |
|               | PP 繊維  | 2176               | 2222 | 2097 | 2165 | 1.05   |
|               | FRP    | 2055               | 2225 | 1917 | 2066 | 1.00   |
|               | G メッシュ | 2468               | 2338 | 2791 | 2532 | 1.23   |
| 曲げ試験<br>－追加試験 | 無対策    | 2108               | 1929 | 2242 | 2093 | 1.00   |
|               | G 繊維   | 2022               | 2051 | 2405 | 2159 | 1.03   |
|               | PP 繊維  | 1558               | 2344 | 1762 | 1888 | 0.90   |
|               | FRP    | 2072               | 1968 | 2055 | 2031 | 0.97   |
|               | G メッシュ | 1957               | 2034 | 1823 | 1938 | 0.93   |
| せん断試験         | 無対策    | 2209               | 2174 | 1760 | 2047 | 1.00   |
|               | G 繊維   | 1908               | －    | 1880 | 1894 | 0.92   |
|               | PP 繊維  | 2524               | 2687 | 2360 | 2523 | 1.23   |
|               | FRP    | 2316               | 2303 | 2400 | 2340 | 1.14   |
|               | G メッシュ | 2044               | 2020 | 2718 | 2261 | 1.10   |

### 3. 2 切り欠き曲げ試験

#### (1) 試験内容

繊維混入が破壊エネルギーにおよぼす影響および引張軟化曲線を調べるため、切り欠き曲げ試験を実施した。試験は、JCI-S-001-2003 および JCI-S-002-2003 に基づいて実施した。ここで対象とした繊維は、G 繊維、PP 繊維、G メッシュの 3 種類とした。

表-3.5 は、各繊維について試験体数を示したものである。試験体は、無対策で 6 体、G 繊維で繊維混入量 1.0 倍について 6 体、1.5 倍および 2.0 倍について各 3 体ずつ、PP 繊維で繊維混入量 1.0 倍について 6 体、1.5 倍および 2.0 倍について各 3 体ずつ、G メッシュで繊維メッシュ 1 枚について 6 体、2 枚について 3 体ずつとした。なお、切り欠き曲げ試験は当初試験および追加試験で実施した。各試験における試験体番号 1～3 は当初試験、試験体番号 4～6 は追加試験にそれぞれ供した試験体であることを示す。

表-3.5 切り欠き曲げ試験の試験体

| 試験体名        | 個数 |
|-------------|----|
| 無対策         | 6  |
| G 繊維 1.0 倍  | 6  |
| G 繊維 1.5 倍  | 3  |
| G 繊維 2.0 倍  | 3  |
| PP 繊維 1.0 倍 | 6  |
| PP 繊維 1.5 倍 | 3  |
| PP 繊維 2.0 倍 | 3  |
| G メッシュ 1 枚  | 6  |
| G メッシュ 2 枚  | 3  |

## (2) 試験体

図-3.3 は、試験体の形状寸法を示したものである。試験体は、断面が  $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 、長さが  $400\text{mm}$  の角柱とし、スパン中央底部に高さ  $300\text{mm}$  のアクリル板を設置して切り欠きを設けた。

図-3.4 は、繊維メッシュの配置方法を示したものである。G メッシュ試験体は、底部から  $400\text{mm}$  の位置にガラス繊維メッシュを配置して補強を行った。

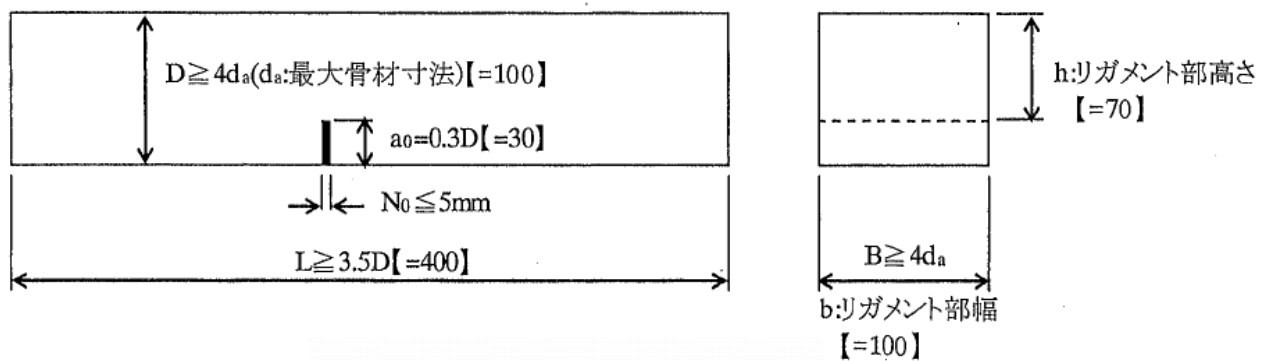


図-3.3 試験体概要

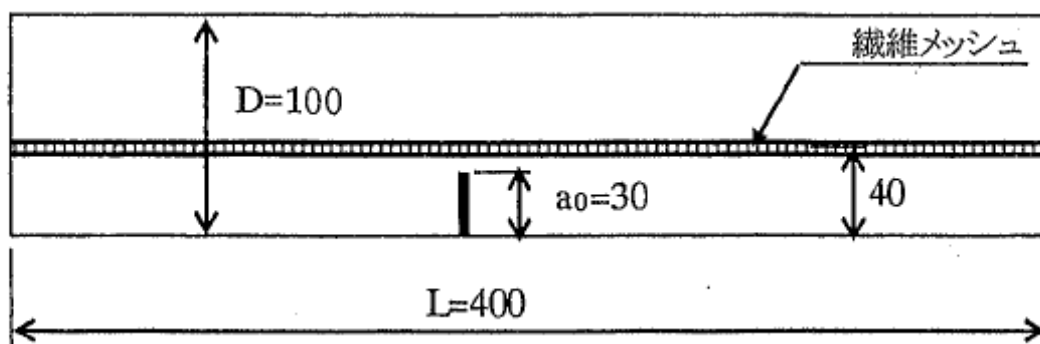
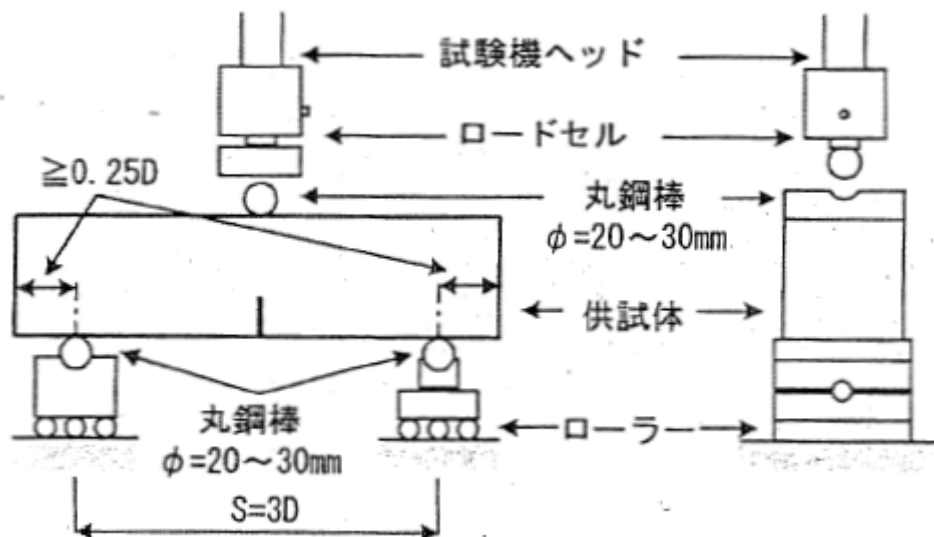


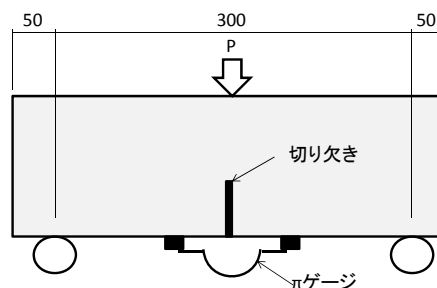
図-3.4 繊維メッシュ補強方法

### (3) 試験方法

図－3.5 は、切り欠き曲げ試験の載荷方法を示したものである。載荷は、支点間距離を 300mm とし、切り欠き部分を下にして、支点間中央の載荷位置に丸棒鋼を設置して実施した。載荷速度はひび割れ肩口開口変位（CMOD）速度が 0.1mm/min となるようにし、載荷速度はストップウォッチにより管理した。また、CMOD の計測は、図－3.6 に示すように切り欠き下部に  $\pi$  ゲージを設置して行った。



図－3.5 載荷方法



図－3.6  $\pi$  ゲージ設置状況

#### (4) 試験結果

図-3.7～3.14 は、各試験体種類につきそれぞれ1体ずつ、荷重-CMOD 曲線および引張軟化曲線を示したものである。荷重-CMOD 曲線をみると、荷重載荷後 5～8kN でひび割れが発生した後荷重が低下する現象が見られる。ひび割れ発生荷重については、繊維補強の有無および種類との関連性は見られない。ひび割れ発生後の荷重は、無対策、G 繊維および PP 繊維では CMOD が 1mm 程度で 1kN 以下となり、徐々に低下している。それに対して、G メッシュの場合の荷重は、ひび割れ発生後 CMOD が 0.5mm 程度から再び上昇する。そして、G メッシュ 1 枚では 5～6kN、G メッシュ 2 枚では 10kN 以上までそれぞれ数値が上昇した後、徐々に低下した。

また、荷重-CMOD 曲線から算出した引張軟化曲線は、繊維の有無および種類によらず、結合応力  $F_t$  が 4～8MPa から徐々に低下する曲線を示している。

表-3.6 は、切り欠き曲げ試験から得られた破壊エネルギーの計算結果を示したものである。無対策試験体の破壊エネルギーの平均値は、0.244N/mm となっている。

G 繊維試験体は、繊維量が 1.0 倍で 0.252N/mm、1.5 倍で 0.254N/mm と、無対策試験体とほぼ同等の値を示している。また、繊維量 2.0 倍では破壊エネルギーが 0.604N/mm および 0.242N/mm との平均値で 0.423 N/mm となっている。

PP 繊維補強試験体は、繊維量が 1.0 倍で 0.343N/mm、1.5 倍で 0.383 N/mm、2.0 倍で 0.390 N/mm となった。すなわち、破壊エネルギーは、繊維量が 1.0 倍の段階で無対策試験体より大きな値を示し、繊維量が増加にともなって大きくなる傾向を示す。ただし、破壊エネルギーの増加割合は繊維量の増加の割合に比べると小さい。

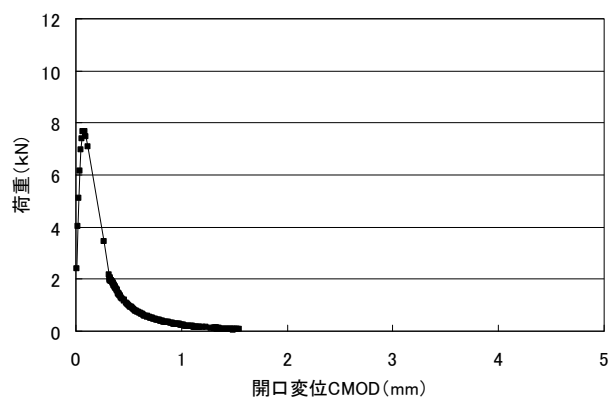
ガラスメッシュ試験体は、メッシュが 1 枚で 1.657 N/mm と無対策試験体の 7.13 倍、2 枚では 3.222 N/mm と、13.6 倍の大きな値を示した。

以上の結果をまとめると、繊維補強の破壊エネルギーの増加に対する効果は以下ようになる。

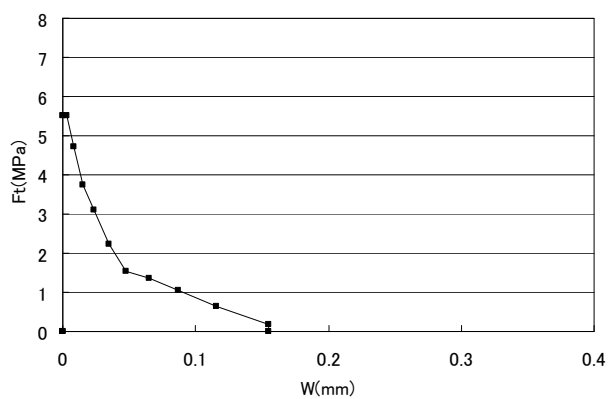
- ①G 繊維の場合は破壊エネルギーの増加に対する効果が見られない。
- ②PP 繊維の場合は無対策の場合に比べて 40%程度破壊エネルギーが増加する。
- ③ガラスメッシュの場合は 7 倍以上の大きな破壊エネルギーの増加が見られる。

表-3.6 破壊エネルギー

| No.         | 破壊エネルギー(N/mm) |       |       |       |       |       | 平均    |
|-------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             | 1             | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |       |
| 無対策         | —             | 0.236 | —     | 0.236 | 0.253 | 0.251 | 0.244 |
| G 繊維 1.0 倍  | 0.265         | —     | —     | 0.232 | 0.256 | 0.256 | 0.252 |
| G 繊維 1.5 倍  | —             | 0.270 | 0.238 | —     | —     | —     | 0.254 |
| G 繊維 2.0 倍  | 0.604         | —     | 0.242 | —     | —     | —     | 0.423 |
| PP 繊維 1.0 倍 | 0.343         | 0.273 | 0.326 | 0.449 | 0.328 | —     | 0.343 |
| PP 繊維 1.5 倍 | 0.454         | 0.386 | 0.307 | —     | —     | —     | 0.383 |
| PP 繊維 2.0 倍 | 0.297         | 0.423 | 0.451 | —     | —     | —     | 0.390 |
| G メッシュ 1 枚  | 1.563         | 1.574 | 1.910 | 1.686 | 1.508 | 1.698 | 1.657 |
| G メッシュ 2 枚  | 2.899         | 3.384 | 3.384 | —     | —     | —     | 3.222 |

