

繊維布貼付工法の補強効果検証

(コンクリートの曲げ試験による比較)

試験結果報告書

試験日：平成 20 年 12 月 26 日

報告日：平成 21 年 1 月 19 日

試験依頼：ファイバーダイন株式会社

試験担当：株式会社マンホール商会



1. 概 要

一般住宅の土台施工で敷設される現場打ちコンクリート製の布基礎は、無鉄筋あるいは有鉄筋であっても単鉄筋構造である事が多く、換気開口部位等でひび割れが発生する事例が多く見られます。

その際の補修方法として、高強度繊維布の貼付工法がありますが、問題となるのは最もひび割れが発生し易い基礎底部に貼付させる事が事実上不可能で、ひび割れ発生部の部材側面にしか貼付できない事にあります。

そこで、本試験では曲げを受ける方向に対して直角(90°)に補強材(高強度繊維布)を貼付した場合の補強効果を確認する事を主な目的としました。

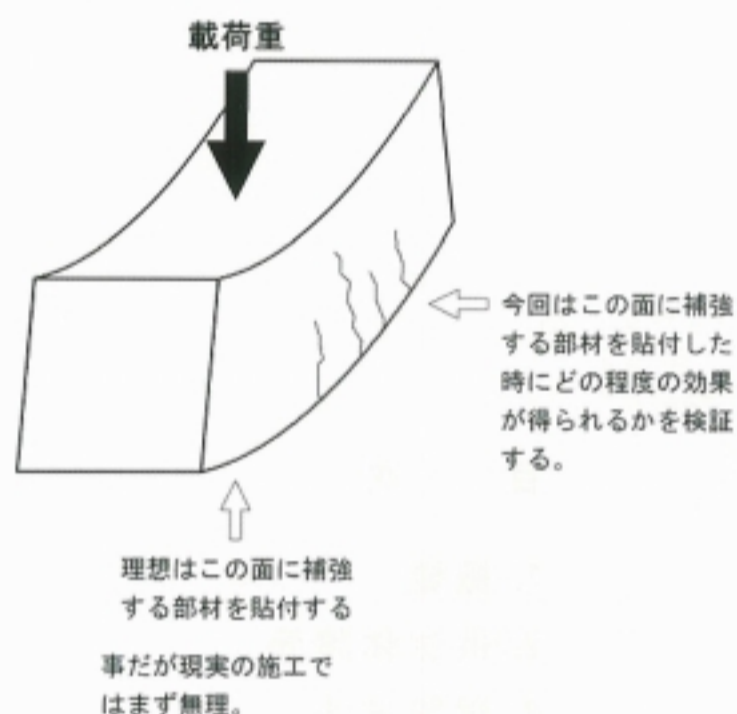


図-1. コンクリート部材の補強方法概念図

試験による検討項目を整理すると、次の2項目になります。

- ① 部材の繊維布貼付による補強効果の差異
- ② 部材の鉄筋の有無による繊維布貼付の補強効果の差異

よって比較分析をするため、次の構成にて供試体を計8体作成し試験する事にしました。

無筋供試体(黒 No.)

- | | | | |
|---------------|------|-----|--------------|
| [a: 無筋・無補強] | … 2体 | 供試体 | No. 1, No. 2 |
| [b: 無筋・繊維布貼付] | … 2体 | 供試体 | No. 3, No. 4 |

有筋供試体(赤 No.)

- | | | | |
|---------------|------|-----|--------------|
| [c: 有筋・無補強] | … 2体 | 供試体 | No. 1, No. 2 |
| [d: 有筋・繊維布貼付] | … 2体 | 供試体 | No. 3, No. 4 |

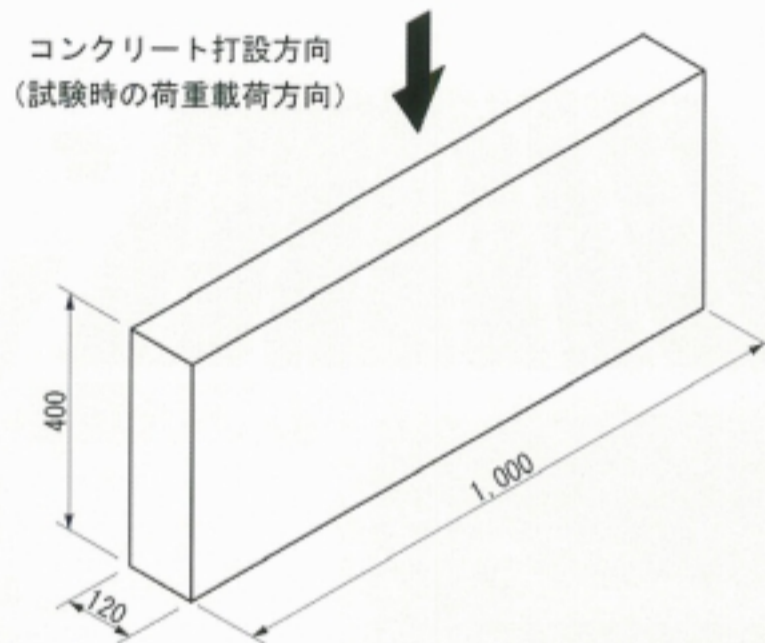
2. 供試体諸元

供試体の形状、寸法、鉄筋配置と制作方法等について次に記載します。

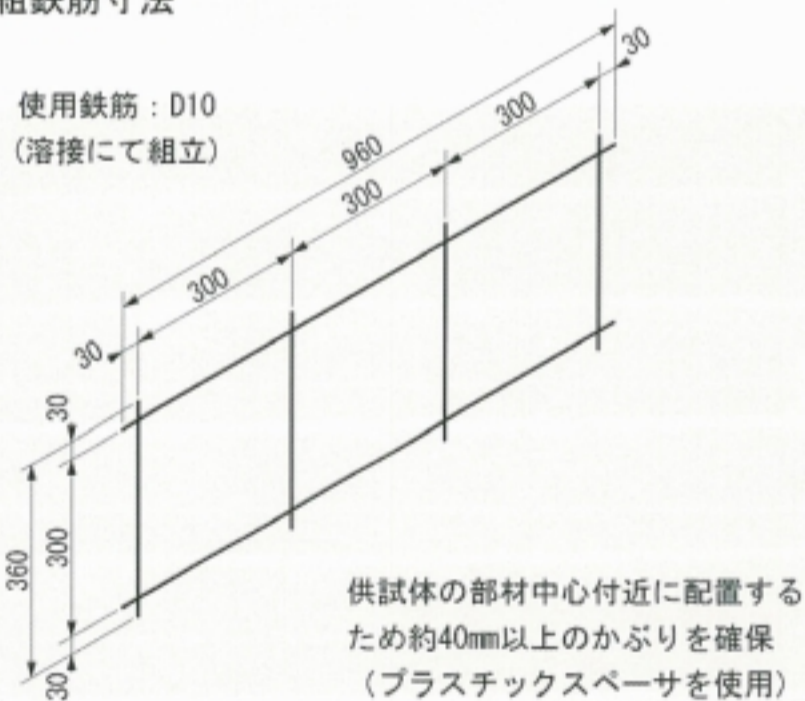
本試験における供試体の形状は、布基礎の一部をモデル化したものです。

曲げ試験を行うための支点間距離は、試験機に設置可能な範囲で部材の曲げたわみを測定可能という条件を満たすようにするため、部材高さの2倍の距離を確保できるようにしています。

(i) 供試体外寸法



(ii) 組鉄筋寸法



※単位は全て [mm]

※供試体および組鉄筋の寸法誤差は±3mm 以内

図-2. 供試体の形状、寸法、鉄筋配置

供試体は無筋、有筋共に同一の日付（2008.12.01）にて作成しました。
型枠は事前に組み上げておき、コンクリート打設日に組鉄筋をセットしています。
コンクリート打設後に、供試体の鉄筋の有無の区別が付く様に組鉄筋にはビニール製のリボンを
付け、コンクリート部材から露出するようにしておきました。



写真-1. 供試体型枠



写真-2. 鉄筋配置状態

コンクリートの打設は型枠に歪みが生じない様に均等に分散するように流し込みます。
コンクリートの圧縮強度の確認用に別途円柱供試体を用意し、曲げ試験日に同時に圧縮試験を行います。



写真-3. コンクリート打設



写真-4. コンクリート打設後、養生前状況

供試体はシート養生後に脱型し（2008. 12. 04）、その後気中にて養生した後、無筋、有筋供試体各4体より2体ずつ抽出し、繊維布の貼付を行いました。（2008. 12. 12）