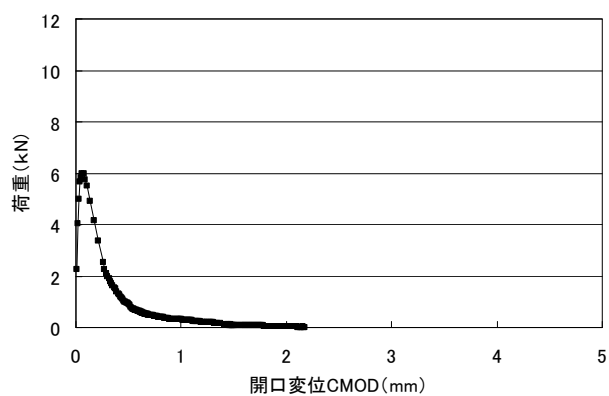


(a) 荷重-CMOD 曲線

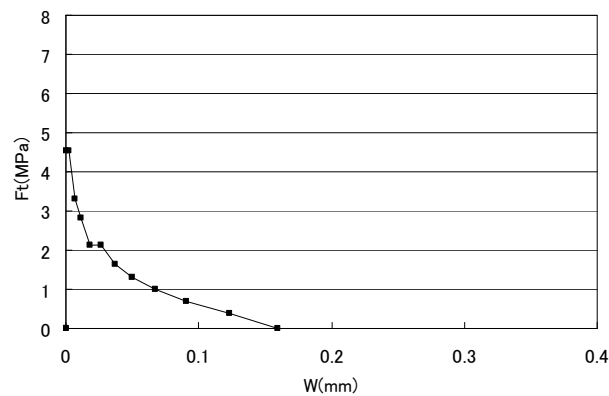


(b) 引張軟化曲線

図-3.7 無対策-5 試験結果

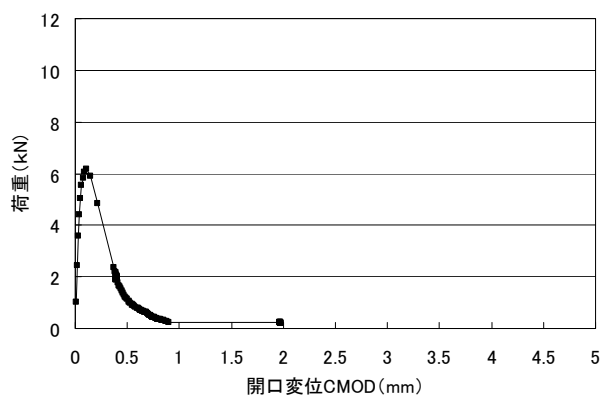


(a) 荷重-CMOD 曲線

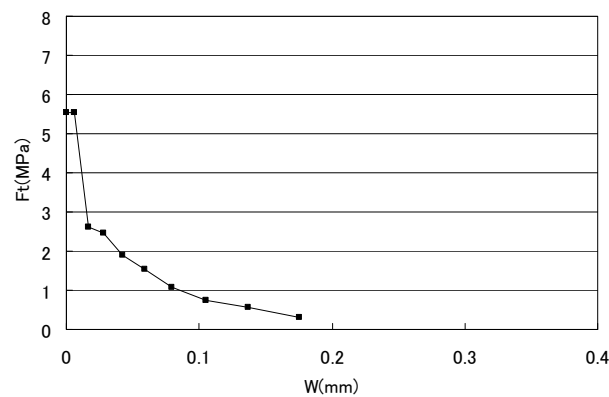


(b) 引張軟化曲線

図-3.8 ガラス繊維 1.0 倍-5 試験結果

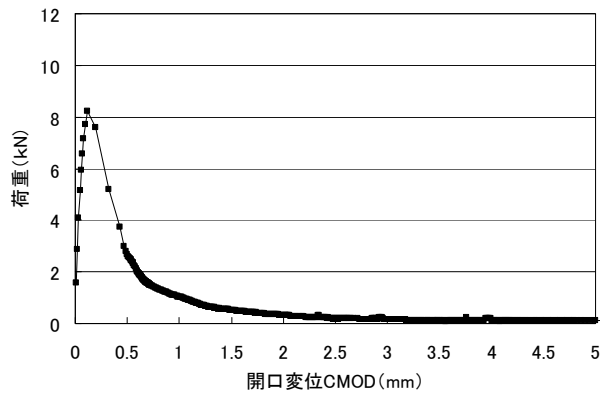


(a) 荷重-CMOD 曲線

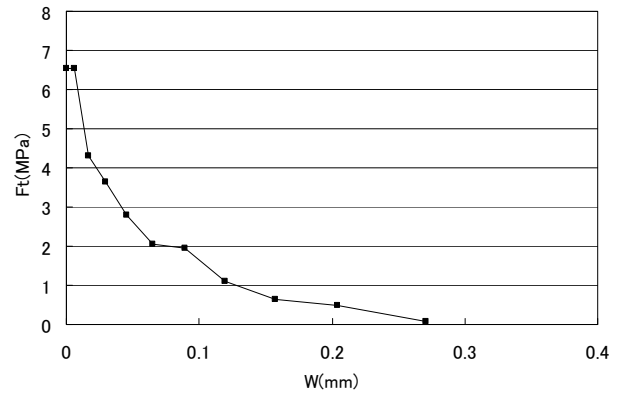


(b) 引張軟化曲線

図-3.9 ガラス繊維 1.5 倍-2 試験結果

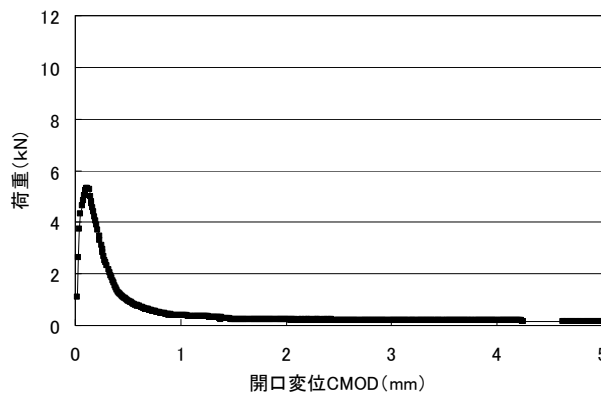


(a) 荷重-CMOD 曲線

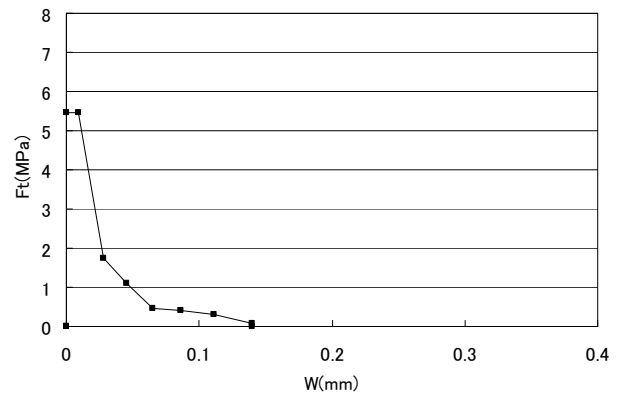


(b) 引張軟化曲線

図-3.9 ガラス繊維 2.0 倍-1 試験結果

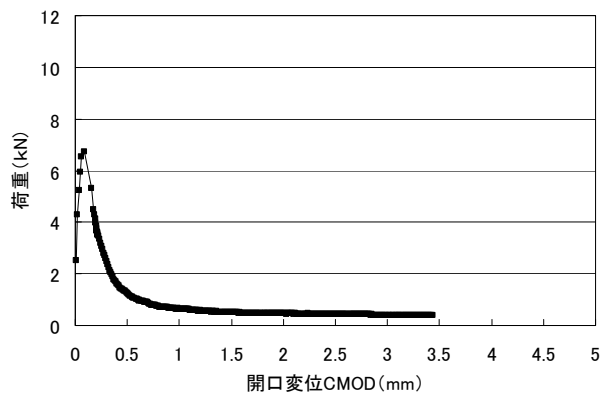


(a) 荷重-CMOD 曲線

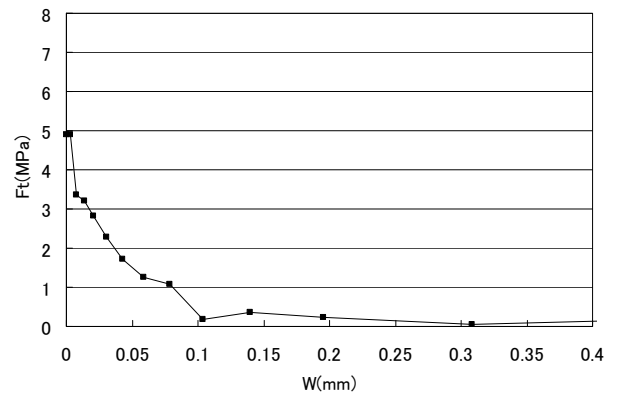


(b) 引張軟化曲線

図-3.10 PP 繊維 1.0 倍-5 試験結果

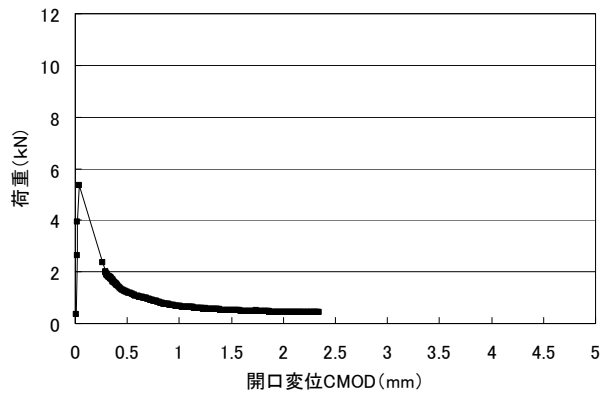


(a) 荷重-CMOD 曲線

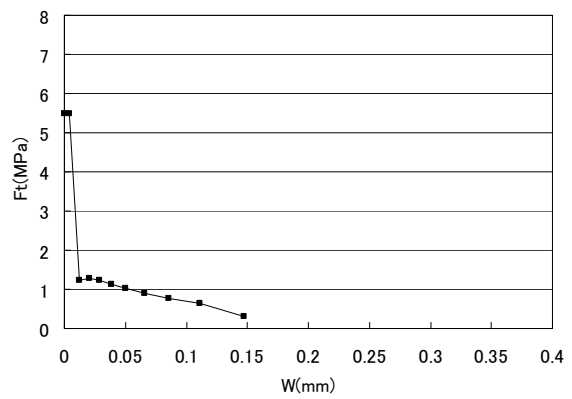


(b) 引張軟化曲線

図-3.11 PP 繊維 1.5 倍-2 試験結果

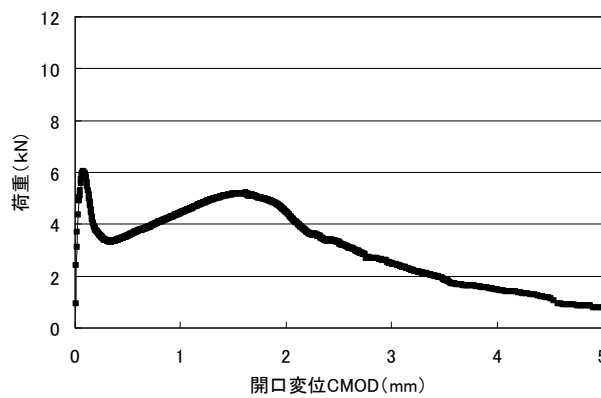


(a) 荷重-CMOD 曲線

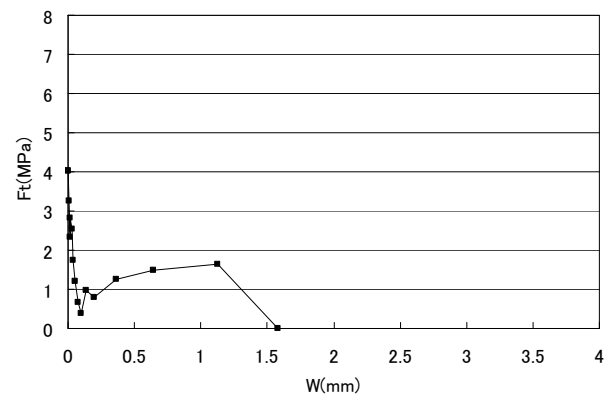


(b) 引張軟化曲線

図-3.12 PP 繊維 2.0 倍-2 試験結果

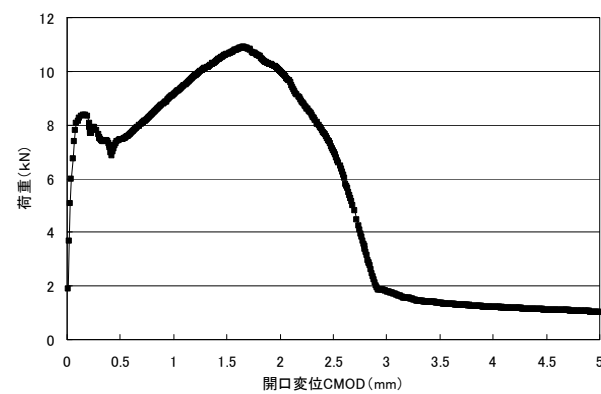


(a) 荷重-CMOD 曲線

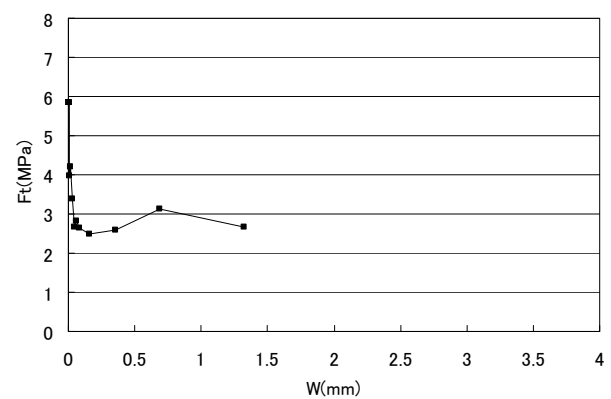


(b) 引張軟化曲線

図-3.13 ガラスメッシュ 1 枚-4 試験結果



(a) 荷重-CMOD 曲線



(b) 引張軟化曲線

図-3.14 ガラスメッシュ 2 枚-3 試験結果

#### 4. 曲げ載荷試験

##### 4. 1 試験結果

表－4.1 は、RC 小型梁に対する曲げ載荷試験の試験結果を示したものである。ここで、終局変位は、荷重が最大荷重から 10%低下したときの変位とした。なお、試験体番号 1 および 2 は、終局変位が明確でなかったため、終局変位の考察は試験番号 3 のみを対象とした。ここで、曲げひび割れ発生荷重、鉄筋降伏荷重および終局荷重は、次頁以降の算定方法により算定した。