繊維布の貼付作業は、依頼主であるファイバーダイン株式会社側にて施工して貰いました。

貼付作業後、打合せにより冬場の気温低下を考慮して接着部分の養生期間を2週間程度確保する事にしました。



写真-5. 繊維布貼付作業前



写真-6. 繊維布貼付作業中

3. 試験方法

曲げ試験は「JIS A 1106:1999 附属書 1 (参考) 中央点荷法によるコンクリートの曲げ強度試験方法」を参考にして、次の要領で行いました。

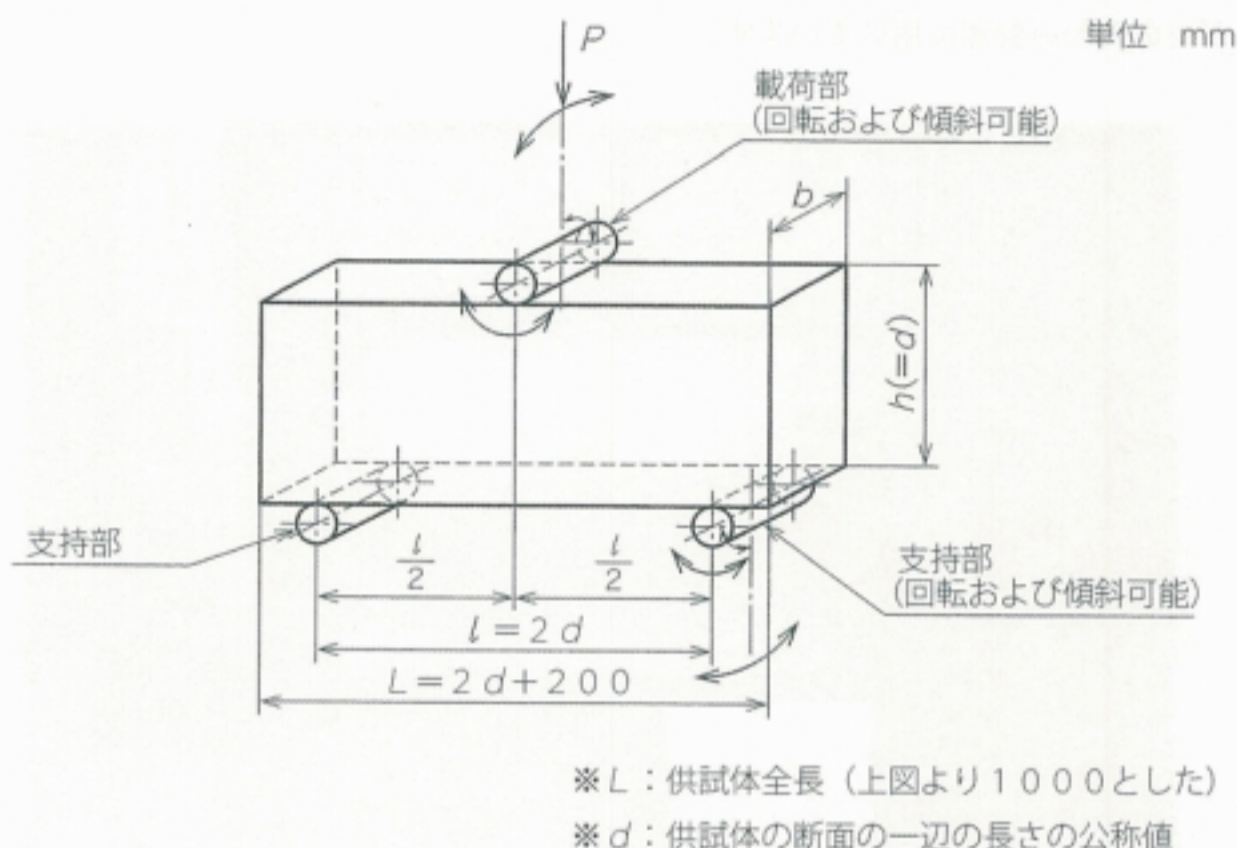


図-3. 試験方法概念図

上図の試験による曲げ強度は次の式により算出します。（有効数字3桁に丸める）

$$f_b = \frac{3 \times P \times l}{2 \times b \times h^2}$$

ここに

- f_b : 曲げ強度 (N/mm²)
- P : 試験機の示す最大荷重 (N)
- l : スパン (800mm)
- b : 破壊断面の幅 (120mm)
- h : 破壊断面の高さ (400mm)

なお、今回使用した試験機の詳細は次の通りです。

曲げ試験機（ケーブルトラフ，U字側溝用…最大ひょう量 200kN / 40kN）
 製造会社：㈱関西機器製作所
 ひょう量：200kN/40kNで測定（JIS B 7733 1等級以上）

（補足）

供試体は打設面を載荷側にして設置します。（実際の施工状況を再現するため）
 また、支持部、載荷部に横幅120mm，縦幅25mm，厚さ4mmのゴムシートを敷きます。

写真は試験日（2008. 12. 26）に実際に供試体を試験機に設置した状況です。

試験機には、供試体設置の補助用と転倒時の衝撃緩和を兼ねて供試体後面側に鋼管パイプを水平に取り付けました。一方、供試体前面側には転倒時の衝撃緩和のためチェーンを張っています。供試体の前面には、面の中心にL型アンクルと張出部材をエポキシ系接着剤にて取付しダイヤルゲージでのたわみ計測に用いています。



写真-7. 試験機設置状況



写真-8. ダイヤルゲージ取付部

4. 試験結果

(1) 各供試体の破壊荷重

次の表-1. は各供試体の破壊荷重の測定結果を整理し、前項の計算式より曲げ破壊の強度を算出したものです。

表-1. 試験結果一覧表（破壊荷重）

| 供試体種別 | | 無筋・無補強 | | 無筋・繊維布貼付 | | 有筋・無補強 | | 有筋・繊維布貼付 | |
|------------------------------|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | a-1 (No. 1) | a-2 (No. 2) | b-1 (No. 3) | b-2 (No. 4) | c-1 (No. 1) | c-2 (No. 2) | c-1 (No. 3) | c-2 (No. 4) |
| 破壊荷重 [kN] | 測定値 | 82.2 | 91.8 | 112.0 | 104.0 | 96.7 | 91.6 | 164.0 | 149.0 |
| | 平均値 | 87.0 | | 108.0 | | 94.2 | | 156.5 | |
| | 偏差 | 4.8 | | 4.0 | | 2.5 | | 7.5 | |
| 破壊強度 [N/mm ²] | 測定値 | 5.14 | 5.74 | 7.00 | 6.50 | 6.04 | 5.73 | 10.25 | 9.31 |
| | 平均値 | 5.44 | | 6.75 | | 5.88 | | 9.78 | |
| | 偏差 | 0.30 | | 0.25 | | 0.16 | | 0.47 | |
| 強度向上率 [%] ※ | | — | | 24.1 | | 8.2 | | 79.9 | |

※無筋・無補強供試体と比較しての強度の向上率（平均値比較にて）

表より[c：有筋・無補強]は[a：無筋・無補強]と比較して平均値においては強度の割増があるものの、個別で比較した場合 a-2 が c-2 を若干上回る等、個体誤差（バラツキ）の範囲内ではなく、本試験のような曲げ方向の荷重に対する補強効果は期待できないと思われます。

一方、[a：無筋・無補強]と[b：無筋・繊維布貼付]を比較した場合、個体誤差を考慮に入れても明らかな強度の向上が認められます。そして、[d：有筋・繊維布貼付]における強度の向上はかなりのものとなっています。



写真-9. 供試体の破壊状況 [a-2：無筋・無補強]

写真-10, 11 は [c-1 : 有筋・無補強] 供試体の破壊状況を撮影したものです。
[a : 無筋・無補強]の供試体 2 体との破壊状況の違いは、鉄筋の存在により分断されていないと
いう事です。



写真-10. 供試体の破壊状況 [c-1 : 有筋・無補強]



写真-11. 供試体内の降伏鉄筋の状況 [c-1 : 有筋・無補強]

本試験の組鉄筋は布基礎における一般的な仕様に準じていますが、次のRC断面計算にて検証した結果、曲げひび割れ発生の荷重時で鉄筋は既に降伏しており、本試験での荷重の作用方向に対しての曲げ応力に対する補強の効果はありません。(表-2. の計算に準ずると曲げ応力に対する補強効果を意図した場合には最低でも引張側にD10で5本は必要となります。)

ただし、布基礎自体は本試験のような単純支持による曲げ荷重状態を想定して鉄筋を組み込んでいる訳では無いので、結果としては妥当と思われる。むしろ、破壊荷重の個体誤差は小さくなっている傾向から見た場合、品質の安定化において有筋化は有意義と考えられます。