表－4.1 試験結果

|          | ひび割れ発生荷重<br>(kN) |      | 降伏荷重<br>(kN) |      | 最大荷重<br>(kN) |      | 降伏変位<br>$\delta_y$<br>(mm) | 終局変位<br>$\delta_u$<br>(mm) | じん性率<br>$\delta_u / \delta_y$ |
|----------|------------------|------|--------------|------|--------------|------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|
|          | 実測               | 計算   | 実測           | 計算   | 実測           | 計算   |                            |                            |                               |
| 無対策－1    | 18.0             | 15.4 | 54.2         | 49.2 | 63.2         | 59.3 | 4.2                        | —                          | —                             |
| 無対策－2    | 18.0             | 15.4 | 54.0         | 49.2 | 59.0         | 59.3 | 4.7                        | —                          | —                             |
| 無対策－3    | 15.8             | 14.4 | 55.5         | 49.1 | 58.7         | 58.8 | 4.5                        | 25.1                       | 5.56                          |
| G 繊維－1   | 15.0             | 15.3 | 54.6         | 49.1 | 62.3         | 60.6 | 4.1                        | —                          | —                             |
| G 繊維－2   | 13.5             | 15.3 | 52.9         | 49.1 | 60.5         | 60.6 | 4.2                        | —                          | —                             |
| G 繊維－3   | 14.6             | 14.0 | 54.5         | 49.0 | 59.0         | 62.1 | 5.1                        | 35.3                       | 6.86                          |
| PP 繊維－1  | 17.0             | 15.6 | 53.8         | 49.2 | 58.9         | 60.7 | 4.9                        | —                          | —                             |
| PP 繊維－2  | 18.0             | 15.6 | 52.9         | 49.2 | 58.7         | 60.7 | 5.2                        | —                          | —                             |
| PP 繊維－3  | 14.8             | 14.1 | 54.8         | 49.1 | 59.6         | 62.0 | 4.9                        | 50.4                       | 10.24                         |
| G メッシュ－1 | 18.0             | 14.6 | 53.4         | 49.1 | 59.0         | 61.2 | 4.6                        | —                          | —                             |
| G メッシュ－2 | 17.0             | 14.6 | 56.1         | 49.1 | 62.0         | 61.2 | 4.6                        | —                          | —                             |
| G メッシュ－3 | 15.6             | 13.9 | 58.5         | 48.9 | 61.0         | 62.1 | 4.7                        | 32.6                       | 6.99                          |
| FRP－1    | 20.0             | 15.6 | 53.7         | 49.2 | 62.4         | 60.7 | 4.9                        | —                          | —                             |
| FRP－2    | 18.0             | 15.6 | 53.2         | 49.2 | 66.1         | 60.7 | 4.6                        | —                          | —                             |
| FRP－3    | 17.4             | 14.1 | 57.4         | 49.0 | 66.9         | 62.0 | 4.8                        | 20.5                       | 4.26                          |

(1) 曲げひび割れ発生荷重

ひび割れ発生モーメントは、式 (4.1) より算定される。

$$M_{cr} = bh^2 f_b \left[ \frac{k^3}{3(\mu - k)} + \frac{1}{3}(\mu - k) + \frac{1}{2}(1 - \mu)(1 + \mu - 2k) + \frac{pn(k_1 - k_2)^2}{\mu - k} \right] \quad (4.1)$$

$$k = \frac{\mu(2 - \mu) + 2npk_1}{2(1 + np)} \quad (4.2)$$

$$k_1 = \frac{d}{h} \quad (4.3)$$

ここで  $\mu = 0.7$  とすると

$$M_{cr} = \{0.310 + 48p(k_1 - 0.49)^2\}bh^2 f_b \quad (4.4)$$

ここに、 $b$ =梁の幅(mm)

$h$ =梁の高さ

$d$ =梁の有効高さ

$f_b$ =コンクリートの曲げ強度

$p$ =鉄筋比( $= \frac{A_s}{bd}$ )

$p$ =ヤング係数比( $= \frac{E_s}{E_c}$ )

## (2) 鉄筋降伏荷重

複鉄筋長方形断面の降伏曲げモーメントの計算は、図-4.1 に示す応力分布から求めた。

なお、曲げ応力の算定では、以下の仮定を用いることとなる。

- ① 維ひずみは、断面の中立軸からの距離に比例する（平面保持の仮定）。
- ② コンクリートの引張応力は無視する。
- ③ コンクリートおよび鋼材はともに弾性体とする。

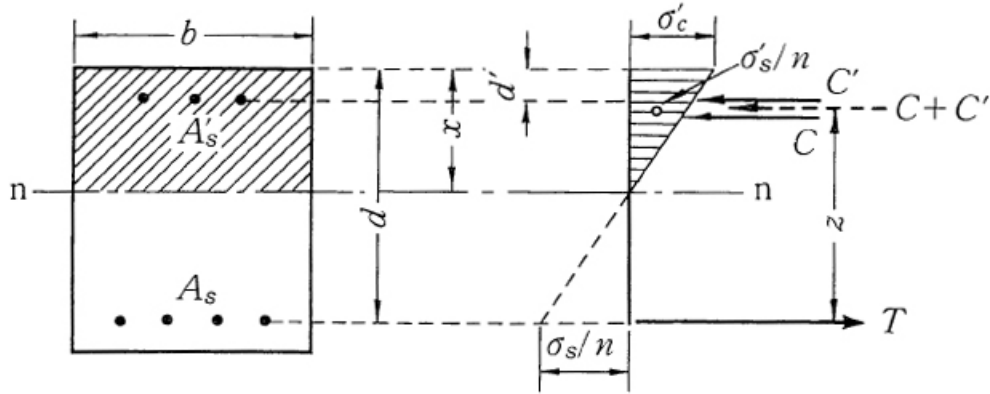


図-4.1 複鉄筋断面における応力分布

### ① 中立軸位置

各合力は、下記のように表され、 $C + C' - T = 0$  から、式(4.6)を得る。ここで、 $G_c$ 、 $G_s$  および  $G'_s$  は、コンクリート、引張鉄筋、および圧縮鉄筋のそれぞれの断面一次モーメントである。

$$\left. \begin{aligned} C &= \text{コンクリートの全圧縮力} = (\sigma'_c/x) G_c \\ C' &= \text{圧縮鉄筋の全圧縮力} = (n\sigma'_c/x) G'_s \\ T &= \text{引張鉄筋の全引張力} = (n\sigma'_s/x) G_s \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

$$G_c + n G'_s - n G_s = 0 \quad (4.6)$$

中立軸  $x$  は、式(3.7)において、 $G_c$ 、 $G_s$  および  $G'_s$  を代入することで、式 (4.8) となる。

$$\left. \begin{aligned} G_c &= \frac{bx^2}{2} \\ G_s &= A_s (d - x) \\ G'_s &= A'_s (x - d') \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

$$x = -n(p + p') + \sqrt{[n(p + p')]^2 + 2n \left[ p + p' \left( \frac{d'}{d} \right) \right]} \quad (4.8)$$

$p = A_s / (bd)$  : 引張鉄筋比

$p' = A'_s / (bd)$  : 圧縮鉄筋比

$n = E_s / E_c$  : ヤング係数比

$k = x/d$  : 中立軸比

② 換算断面 2 次モーメント

換算断面 2 次モーメントを式(4.9)により求める。

$$I_i = \frac{bx^3}{3} + nA's(x-d')^2 + nAs(d-x)^2 \quad (4.9)$$

③ 降伏曲げモーメントおよび降伏荷重

降伏曲げモーメントは、式(4.10)において、 $\sigma_s = f_{yd}$  とすることで求める。

$$M_y = \frac{\sigma_s}{n} \bullet \frac{I_i}{(d-x)} \quad (4.10)$$

また、降伏荷重  $P_y$  は、式(4.11)で計算する。

$$P_u = M_u \bullet \frac{2}{a'} \quad (\text{ここで、} a' \text{ はせん断スパン}) \quad (4.11)$$

(3) 終局荷重

複鉄筋長方形断面の終局曲げモーメントの計算は、曲げモーメント  $M$  を受けて引張破壊を起こす場合、図-4.2 に示す等価応力ブロックを用いて、行った。

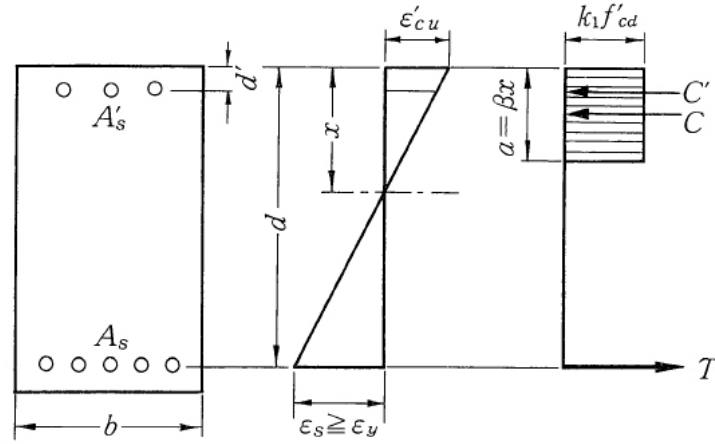


図-4.2 複鉄筋断面における等価ブロック

土木学会「コンクリート標準示方書」より、コンクリートクリークの応力-ひずみ関係の特性を表す値の  $k_1$ ,  $\epsilon'_{cu}$ , および等価応力ブロックの高さ係数  $\beta$  は、式(4.12)のようになる。

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= 1 - 0.003 f'_{ck} (\leq 0.85) \\ \epsilon'_{cu} &= \frac{155 - f'_{ck}}{30000} (\leq 0.0035) \\ \beta &= 0.52 + 80 \epsilon'_{cu} \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

$k_1$ : 強度の低減係数

$\epsilon'_{cu}$ : コンクリートの終局圧縮ひずみ

$\beta$ : 等価ブロックの高さ係数

$f'_{ck}$ : コンクリートの圧縮強度の特性値

各合力は、 $C$ ,  $C'$ ,  $T$  は式(4.13)のように表される。

$$\left. \begin{aligned} C &= k_1 f'_{cd} a b \\ C' &= A'_s f'_{yd} \\ T &= A_s f_{yd} \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

軸方向の力の釣り合い条件  $C + C' - T = 0$  より，破壊時の等価ブロックの高さ  $a$  は，式(4.17)のようになる。

$$a = \frac{A_s f_{yd} - A'_s f'_{yd}}{k_1 f'_{cd} b} = \left( p - p' \frac{f'_{yd}}{f_{yd}} \right) md = \bar{p} md \quad (4.14)$$

$$\left. \begin{aligned} p &= A_s / (bd) \\ p' &= A'_s / (bd) \\ \bar{p} &= p - p' (f'_{yd} / f_{yd}) \\ m &= f_{yd} / (k_1 f'_{cd}) \end{aligned} \right\} (p, p' : \text{引張鉄筋比, 圧縮鉄筋比}) \quad (4.15)$$

また，圧縮鉄筋が降伏するためには，下式を満足することが必要となる。

$$\bar{p} \geq \beta k_1 \frac{f'_{cd} d'}{f_{yd} d} \bullet \frac{\varepsilon'_{cu}}{\varepsilon'_{cu} - f'_{yd} / E_s} \quad (4.16)$$

$f'_{cd}$  : コンクリートの設計圧縮強度 ( $= f_{ck} / \gamma_c$ ,  $\gamma_c$  : コンクリートの部材係数)

さらに，引張鉄筋が降伏する以前に上縁コンクリートが圧縮破壊を生じないための条件は，下式を満足することが必要となる。

$$\bar{p} \leq \beta k_1 \frac{f'_{cd}}{f_{yd}} \bullet \frac{\varepsilon'_{cu}}{\varepsilon'_{cu} + f_{yd} / E_s} \quad (4.17)$$

式(4.19)および式(4.20)の両条件を満足するとき，曲げ耐力  $M_u$  は式(4.21)で計算する。

$$M_u = (A_s f_{yd} - A'_s f'_{yd})(d - 0.5a) + A'_s f'_{yd} (d - d') \quad (4.18)$$

式(4.19)を満足しない場合，曲げ破壊時に圧縮鉄筋は降伏点に達せず，弾性範囲内にあるので，ひずみ  $\varepsilon'_s$  を考慮して，式(4.19)より，圧縮鉄筋応力  $\sigma'_s$  を計算する。

$$\sigma'_s = E_s \varepsilon'_{cu} \left( 1 - \beta \frac{d'}{d} \bullet \frac{d}{a} \right) \quad (4.19)$$

$$\frac{a}{d} = \frac{m}{2} \left[ p - p' \frac{E_s \varepsilon'_{cu}}{f_{yd}} + \sqrt{\left( p - p' \frac{E_s \varepsilon'_{cu}}{f_{yd}} \right)^2 + p' \frac{4\beta d'}{md} \bullet \frac{E_s \varepsilon'_{cu}}{f_{yd}}} \right] \quad (4.20)$$

式(4.19)および式(4.20)より，終局曲げモーメント  $M_u$  は式(4.21)で計算する。

$$M_u = (A_s f_{yd} - A'_s \sigma'_s)(d - 0.5a) + A'_s \sigma'_s (d - d') \quad (4.21)$$

また，終局荷重  $P_u$  は，式(4.22)で計算する。

$$P_u = M_u \bullet \frac{2}{a'} \quad (\text{ここで, } a' \text{ はせん断スパン}) \quad (4.22)$$

#### 4. 2 耐力および変形性能

表-4.1 に示した結果にもとづき、耐力について繊維補強の効果の検討を行った。

ひび割れ発生荷重をみると、無対策は 15.8~18.0kN と、計算値に対して 10~17%上回っている。それに対して、G 繊維は 13.5~15.0 と計算値とほぼ同等または下回る値、PP 繊維は 14.8~18.0 と計算値を 5~15%上回る値、G メッシュは 15.6~18.0 と計算値を 12~23%上回る値、FRP は 17.4~20.0 と計算値に対して 15~28%上回る値となっている。これらのことから、ひび割れ発生荷重に対する繊維補強の効果は見られないことがわかる。

降伏荷重をみると、無対策は 54.0~54.2kN と、計算値に対して 10~13%上回っている。それに対して、G 繊維は 52.9~54.6kN と計算値を 8~11%上回る値、PP 繊維は 52.9~54.8kN と計算値を 7~12%上回る値、G メッシュは 53.4~58.5kN と計算値を 9~20%上回る値、FRP は 53.2~57.4kN と計算値に対して 8~17%上回る値となっている。これらのことから、降伏荷重の計算値と実測値の比は無対策試験体と繊維補試験体でほぼ同等であり、降伏荷重に対する繊維補強効果は特に見られないことがわかる。

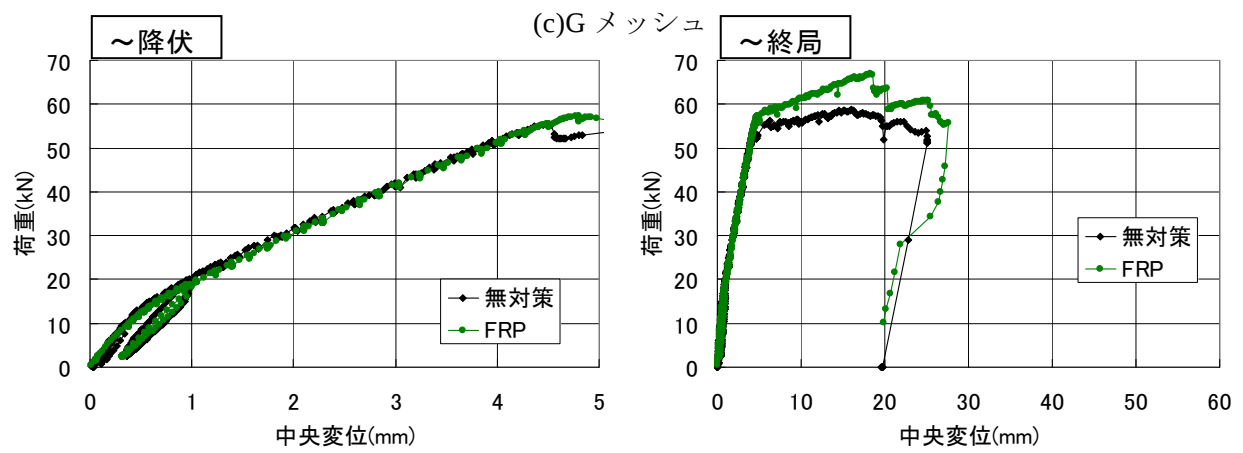
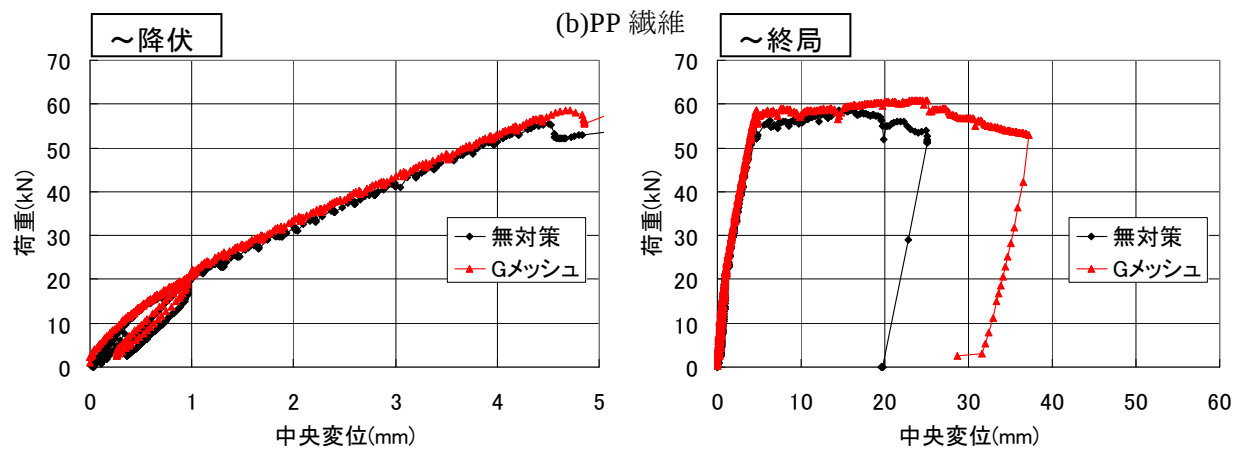
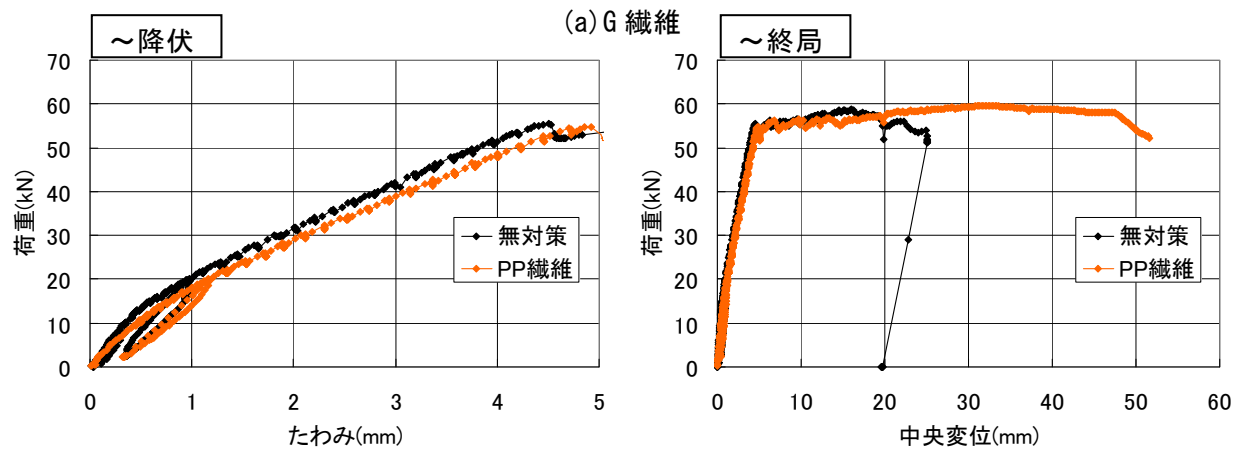
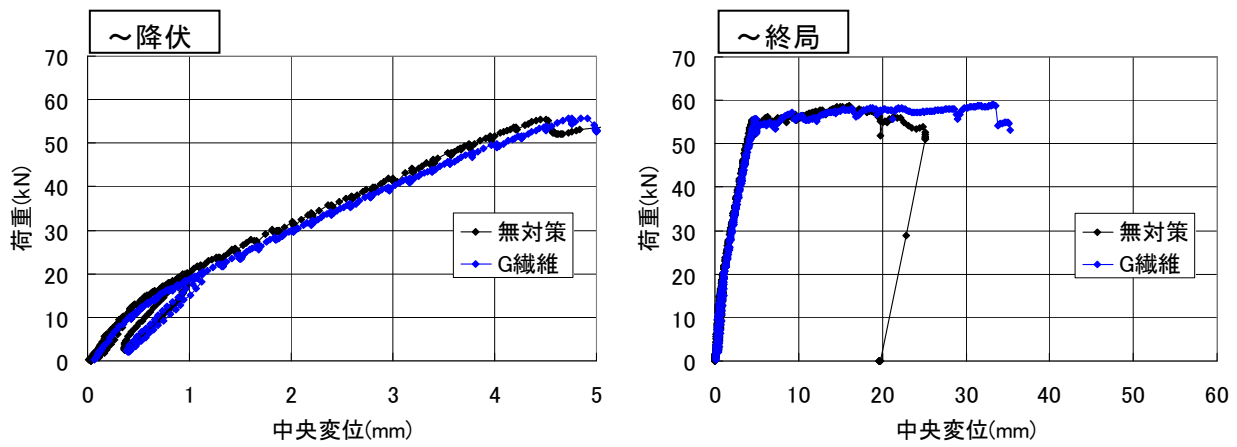
最大荷重をみると、無対策は 58.7~63.2kN と、計算値との比は 1.00~1.07 と、計算値と実験値は良い一致を示している。それに対して、G 繊維は 59.0~62.3kN と計算値との比は 0.95~1.03、PP 繊維は 58.7~59.6kN と計算値との比は 0.96~0.97、G メッシュは 59.0~62.0kN と計算値との比は 0.96~1.01、FRP は 62.4~66.9kN と計算値との比は 1.03~1.09 となっている。これらのことから、G 繊維、PP 繊維および G メッシュ最大荷重に対する繊維補強効果は見られないが、FRP は無対策に対して平均 10%程度の最大荷重の上昇が見られることから、FRP 格子筋による補強は耐力を向上させる効果があったことがわかる。

図-4.3 は、各繊維補強試験体と無対策試験体の試験体番号 3 番の荷重—変位曲線を比較したものである。ここで、荷重—変位曲線は、試験体の鉄筋降伏まで（左側）と終局まで（右側）の 2 つに分けて示した。

鉄筋降伏までの挙動をみると、すべての試験体が無対策試験体とほぼ同様の挙動を示していることがわかる。このことから、鉄筋降伏までの変形性状に対する繊維補強の効果は認められない。

終局までの挙動をみると、FRP 試験体の場合を除き、繊維補強を行った試験体の方が無対策試験体と比較して終局変位が大きくなっている。G 繊維試験体の場合は、じん性率が無対策の 5.56 に対して、G 繊維で 6.86 と、23%大きくなっている。これは、繊維補強によって試験体が負担する圧縮荷重が分散された効果と考えられる。PP 繊維の場合のじん性率は、無対策の 5.56 に対して 10.24 と 84%大きくなっている。また、中央変位 47mm 以降で荷重の低下が見られるが、その低下割合が緩やかになっている。これは、コンクリート圧壊後も繊維が荷重を負担したためと考えられる。G メッシュ試験体の場合は、中央変位 25mm 以降で徐々に荷重が下がっており、終局変位は 32.6mm となっている。じん性率は 6.99 で無対策の場合と比べて 26%高くなっており、メッシュ補強によってじん性が向上したと考えられる。FRP 試験体の場合は、鉄筋降伏後の剛性が無対策試験体と比べて高くなっており、中央変位 18mm 程度で荷重が 66.9kN と大きな値を示している。これは、鉄筋降伏後も FRP 格子筋が降伏せず荷重を受け持ったためと考えられる。また、荷重が無対策試験体に比べて増加したことにより、じん性率は 4.26 と無対策の場合と比べて 23%小さくなっている。

以上より、繊維補強の効果は FRP 試験体を除き、じん性率の増加といった形で現れている。FRP 試験体の場合は、格子筋の補強効果によって耐力が上がるものの、じん性率が小さくなる結果が得られた。

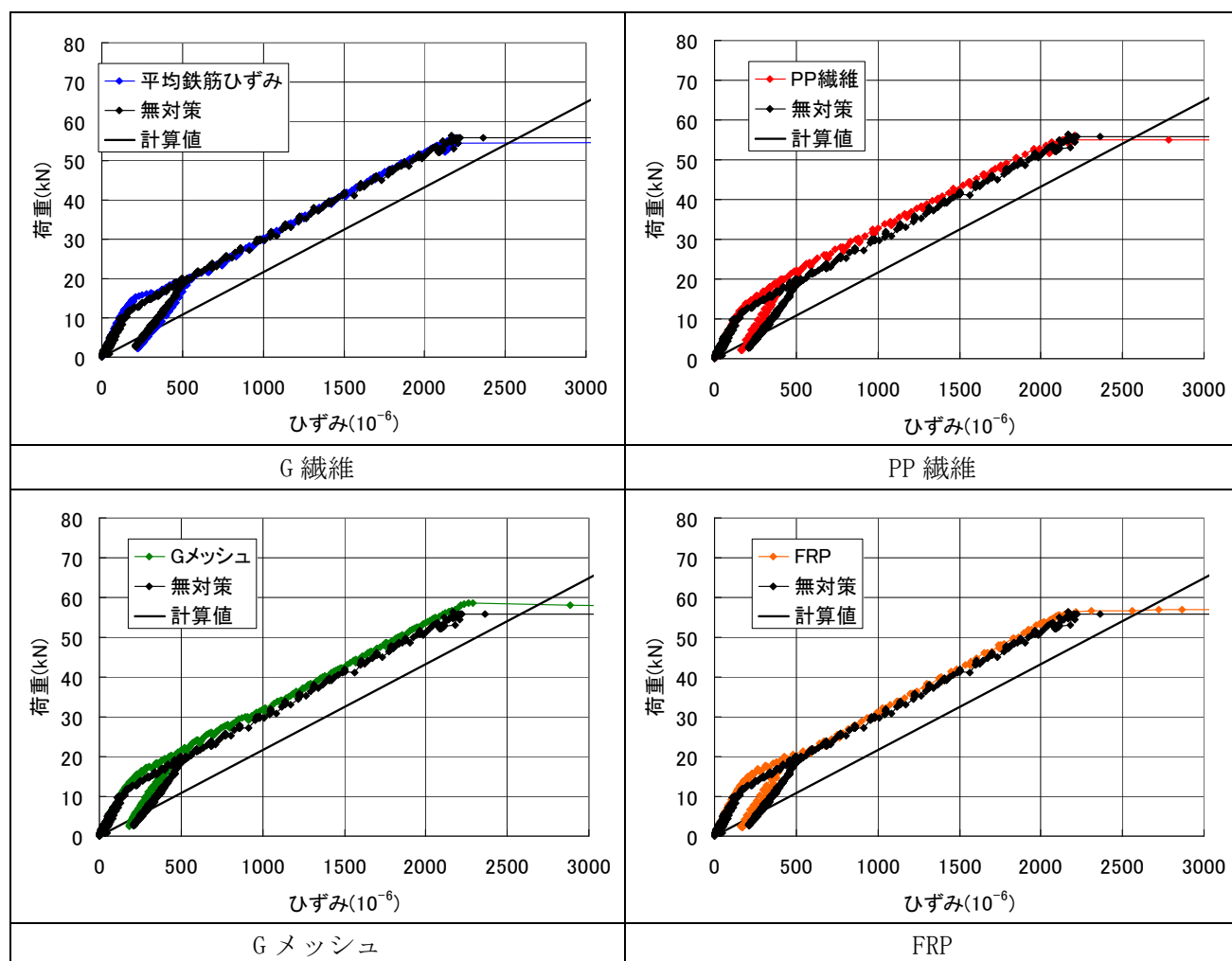


(d) FRP

図-4.3 荷重—変位曲線

### 4. 3 鉄筋のひずみ

図－4.4 は、各繊維補強試験体と無対策試験体（試験体番号 3 番）の主筋が降伏するまでの鉄筋ひずみを比較したものである。実験値と計算値を比較すると、ひび割れ発生後の勾配は計算値とほぼ一致しているが、値は一致していない。これは、ひび割れがスパン中央の鉄筋ひずみの測定位置に入らなかったためである。無対策試験体の鉄筋ひずみは、荷重が 12kN まで直線的に上昇した後、計算値と同程度の勾配でひずみが上昇し、 $2200 \times 10^{-6}$  程度で降伏ひずみに達した。また、他の試験体もほぼ同様の挙動を示している。