表-2. RC断面計算による有筋供試体の検証

| | | | |
|--|---|------------------------------------|---------------|
| ヤング係数比 : $n = 15$ 設計基準強度 : $f'_{ck} = 36 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ 鉄筋の種類 : SD295A | | | 有筋供試体 (共通) |
| 断面力 | 曲げモーメント | M [kN・m] | 16.000 |
| | せん断力 | S [kN] | 4.0 |
| 部材寸法 | 部材幅 | b [mm] | 120.0 |
| | 部材厚 | h [mm] | 400.0 |
| | 有効高(引張鉄筋位置) | d [mm] | 350.0 |
| | 有効高(圧縮鉄筋位置) | d' [mm] | 50.0 |
| 鉄筋配置 | 引張鉄筋 | 使用径 | D10 |
| | | 本数 | 1.0 |
| | As [mm ²] | | 71.3 |
| | 圧縮鉄筋 | 使用径 | D10 |
| 本数 | | 1.0 | |
| As' [mm ²] | | 71.3 | |
| 計算諸定数 | 鉄筋比(引張) | P | 0.0017 |
| | 鉄筋比(圧縮) | P' | 0.0017 |
| 設計応力度 | コンクリート [圧縮] | σ_c [N/mm ²] | 12.144 |
| | コンクリート [せん断] | τ_c [N/mm ²] | 0.095 |
| | 鉄筋 [引張] | σ_s [N/mm ²] | 824.398 |
| 許容応力度 | コンクリート [圧縮] | σ_{ca} [N/mm ²] | 12.800 |
| | コンクリート [せん断] | τ_{ca} [N/mm ²] | 1.060 |
| | 鉄筋 [引張] | σ_{sa} [N/mm ²] | 176.000 |
| 設計照査 [安全率] | コンクリート [圧縮] | $\sigma_{ca}/\sigma_c > 1.0$ | 1.054 |
| | コンクリート [せん断] | $\tau_{ca}/\tau_c > 1.0$ | 11.130 |
| | 鉄筋 [引張] | $\sigma_{sa}/\sigma_s > 1.0$ | 0.213 |
| | 各部材応力度の安全率による判定 [1.0を上回れば許容応力度以内で問題ない] | | NG |

※ひび割れ発生荷重を80kNとした場合

表-3. は試験日材齢（25日経過）のコンクリートの圧縮強度の試験結果です。
前項にて設計基準強度を 36 N/mm² と設定したのは、本試験結果によるものです。

表-3. 試験結果一覧表（圧縮強度）

| | 圧縮荷重 | 圧縮強度 |
|-------|--------|-------------------------|
| No. 1 | 278 kN | 35.40 N/mm ² |
| No. 2 | 285 kN | 36.29 N/mm ² |
| No. 3 | 278 kN | 35.40 N/mm ² |
| 平均値 | 280 kN | 35.69 N/mm ² |
| 標準偏差 | 3 | 0.42 |

※テストピースはφ100mm×h200mmを使用



写真-12. 試験日材齢での圧縮強度試験

(2) 各供試体の荷重とたわみ量の相関性

次の表は各供試体の荷重－たわみ量の相関について測定結果を整理したものです。
本表をグラフ化したものを次項に掲載します。

表-4. 試験結果一覧表（荷重－たわみ量相関）

| 無筋・無補強 | | | | 無筋・繊維布貼付 | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| a-1 (No. 1) | | a-2 (No. 2) | | b-1 (No. 3) | | b-2 (No. 4) | |
| 荷重 [kN] | たわみ [mm] | 荷重 [kN] | たわみ [mm] | 荷重 [kN] | たわみ [mm] | 荷重 [kN] | たわみ [mm] |
| 0.0 | 0.00 | 0.0 | 0.00 | 0.0 | 0.00 | 0.0 | 0.00 |
| 10.0 | -0.06 | 10.0 | 0.08 | 10.0 | 0.55 | 10.0 | 0.38 |
| 20.0 | 0.00 | 20.0 | 0.15 | 20.0 | 0.67 | 20.0 | 0.40 |
| 30.0 | 0.10 | 30.0 | 0.21 | 30.0 | 0.74 | 30.0 | 0.42 |
| 40.0 | 0.24 | 40.0 | 0.27 | 40.0 | 0.79 | 40.0 | 0.51 |
| 50.0 | 0.36 | 50.0 | 0.33 | 50.0 | 0.83 | 50.0 | 0.55 |
| 60.0 | 0.43 | 60.0 | 0.38 | 60.0 | 0.87 | 60.0 | 0.58 |
| 70.0 | 0.50 | 70.0 | 0.41 | 70.0 | 0.90 | 70.0 | 0.64 |
| 80.0 | 0.55 | 80.0 | 0.43 | 80.0 | 0.97 | 80.0 | 0.67 |
| 82.2 | 0.55 | 90.0 | 0.48 | 90.0 | 1.13 | 90.0 | 0.71 |
| | | 91.8 | 0.48 | 100.0 | 1.35 | 100.0 | 0.74 |
| | | | | 110.0 | 1.75 | 104.0 | 0.74 |
| | | | | 112.0 | 1.75 | | |