図－4.4 鉄筋のひずみ

#### 4. 5 コンクリートひずみ

図-4.5 は、各繊維補強試験体と無対策試験体（試験体番号 3 番）の降伏までの圧縮縁におけるコンクリートひずみを比較したものである。無対策試験体のコンクリートひずみは、降伏まで直線的に上昇し、荷重が 50 k N で  $1070 \times 10^{-6}$  程度のひずみとなった。それに対して、50kN 時ひずみは、G 繊維で  $950 \times 10^{-6}$ 、PP 繊維で  $900 \times 10^{-6}$ 、G メッシュで  $920 \times 10^{-6}$ 、FRP で  $920 \times 10^{-6}$  と無対策と比べて値が低下している。これは、繊維が引張力を負担したためと考えられる。

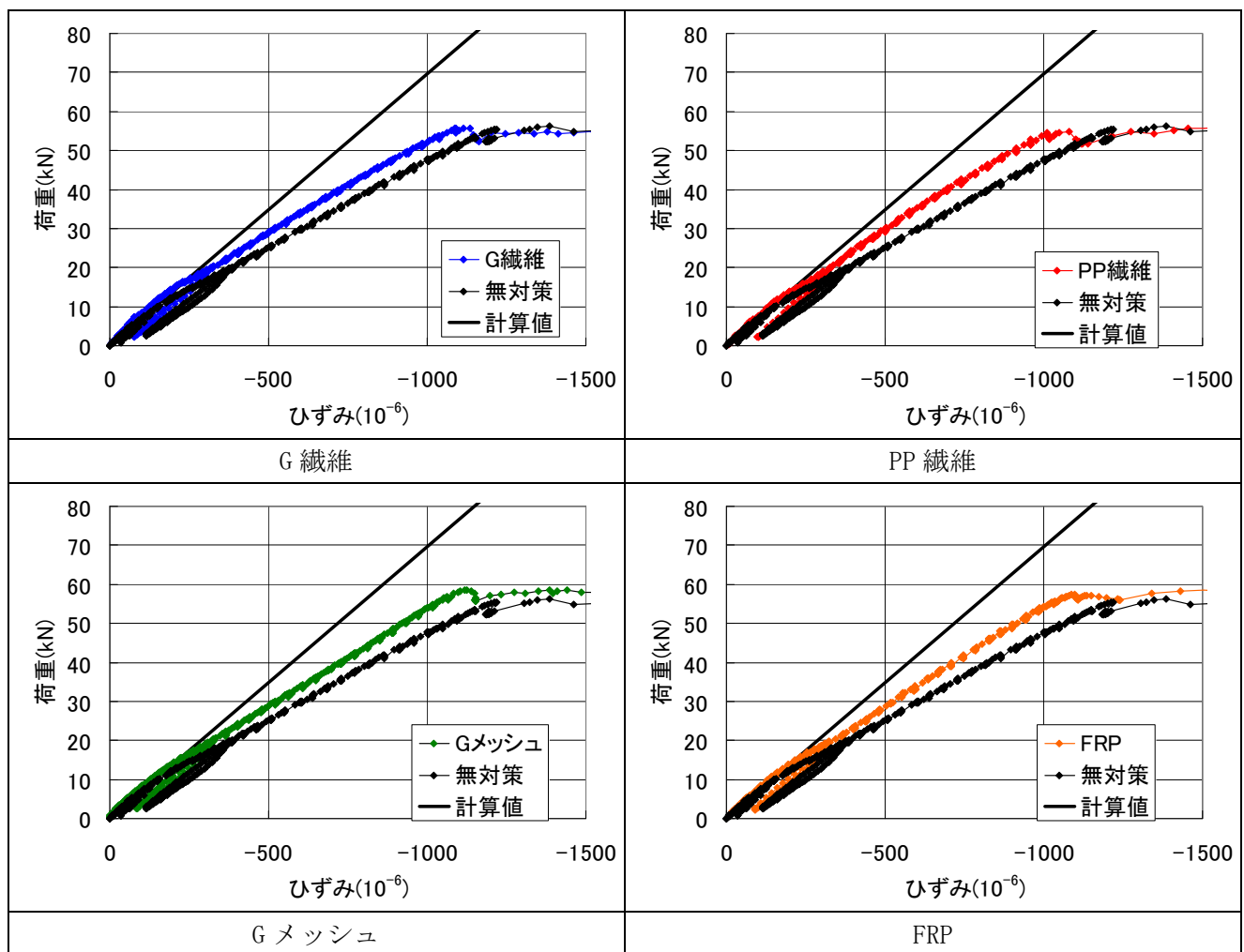


図-4.5 コンクリートひずみ

#### 4. 5 ひび割れの発生状況およびひび割れ幅

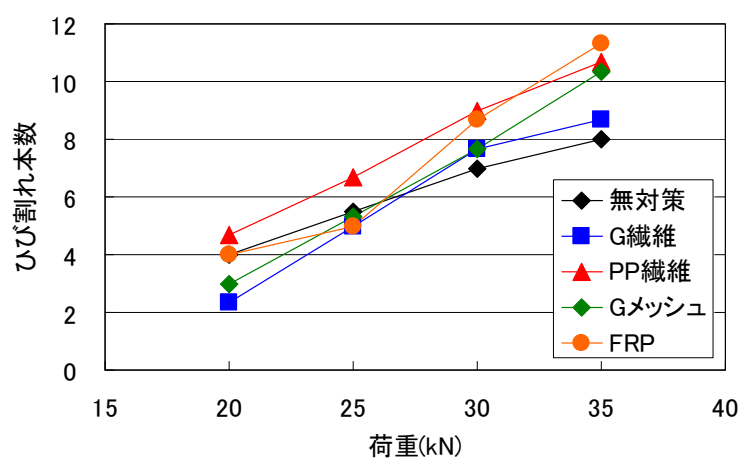
##### (1) 使用時

表－4.2 は、荷重 20、25、30、35kN 時のひび割れ本数を示したものである。また、図－4.6 は、ひび割れ本数の平均値を示したものである。20～25kN 時をみると、無対策で 4～5 本と比べて G 繊維、G メッシュおよび FRP で無対策と同等または下回る本数となっている。鉄筋応力が  $180\text{N/mm}^2$  程度となる 30kN 時をみると、無対策で 7 本程度に比べて G メッシュ、G 繊維で 8 本程度、PP 繊維、FRP で 9 本程度とひび割れ本数が増加している。また、35kN 時をみると無対策で 8 本程度に比べて、G 繊維で 9 本程度、G メッシュ、PP 繊維および FRP で 10 本以上と、さらに無対策との差が開いている。また、PP 繊維試験体は 20kN 時から 35kN まで無対策のひび割れ本数を上回っている。

図－4.7 は、各試験体の試験体番号 3 番の荷重 30kN 時のひび割れ図を示したものである。無対策試験体をみると、ひび割れは左右の載荷点から外側に 200mm の区間のせん断補強筋の下でのみ発生している。それに対して、G 繊維試験体をみるとひび割れはせん断補強筋の下以外に 3 本発生している。PP 繊維をみると、ひび割れ位置がせん断補強筋の下から外れているものが多くなっている。G メッシュ試験体をみると、ひび割れは左右の載荷点から外側に 300mm の区間のせん断補強筋の下まで発生している。FRP 試験体をみると、ひび割れはせん断補強筋の下以外で 2 本発生しており、また右側の載荷点から 280mm の位置にも発生している。これらのことから、繊維補強によって使用時のひび割れ分散性が向上し、30kN 以上ではその効果が明確になっている。

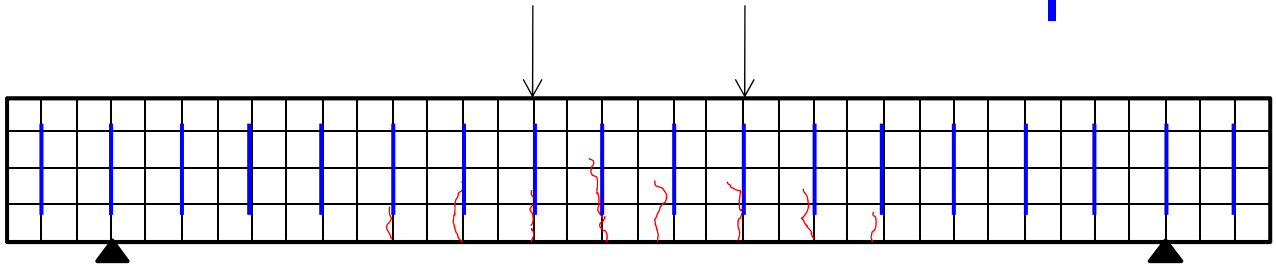
表－4.2 荷重とひび割れの関係

|          | 20kN | 25kN | 30kN | 35kN |
|----------|------|------|------|------|
| 無対策-1    | －    | －    | －    | －    |
| 無対策-2    | 3    | 5    | 6    | 6    |
| 無対策-3    | 5    | 6    | 8    | 10   |
| G 繊維-1   | 1    | 4    | 6    | 8    |
| G 繊維-2   | 0    | 4    | 6    | 6    |
| G 繊維-3   | 6    | 7    | 11   | 12   |
| PP 繊維-1  | 4    | 8    | 9    | 10   |
| PP 繊維-2  | 5    | 6    | 9    | 11   |
| PP 繊維-3  | 5    | 6    | 9    | 11   |
| G メッシュ-1 | 3    | 5    | 7    | 9    |
| G メッシュ-2 | 1    | 4    | 6    | 8    |
| G メッシュ-3 | 5    | 7    | 10   | 14   |
| FRP-1    | 1    | 3    | 7    | 9    |
| FRP-2    | 5    | 5    | 8    | 10   |
| FRP-3    | 6    | 7    | 11   | 15   |

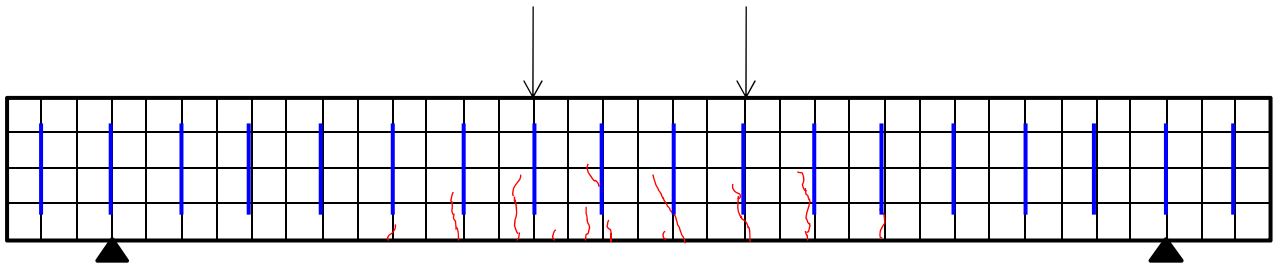


図－4.6 荷重とひび割れ本数の関係

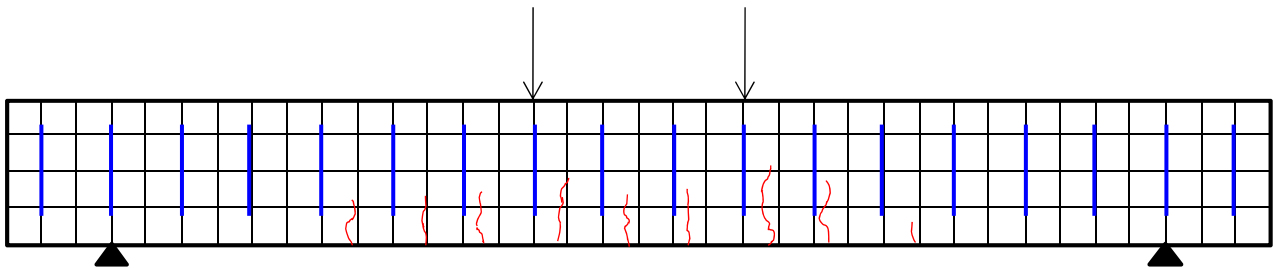
：せん断補強筋



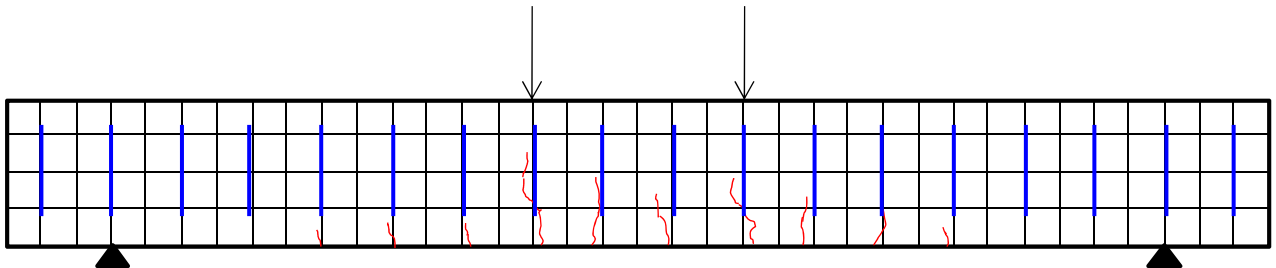
(a) 無対策-3



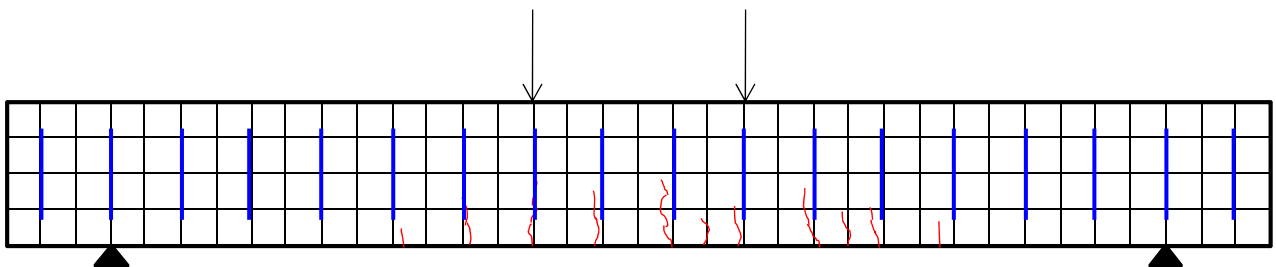
(b) G 繊維-3



(c) PP 繊維-3



(d) G メッシュ-3



(e) FRP-3

図-4.7 30kN 時のひび割れ(追加試験)

## （２）降伏時および終局時

図－4.8 は、各試験体の試験体番号 3 番についてひび割れ図を示したものである。各試験体において、等モーメント区間には 5～6 本のひび割れが発生している。ひび割れの発生状況をみると、無対策試験体のひび割れは、他の繊維補強を行った試験体と比べて斜め方向のひび割れが少ないことがわかる。

表－4.2 は、各試験体の試験体番号 3 番のひび割れのひび割れ本数および平均ひび割れ間隔を示したものである。無対策試験体は、ひび割れ本数が降伏時で 16 本、終局時で 17 本となっており、平均ひび割れ間隔が降伏時で 57.4mm、終局時で 54.1 であった。

G 繊維試験体は、ひび割れ本数が降伏時で 21 本、終局時で 23 本であった。平均ひび割れ間隔は降伏時で 52.8mm、終局時で 48.2mm と、降伏時、終局時ともに無対策試験体の場合と比べてひび割れ本数が増加し、平均ひび割れ間隔が減少した。

PP 繊維試験体は、ひび割れ本数が降伏時で 18 本、終局時で 22 本となっており、平均ひび割れ間隔が降伏時で 57.7mm、終局時で 47.2mm と、降伏時は無対策と同程度であったが、終局時はひび割れ本数、ひび割れ間隔ともに無対策と比べてひび割れ本数が増加し、平均ひび割れ間隔が減少した。

G メッシュ試験体は、ひび割れ本数が降伏時で 23 本、終局時で 30 本となっており、平均ひび割れ間隔が降伏時で 43.6mm、終局時で 33.47mm と、降伏時、終局時ともに無対策と比べてひび割れ本数が増え、平均ひび割れ間隔が小さくなっている。特に終局時はひび割れ本数で 13 本の増加、平均ひび割れ間隔で 20.7mm 減少と大幅なひび割れ分散性能の向上が見られる。

FRP 繊維試験体は、ひび割れ本数が降伏時、終局時ともに 24 本、平均ひび割れ間隔が降伏時、終局時ともに 43.8mm と、降伏時、終局時ともに無対策と比べてひび割れ本数が 50%程度増え、平均ひび割れ間隔が 10mm 以上小さくなっている。

これらのことから、繊維補強によってひび割れ分散性が向上し、特に G メッシュおよび FRP はその効果が大きいことがわかる。

表－4.2 ひび割れ本数と間隔

| 試験体      | 全体ひび割れ本数 |     | 平均ひび割れ間隔<br>(mm) |      |
|----------|----------|-----|------------------|------|
|          | 降伏時      | 終局時 | 降伏時              | 終局時  |
| 無対策-3    | 16       | 17  | 57.4             | 54.1 |
| G 繊維-3   | 21       | 23  | 52.8             | 48.2 |
| PP 繊維-3  | 18       | 22  | 57.7             | 47.2 |
| G メッシュ-3 | 23       | 30  | 43.6             | 33.4 |
| FRP-3    | 24       | 24  | 43.8             | 43.8 |

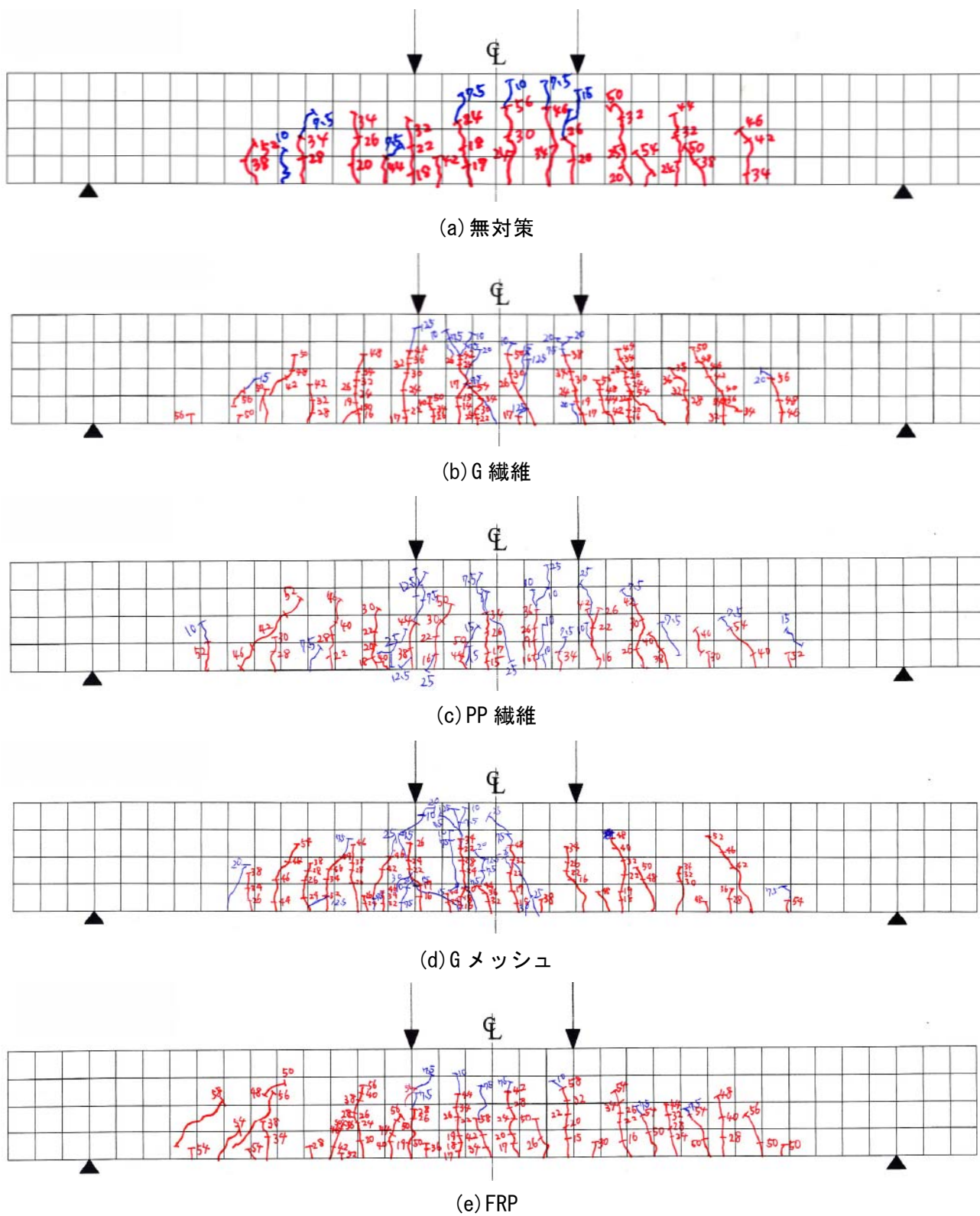


図-4.8 ひび割れ図

図-4.9 は、各試験体の試験体番号 3 番の鉄筋応力と最大ひび割れ幅の関係を示したものである。ここで、計算値は土木学会示方書式（式（1））により算定した。最大ひび割れ幅は、すべての試験体において土木学会示方書式の計算値より小さな値を示している。また、G 繊維、PP 繊維、G メッシュおよび FRP の繊維補強を行った試験体の最大ひび割れ幅はほぼ同等で、すべて無対策試験体の場合を下回る値となっている。これらのことから、G 繊維、PP 繊維、G メッシュ、FRP とともに最大ひび割れ幅を低減させる効果があったことがわかる。

図-4.10 は、各試験体の試験体番号 3 番の平均ひび割れ幅と荷重の関係を示したものである。荷重が 50kN 時の平均ひび割れ幅は、無対策で 0.164mm に対して、G 繊維で 0.115mm、PP 繊維で 0.110mm、G メッシュで 0.108mm、FRP で 0.093mm と、無対策と比べて 0.05～0.07mm 程度小さな値となっている。このように、G 繊維、PP 繊維、G メッシュ、FRP とともに平均ひび割れ幅を低減させる効果があったことがわかる。

$$w = 1.1k_1k_2k_3 \left\{ 4c + 0.7(c_s - \phi) \right\} \left[ \frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right] \quad \text{式(1)}$$

ここに、 $k_1$ ：鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数で、一般に、異形鉄筋の場合に 1.0、普通丸鋼および PC 鋼材の場合に 1.3 としよ。

$k_2$ ：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で、式(1.4)による。

$$k_2 = \frac{15}{f'_c + 20} + 0.7$$

$f'_c$ ：コンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)。一般に、設計圧縮強度  $f'_{cd}$  を用いてよい。

$k_3$ ：引張鋼材の段数の影響を表す係数で、式(3.5)による。

$$k_3 = \frac{5(n+2)}{7n+8}$$

$n$ ：引張鋼材の段数、 $c$ ：かぶり(mm)

$c_s$ ：鋼材の中心間隔(mm)、 $\phi$ ：鋼材径(mm)

$\sigma_{se}$ ：鋼材位置のコンクリートの応力度が 0 の状態からの鉄筋応力度の増加量(N/mm<sup>2</sup>)

$E_s$ ：鉄筋のヤング係数(N/mm<sup>2</sup>)

$\varepsilon'_{csd}$ ：コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値

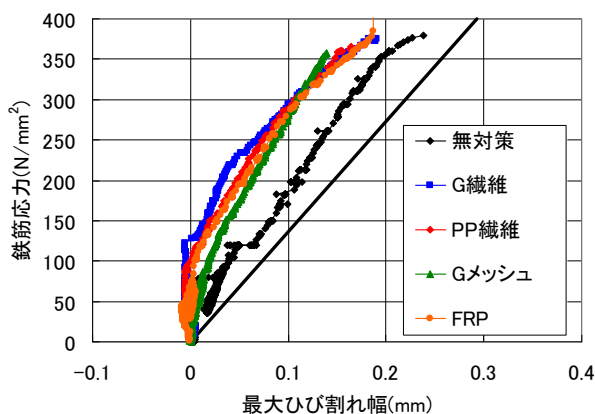


図-4.9 鉄筋応力と最大ひび割れ幅の関係

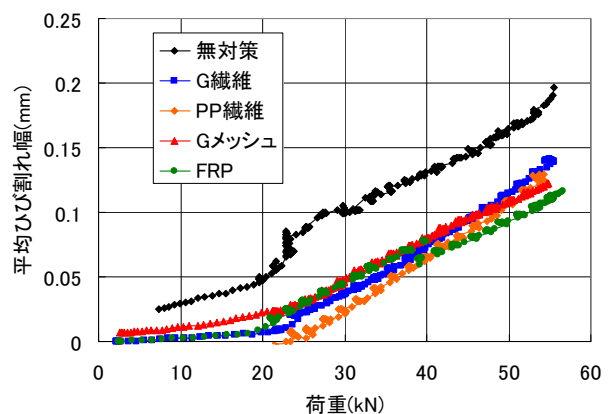


図-4.10 平均ひび割れ幅と荷重の関係

## 5. せん断載荷試験

### 5. 1 耐力および変形性能

表－5.1 は、RC 小型梁に対するせん断載荷試験の試験結果を示したものである。ここで、終局変位は、荷重が最大荷重から 10%低下したときの変位とした。なお、各試験体の破壊モードは、G 繊維 1 のみがせん断破壊で、それ以外は曲げ破壊であった。

表－5.1 せん断載荷試験結果

|          | ひび割れ発生荷重 (kN) |      | 斜めひび割れ発生荷重 (kN) |      | 降伏荷重 (kN) |      | 終局荷重 (kN) |       | 降伏変位 $\delta_y$ (mm) | 終局変位 $\delta_u$ (mm) | $\delta_u / \delta_y$ |
|----------|---------------|------|-----------------|------|-----------|------|-----------|-------|----------------------|----------------------|-----------------------|
|          | 実測            | 計算   | 実測              | 計算   | 実測        | 計算   | 実測        | 計算    |                      |                      |                       |
| 無対策 1    | 44.0          | 31.5 | 68.0            | 41.6 | 117.2     | 98.4 | 144.7     | 121.5 | 1.4                  | 16.9                 | 12.3                  |
| 無対策 2    | 36.0          | 31.5 | 60.0            | 41.6 | 122.3     | 98.4 | 146.3     | 121.5 | 1.3                  | 18.1                 | 14.4                  |
| G 繊維 1   | 33.2          | 32.1 | 55.0            | 42.1 | 123.4     | 98.5 | 159.4*    | 121.5 | 1.4                  | 13.3                 | 7.7                   |
| G 繊維 2   | －             | 32.1 | －               | 42.1 | －         | 98.5 | －         | 121.5 | －                    | －                    | －                     |
| PP 繊維 1  | 38.0          | 32.4 | 65.0            | 42.3 | 124.6     | 98.5 | 159.1     | 121.2 | 1.4                  | 29.9                 | 21.3                  |
| PP 繊維 2  | 37.9          | 32.4 | 75.0            | 42.3 | 122.5     | 98.5 | 133.1     | 121.2 | 1.3                  | 7.7                  | 5.9                   |
| G メッシュ 1 | 36.0          | 31.8 | 60.0            | 41.8 | 124.5     | 98.4 | 146.3     | 121.3 | 1.3                  | 17.9                 | 14.2                  |
| G メッシュ 2 | 28.6          | 31.8 | 60.0            | 41.8 | 123.4     | 98.4 | 172.1     | 121.3 | 1.4                  | 27.6                 | 20.3                  |
| FRP1     | 37.0          | 32.7 | 75.0            | 42.5 | 125.2     | 98.5 | 145.0     | 122.2 | 1.3                  | 17.7                 | 13.3                  |
| FRP2     | 40.0          | 32.7 | 65.0            | 42.5 | 119.8     | 98.5 | 161.0     | 122.2 | －                    | 23.2                 | －                     |