| 有筋・無補強 | | | | 有筋・繊維布貼付 | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| c-1 (No. 1) | | c-2 (No. 2) | | d-1 (No. 3) | | d-2 (No. 4) | |
| 荷重 [kN] | たわみ [mm] | 荷重 [kN] | たわみ [mm] | 荷重 [kN] | たわみ [mm] | 荷重 [kN] | たわみ [mm] |
| 0.0 | 0.00 | 0.0 | 0.00 | 0.0 | 0.00 | 0.0 | 0.00 |
| 10.0 | 0.05 | 10.0 | 0.02 | 10.0 | 0.35 | 10.0 | 0.56 |
| 20.0 | 0.20 | 20.0 | 0.05 | 20.0 | 0.49 | 20.0 | 0.63 |
| 30.0 | 0.31 | 30.0 | 0.10 | 30.0 | 0.59 | 30.0 | 0.68 |
| 40.0 | 0.41 | 40.0 | 0.15 | 40.0 | 0.68 | 40.0 | 0.73 |
| 50.0 | 0.50 | 50.0 | 0.18 | 50.0 | 0.74 | 50.0 | 0.77 |
| 60.0 | 0.56 | 60.0 | 0.21 | 60.0 | 0.80 | 60.0 | 0.80 |
| 70.0 | 0.60 | 70.0 | 0.24 | 70.0 | 0.85 | 70.0 | 0.85 |
| 80.0 | 0.65 | 80.0 | 0.28 | 80.0 | 0.91 | 80.0 | 0.89 |
| 90.0 | 0.70 | 90.0 | 0.33 | 90.0 | 0.94 | 90.0 | 0.94 |
| 96.7 | 0.75 | 91.6 | 0.35 | 100.0 | 0.99 | 100.0 | 1.02 |
| | | | | 110.0 | 1.05 | 110.0 | 1.07 |
| | | | | 120.0 | 1.16 | 120.0 | 1.15 |
| | | | | 130.0 | 1.28 | 130.0 | 1.27 |
| | | | | 140.0 | 1.44 | 140.0 | 1.53 |
| | | | | 150.0 | 1.68 | 149.0 | 1.53 |
| | | | | 160.0 | 3.53 | | |
| | | | | 164.0 | 4.35 | | |