\*せん断破壊

ひび割れ発生荷重をみると、無対策は 36.0～44.0kN と、計算値に対して 14～40%上回っている。それに対して、G 繊維は 33.2kN と計算値をとほぼ同等の値、PP 繊維は 37.9～38.0 kN と計算値を 17%上回る値、G メッシュは 28.6～31.8 kN と計算値 10%下回る値と 13%上回る値、FRP は 37.0～40.0kN と計算値に対して 13～22%上回る値となっている。これらのことから、ひび割れ発生荷重に対する繊維補強効果は明確には現れていないことがわかる。

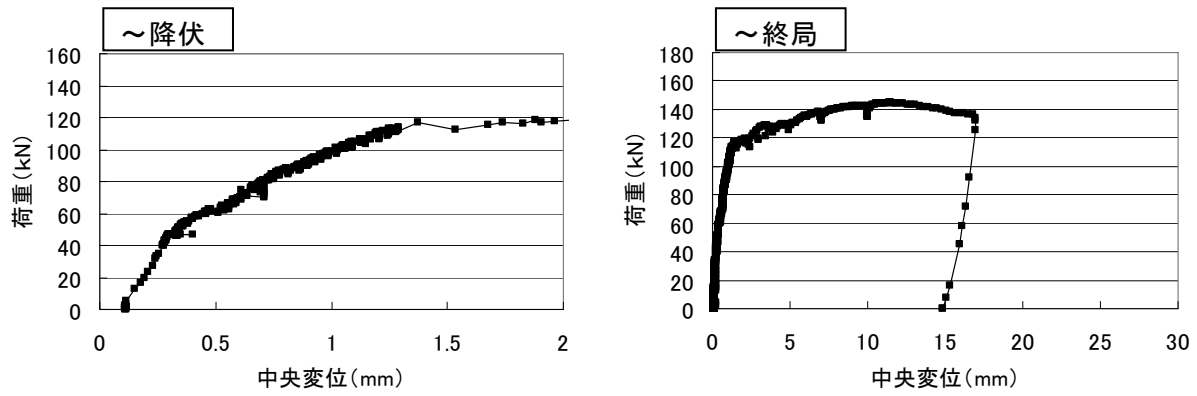
降伏荷重をみると、無対策は 117.2～122.3kN と、計算値に対して 19～24%上回っている。それに対して、G 繊維は 123.4kN と計算値を 25%上回る値、PP 繊維は 122.5～124.6kN と計算値を 24～26%上回る値、G メッシュは 123.4～124.5kN と計算値を 25～26%上回る値、FRP は 125.2kN と計算値に対して 27%上回る値となっている。これらのことから、降伏荷重の計算値と実測値の比は無対策試験体と繊維補試験体ではほぼ同等であり、降伏荷重に対する繊維補強効果は特に見られない。

最大荷重をみると、無対策は 144.7～146.3kN と、計算値に対して 19～20%上回っている。それに対して、G 繊維は 159.4kN と計算値を 32%上回る値、PP 繊維は 133.1～159.1kN と計算値を 10～20%上回る値、G メッシュは 146.3～172.1kN と計算値を 20～42%上回る値、FRP は 145.0kN と計算値に対して 19%上回る値となっており、繊維の種類ごとの傾向は確認できない。

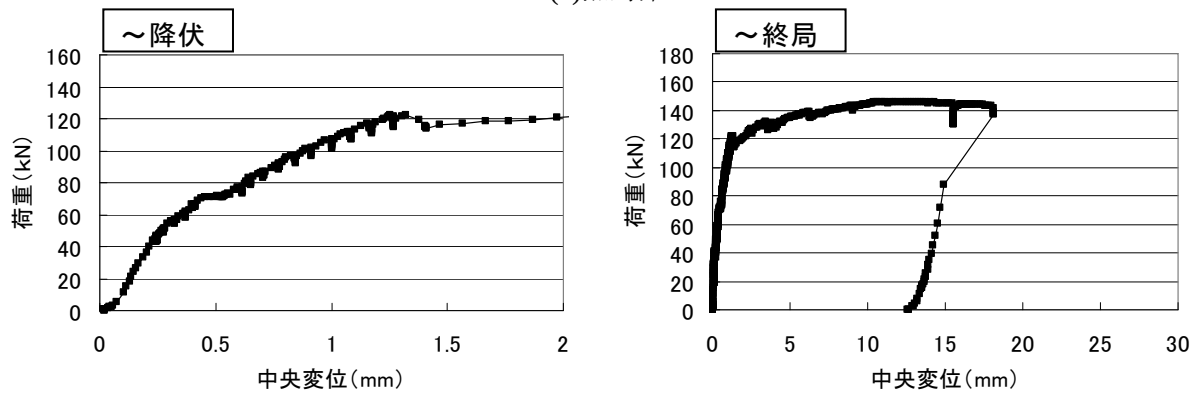
図－5.1 は、各試験体と無対策試験体の荷重－変位曲線を比較したものである。荷重－変位曲線は、試験体降伏まで（左側）と終局まで（右側）に分割して示した。

降伏までの挙動をみると、すべての試験体が無対策試験体とほぼ同様の挙動を示している。また、降伏変位は全ての試験体で 1.3～1.4mm とほぼ同様となっている。これらのことから、降伏までの変形性状に対する繊維補強の効果はとくに認められない。

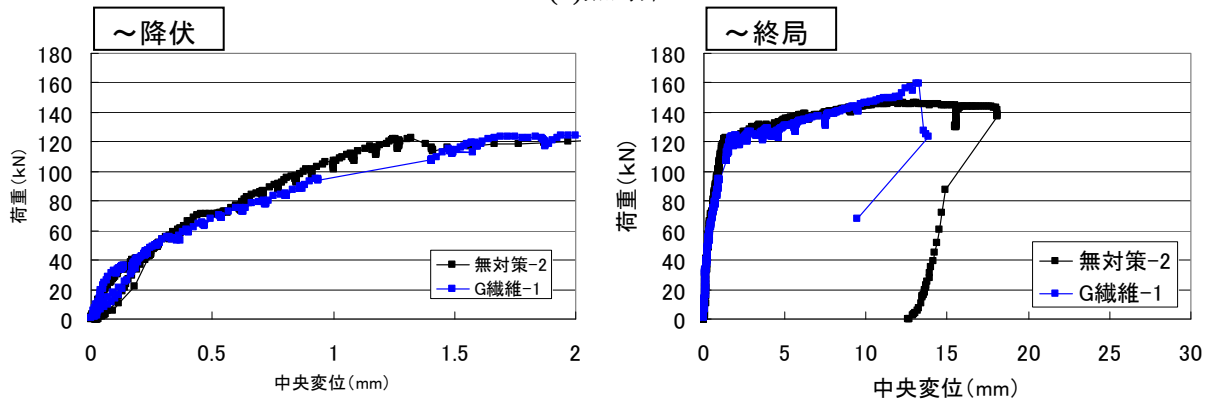
終局までの挙動をみると、PP 繊維－1 は中央変位 30mm 程度まで 160kN 程度の荷重が作用しているのに対して、PP 繊維－2 は中央変位 7mm 程度で荷重が 120kN 以下に低下している。このように、繊維種類による補強効果は明確に現れていない。また、せん断破壊した試験体が G 繊維－1 のみとなっており、他の試験体では全て圧縮破壊したため、せん断補強に関する効果は今回の実験からは確認できなかった。



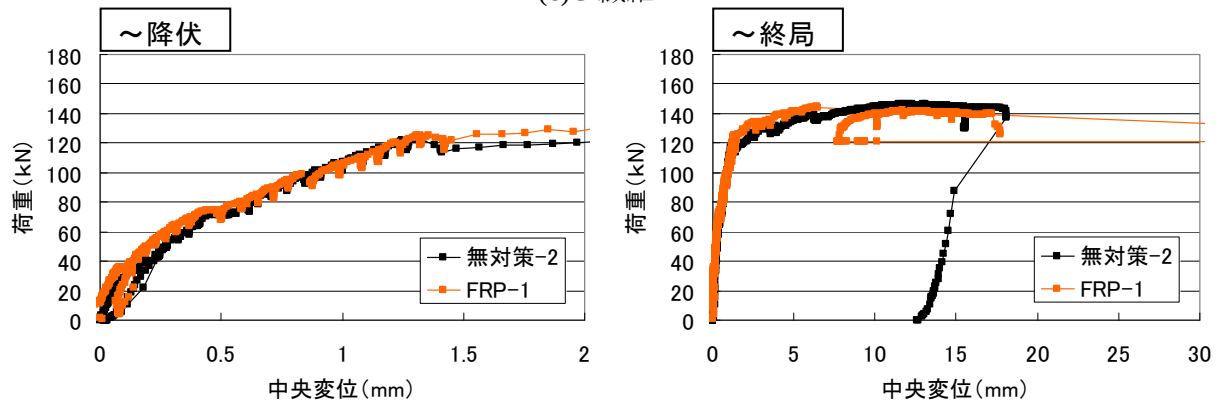
(a)無対策-1



(b)無対策-2

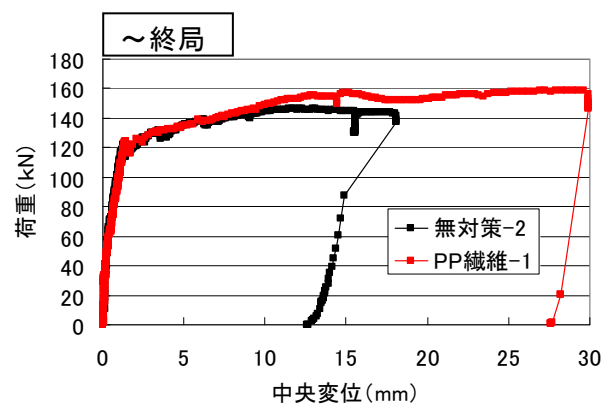
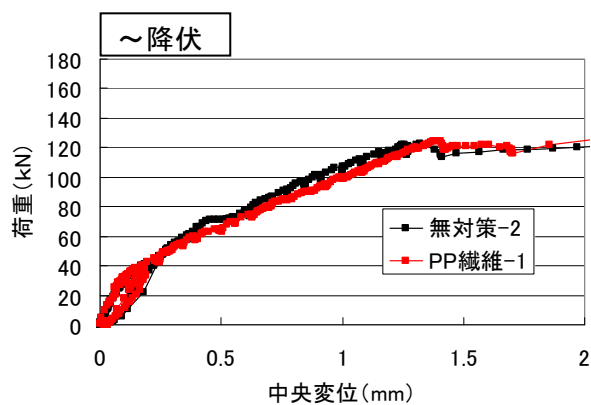


(c)G 繊維-1

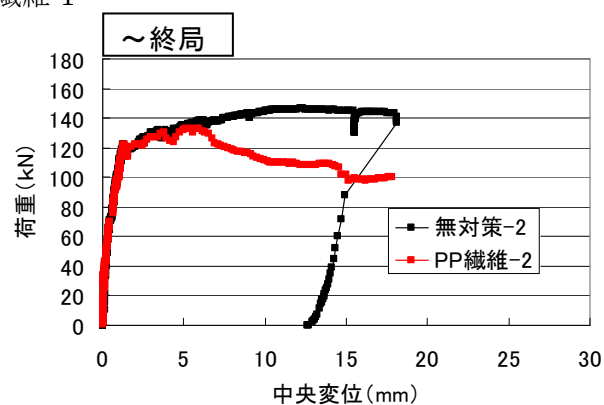
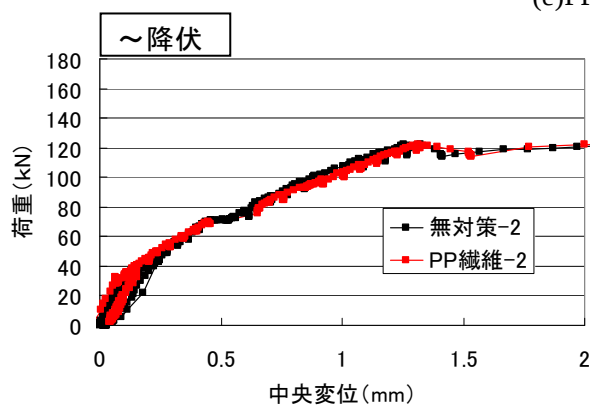


(d)FRP-1

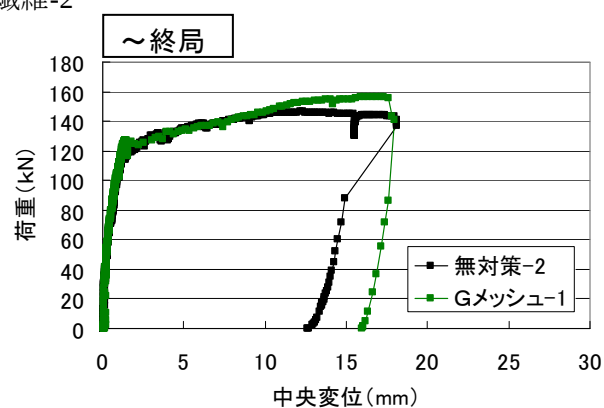
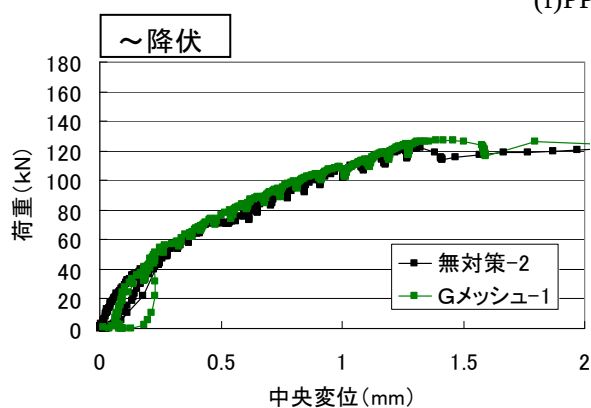
図-5.1(1) 荷重—変位曲線