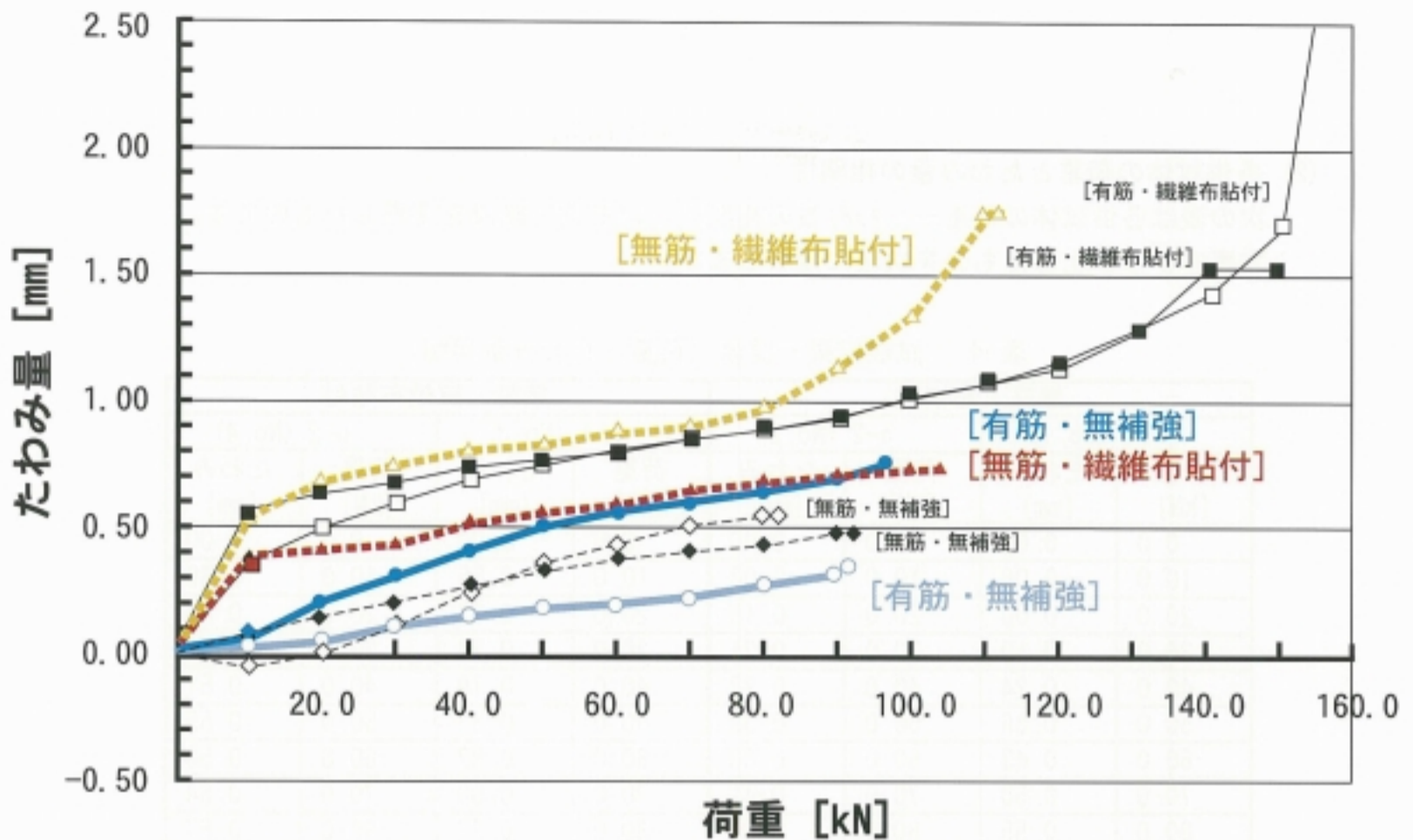


図-4. 荷重-たわみ量相関グラフ

本試験にて用いられているアラミド繊維はパラ型に分類されるもので、部材としての引張強度は少なく見ても 2.8GPa ($=2.8 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$) 以上あり、引張有効断面積がかなり小さくても鉄筋の引張強度 ($440 \sim 600 \text{ N/mm}^2$) を十分上回る能力を持っています。

それ故に、コンクリート部材の鉄筋の有無に関係なくある程度の補強効果が現れるとの想定をしていましたが、実際の結果は前項の通り [d: 有筋・繊維布貼付] の補強効果が [b: 無筋・繊維布貼付] のそれをかなり上回っています。

本グラフから読み取れた事象は次の通りとなります。

- ①初期たわみ量の変化の傾向は、校正誤差を考慮した上においても無補強 or 繊維布貼付という供試体の補強の有無による差が見られます。(接着剤のバリによる支点部分の密着性の差異と思われます。)
- ②上載荷重が $40\text{kN} \sim 80\text{kN}$ 間においては、各供試体共に荷重増量とたわみ増量の比が比較的一致しています。(接着剤とコンクリートの静弾性係数が近似しているため。)
- ③各供試体は区分毎に破壊荷重は近似していますが、繊維布貼付供試体は個別の最大たわみ量にかなりの差が見られます。

●今回試験に使用した一覧

| 製品名 | 使用量 (kg/ m ²) | 備考 |
|-----------------|---------------------------|----------------|
| PS-10G(溶剤型) | 0.3 | プライマー処理 |
| PE-10GII(無溶剤型) | 1.6 | アラミド貼付 / 下塗・上塗 |
| アラミド AK-40 一方向 | 基礎サンプル両面の全面に貼付 | |

③の最大たわみ量の差異については、写真-13, 14. と合わせて検証してみると次の事が解ります。[b : 無筋・繊維布貼付]と[d : 有筋・繊維布貼付]の供試体の破壊の仕方は、アラミド繊維が破断する前に接着剤による接着面の剥離し、塑性変形が進行して上載荷重の測定値が低下するという事象で一致しています。ここで、アラミド繊維布の両面貼付による補強効果は、接着剤による接着性能に影響される部分が大きい事が見て取れます。



写真-13. 供試体の破壊状況 [b-1 : 無筋・繊維布貼付]



写真-14. 供試体の破壊状況 [d-1 : 有筋・繊維布貼付]

5. 考 察

今回の試験結果から、アラミド繊維布の両面貼付による部材補強のメカニズムについて次のような推定ができます。



写真-15. 供試体底面の破壊ひび割れ [b-1：無筋・繊維布貼付]



写真-16. 供試体底面の破壊ひび割れ [d-1：有筋・繊維布貼付]

前項の写真-15, 16. を見ると、アラミド繊維布を貼付した供試体は鉄筋の有無に関係なく2つのひび割れが交差（×）する形で発生しています。それに対して他の供試体は、基本的に1つのひび割れ（－）しか発生していません。

これは、両面に貼付されたアラミド繊維布の間で、コンクリート部材が曲げによる「変形」に対しての「拘束」が作用している事が見て取れます。

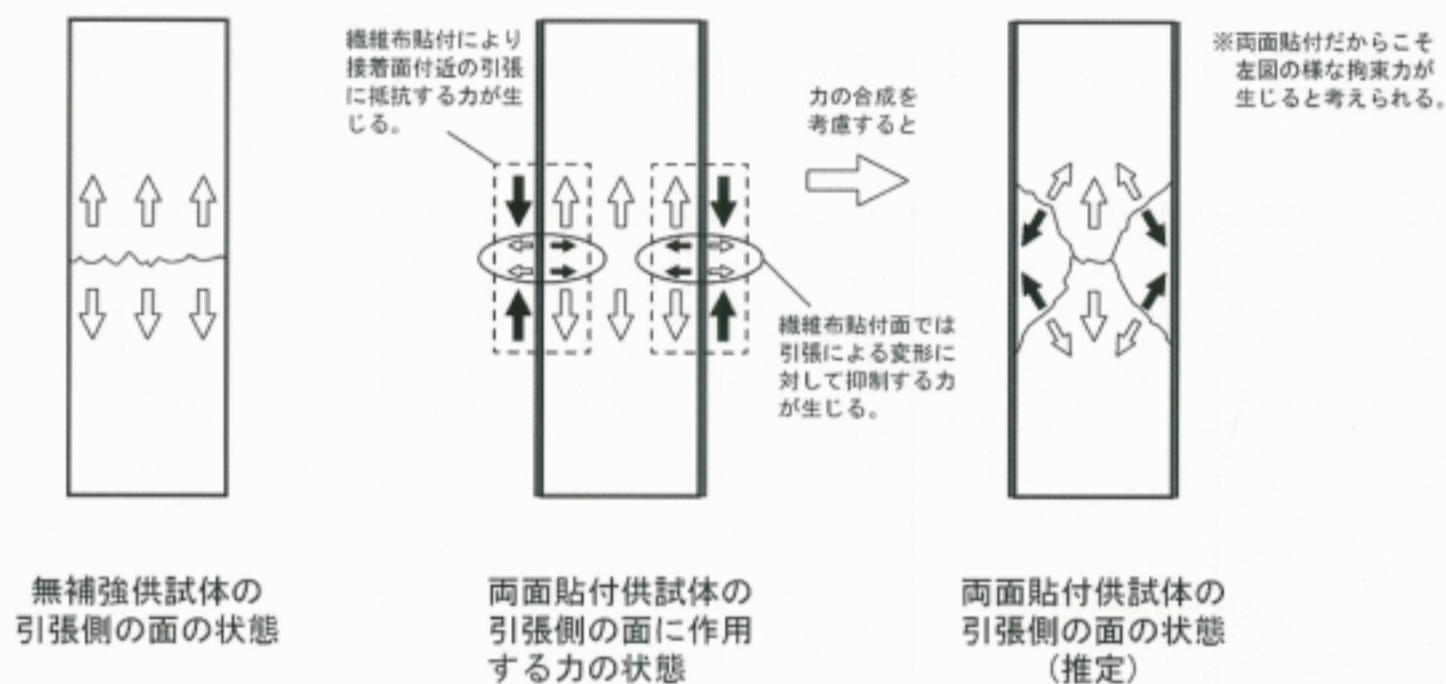


図-5. 両面貼付による変形拘束力の概念図

図の様な拘束効果を考慮に入れた上で、写真-14, 15. を比較すると[b-1：無筋・繊維布貼付]の方が拘束状態を示すデルタ部分が小さい事が見て取れます。これは拘束力が弱い事を示す傍証ではありますが、この場合の拘束力の大小は接着剤の接着強度の差ではなく、降伏状態にありながらも部材の破断を抑止した鉄筋の存在にあると思われれます。

両面貼付した供試体はその内側で完全に破断してしまった場合、実質接着剤にて固めたアラミド繊維布の板2枚で上載荷重を支える構造になってしまい、接着面により負荷が掛かり剥がれ易くなったと思われれます。この推論で[b：無筋・繊維布貼付]の補強効果が予想より低かった事についての説明はできます。

今回の試験で解る事との1つに、繊維布の引張強度が十分以上であるため繊維布のコンクリートに対する接着性が補強後の強度発現に関係している事です。上記の推定も併せて、変形に対する拘束力は繊維布とコンクリートの接着力にかなり依存していると考えられれます。これは、試験結果の項において説明した通り、供試体破壊時に繊維布が破断する前に接着剤ごと剥がれてしまっている事からも見て取れます。しかし、接着部の破壊はコンクリートの表面剥離によるものであるため、接着剤の接着強度も十分以上発揮されていると考えられれます。