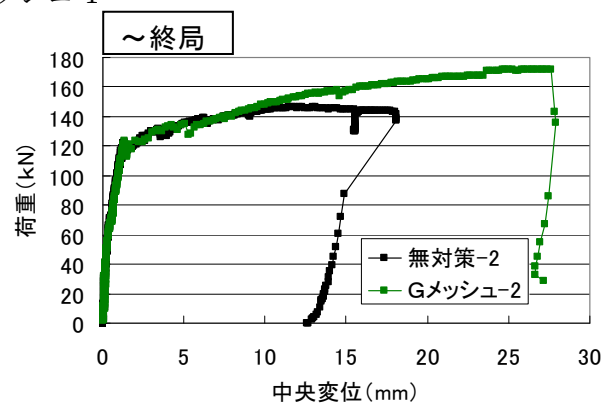
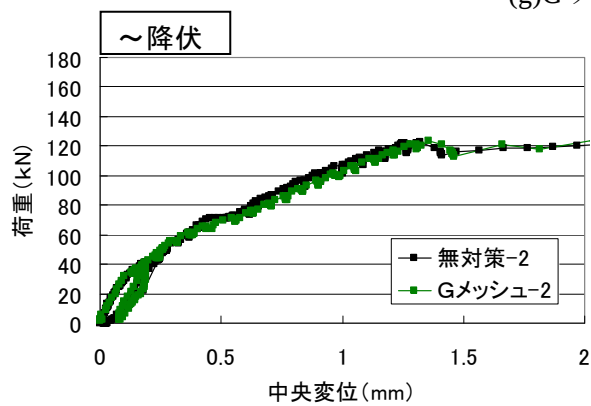
(e)PP 繊維-1



(f)PP 繊維-2



(g)G メッシュ-1



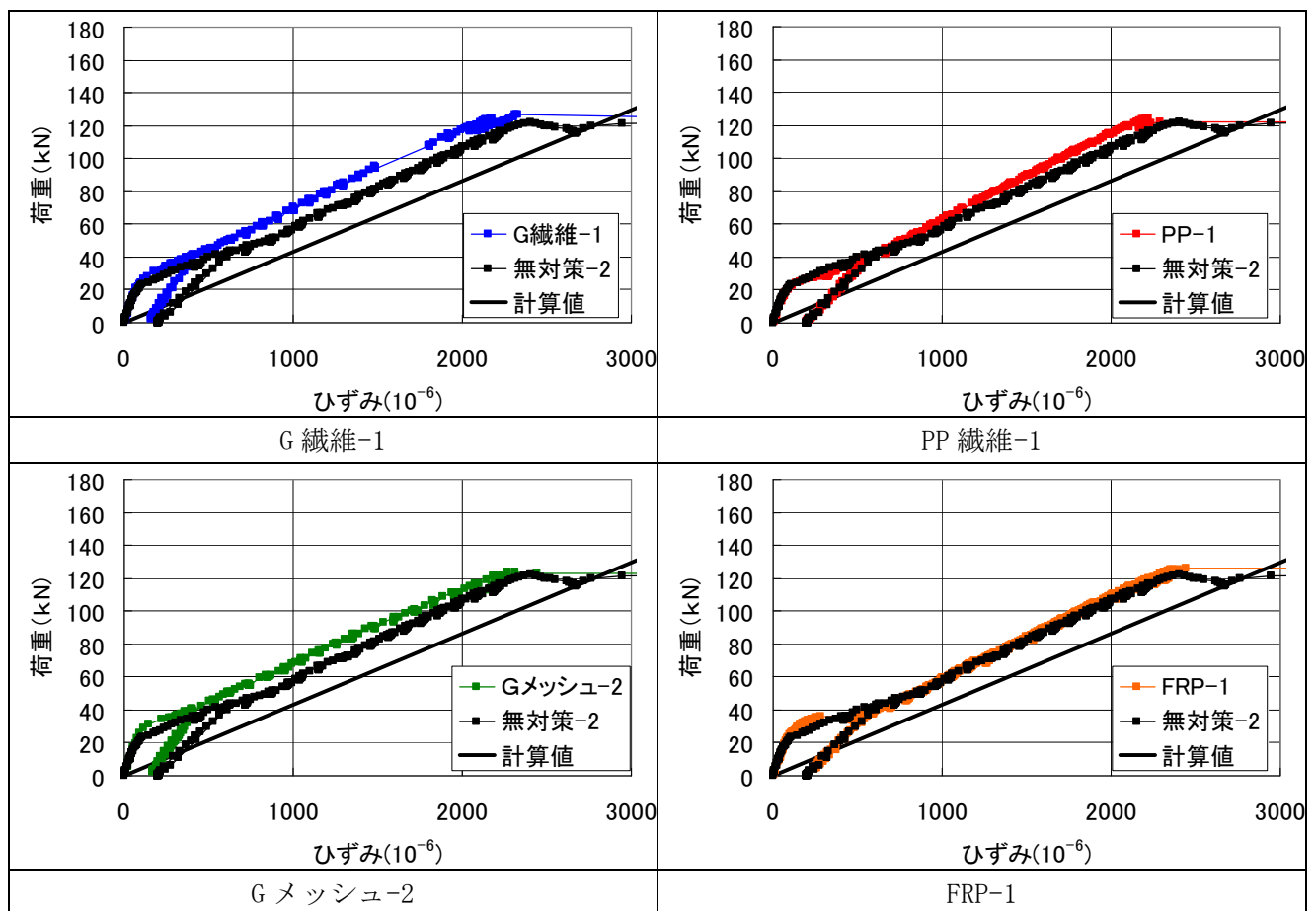
(h)G メッシュ-2

図-5.1(2) 荷重—変位曲線

## 5. 2 鉄筋のひずみ

### (1) 主鉄筋

図－5.2 は、各繊維補強試験体と無対策試験体の 1 体ずつの降伏時までの鉄筋ひずみを比較したものである。無対策試験体の鉄筋ひずみは、ひび割れ発生後降伏まで直線的に上昇し、荷重 120kN で  $2400 \times 10^{-6}$  程度の値を示した。それに対して、120kN 載荷時の鉄筋ひずみは、G 繊維で  $2080 \times 10^{-6}$ 、PP 繊維で  $2120 \times 10^{-6}$ 、G メッシュで  $2160 \times 10^{-6}$ 、FRP で  $2250 \times 10^{-6}$  と、繊維補強試験体では同一荷重でのひずみの減少が確認された。これは、それぞれの繊維が鉄筋応力の一部を分担したためと考えられる。



図－5.2 鉄筋ひずみの比較

### 5. 3 ひび割れ

図―5.3 は各試験体のひび割れ図を示したものである。ひび割れの発生状況から、他の試験体と比較して、G メッシュ試験体および FRP 試験体において微細なひび割れが多く見られる。

表―5.2 は、各試験体の試験体番号 3 番に発生したひび割れの本数を示したものである。無対策試験体は、平均ひび割れ本数が降伏時で 6 本、終局時で 8 本であった。G 繊維試験体は、平均ひび割れ本数が降伏時で 4.5 本、終局時で 8 本となり、無対策試験体と比較して降伏時のひび割れ本数は少なく、終局時のひび割れ本数は同等であった。PP 繊維試験体は、平均ひび割れ本数が降伏時で 5 本、終局時で 9 本、無対策と比べて降伏時のひび割れ本数は少なく、終局時のひび割れ本数は同等であった。G メッシュ試験体は、平均ひび割れ本数が降伏時で 8 本、終局時で 11 本と、降伏時、終局時ともに無対策と比べてひび割れ本数が増加している。FRP 試験体は、平均ひび割れ本数が降伏時で 7.5 本、終局時で 12.5 本と、降伏時、終局時ともに無対策と比べてひび割れ本数が増えている。以上より、G メッシュ試験体および FRP 試験体は、繊維補強によってひび割れ分散性が向上したことがわかる。

表―5.2 ひび割れ本数

|           | ひび割れ本数 |     |     |      |
|-----------|--------|-----|-----|------|
|           | 降伏前    | 平均  | 降伏後 | 平均   |
| 無対策 1     | 5      | 6   | 8   | 8    |
| 無対策 2     | 7      |     | 8   |      |
| G 繊維 1    | 4      | 4.5 | 8   | 8    |
| G 繊維 2    | 5      |     | 8   |      |
| ポリプロピレン 1 | 4      | 5   | 9   | 9    |
| ポリプロピレン 2 | 6      |     | 9   |      |
| G メッシュ 1  | 6      | 8   | 8   | 11   |
| G メッシュ 2  | 10     |     | 14  |      |
| FRP1      | 8      | 7.5 | 15  | 12.5 |
| FRP2      | 7      |     | 10  |      |

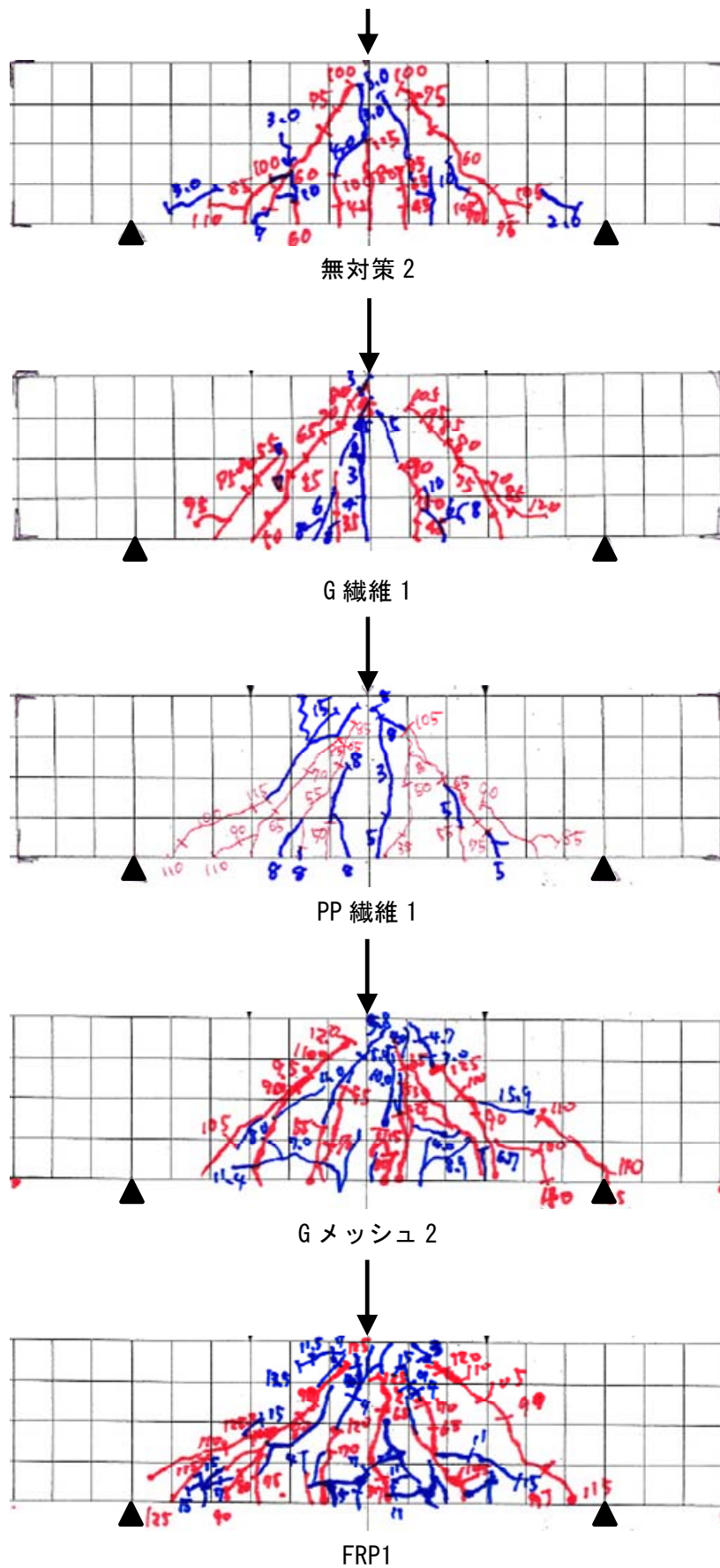


図-5.3 せん断試験ひび割れ図

## 6. まとめ

本試験により得られた結果を以下に示す。

### (1) 管理供試体試験

管理供試体に対する強度試験結果より、下記の点が確認された。

- ①G 繊維および PP 繊維の混入により圧縮強度が増加した。
- ②G 繊維、PP 繊維および G メッシュの混入によって引張強度が増加した。

### (2) 切り欠き曲げ試験

切り欠き曲げ試験により、引張軟化曲線が得られた。また、破壊エネルギーについては、下記の点が確認された。

- ①G 繊維については、破壊エネルギーの増加に対する明確な効果が見られない。
- ②PP 繊維の場合は無対策の場合に比べて 40%程度の破壊エネルギーの増加が見られた。
- ③G メッシュについては補強効果が大きく、無対策の場合に比べて 7 倍以上の破壊エネルギーの増加が見られた。

### (3) 曲げ載荷試験

小型 RC はりの曲げ載荷試験により下記の点が確認された。

- ①鉄筋降伏まで耐力に対する繊維補強効果は確認されなかった。
- ②G 繊維、PP 繊維および FRP はじん性の向上が見られた。とくに、PP 繊維は 80%以上と大きな向上を示した。
- ③FRP は鉄筋降伏後において耐力の増加が認められる。これは、鉄筋降伏後も繊維が降伏しないためと考えられる。
- ④繊維補強によりひび割れが分散される効果があることが確認された。とくに、G メッシュおよび FRP は分散効果が高いことが確認された。
- ⑤繊維補強により最大ひび割れ幅および平均ひび割れ幅が低減されることが確認された。低減効果は、G 繊維、PP 繊維、G メッシュおよび FRP の 4 種類の繊維で同程度であった。

### (4) セン断載荷試験

小型はりのせん断試験により、下記の点が確認された。

- ①耐力については、使用する繊維の違いによる補強効果の差は確認できなかった。
- ②鉄筋ひずみの測定結果より、繊維が鉄筋の応力の一部を負担したことが確認された。
- ③G メッシュおよび FRP 格子筋による補強は、ひび割れ分散効果があることが確認された。