

論文 ビニロン短繊維を混入した低弾性モルタル部材の疲労特性に関する実験的研究

篠崎 裕生^{*1}・浅井 洋^{*2}・三加 崇^{*1}・平 喜彦^{*3}

要旨：収縮特性やワーカビリティなどを改善したモルタルに極細のビニロン短繊維を混入し、ひび割れ性状を向上させた低弾性高じん性モルタルを開発した。本材料は、所要の圧縮強度を得ながら弾性係数をコンクリートの半分程度に低減でき、かつ、ひび割れ分散性が非常に優れていることから柔な挙動を要求される接合部などでの利用に適している。本文では、この材料の繰返し荷重に対する抵抗性を明らかにするため、鉄筋両引き試験体の疲労試験により引張特性の変化を確認した。また、梁の曲げ疲労試験を実施し、一般の鉄筋コンクリート試験体との挙動の違いを比較した。

キーワード：ビニロン短繊維, 低弾性, モルタル, 疲労試験, 鉄筋両引き試験

1. はじめに

開発した低弾性高じん性セメント系複合体は、いわゆる複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (HPFRCC¹⁾) の一種である。モルタルの性状を改善する種々の材料をほとんど粉体化し、事前に混合・存置できる状態にしておくことで、練り混ぜ時にはこの特殊粉体と水と短繊維を混合するだけとしている。こうすることで、通常の生コンクリート工場であっても空きセメントサイロを確保するだけで容易に製造することが出来る。

特殊粉体は、ポルトランドセメント、石灰石微粉末、膨張材を主成分とし、粉末減水剤、粉末収縮低減剤、天然砂などをプレミックスしている。使用する短繊維は径 40 ミクロン、長さ 12mm のビニロン短繊維 (図-1) で、混入率は 2vol% である。

本材料は、一般のコンクリートと同等の強度を有しているながらその弾性係数をコンクリートよりも 3~4 割以上低減させることができる。このため、例えば図-2 左に示すような主桁同士を連結する場合の材料として利用が考えられる。当該連結部材には比較的大きな断面力が作用するが、材料の弾性係数が小さいため発生応力度を抑えることができる。また、ひび割れが生じた場合でもビニロン短繊維により、その幅を抑制する効果が期待できる。このような設計上のメリットを生かしつつ、連結部の構造を大きく簡素化した図-2 右のような連結床版を用いた構造も施工されている²⁾。

ビニロン短繊維の効果については、ひび割れ分散性や幅の抑制といった引張力に対する性状の改善が着目されるが、HPFRCC においても現状では設計に反映させるまでには至っておらず、本材料も含めて今後の研究およびデータの蓄積が求められている。

ここでは、本材料に繰返し荷重が作用した時の性状の変化に着目した実験検討を行った。本材料の引張特性に着目した実験として、鉄筋両引き試験を静的および繰返し荷重のもとで行った。これにより本材料の引張応力-ひずみ関係を確認するとともに、ビニロン短繊維の負担が繰返し荷重によりどのように変化するかを検討した。

次に、図-2 右の床版連結構造の床版部分を想定した梁供試体を製作し、鉄筋に許容応力度程度の引張り力が生じるような荷重を繰返し与えて、その挙動の変化を確認するとともに、同じ諸元の鉄筋コンクリート梁 (以下、RC 梁と呼ぶ) との比較検討を行った。



図-1 使用したビニロン短繊維



図-2 床版連結構造

*1 三井住友建設 (株) 技術開発センター土木 PC グループ (正会員)

*2 三井住友建設 (株) 技術開発センター土木 PC グループ長 (正会員)

*3 三井住友建設 (株) 土木本部土木設計部 PC 設計グループ長

2. 鉄筋両引き試験

2.1 試験の概要

鋼繊維補強コンクリートなどの引張特性を調べる方法として、鉄筋の両引き試験（以下、両引き試験）が提案されており、従来の円柱供試体を用いた割裂試験や、直接引張試験による方法と比較して高い精度を有していることが知られている³⁾。

図-3 に両引き試験で用いた供試体の形状寸法を示す。鋼材には M16（JISG4107 SNB7）を用いた。鋼棒にはひずみゲージ貼付位置を除いてネジ加工が施されている。モルタル部分は長さ 400mm で□100mm の断面を有しており、中央位置に深さ 10mm の切り欠きを設けた。切り欠き位置にはπ型変位計を 2 箇所取り付けひび割れの幅を計測した。鋼棒のひずみゲージはモルタルの切り欠き位置（内ひずみと呼ぶ）とモルタル外（外ひずみと呼ぶ）にそれぞれ 2 枚ずつ貼り付けた。内ひずみ用ゲージ貼付け位置では文献³⁾にしたがって約 50mm の付着除去区間を設けている。なお、ひずみゲージ位置の鋼棒の外径は 13.5mm である。

載荷方法は静的単調載荷を 1 ケース、繰返し載荷を 7 ケース実施した。静的単調載荷は、鋼棒が降伏する前の約 100kN の荷重まで単調に載荷した。繰返し載荷は、表-1 に示す荷重を上限荷重、下限荷重を 5kN とした。載荷速度は 1.5Hz である。使用したモルタルの材料特性値を表-2 に示す。載荷試験は、充分強度が発現した材齢 87～110 日で実施した。

2.2 試験結果

(1) 静的単調載荷

単調載荷では、まず、5～10kN で切り欠き位置でひび割れが発生し、さらに荷重を上げると切り欠き位置以外でも複数のひび割れが生じた。図-4 上は内・外ひずみ値（それぞれ 2 箇所の平均）と荷重の関係を示している。内ひずみは、ビニロンの引張り負担により外ひずみ（鋼棒のみのひずみ）よりも小さく推移しており、その傾向は鋼棒のひずみが 3000μ 以上になっても持続していた。

図-4 下は、両引き試験から得られたモルタルの引張応力-ひずみ曲線である。モルタルの引張応力は、図-4 上の内・外ひずみ曲線の縦距離（荷重差）をモルタルの分担力とし、これを切り欠き断面積で除して求めた。図には、繰返し載荷用供試体の載荷開始時に所定荷重まで単調に載荷した履歴から求めた値も 3 ケース併記した。

図より、ばらつきはあるが引張応力が 0.75～1.5N/mm² でひび割れが発生してひずみが急増し、1.2～1.4N/mm² を保持したまま 2000μ 程度まで推移し、その後、徐々に引張り応力が低下する曲線が得られた。このように、本モルタルは非常に大きなひずみまで引張応力を負担することができる材料であることが分かる。

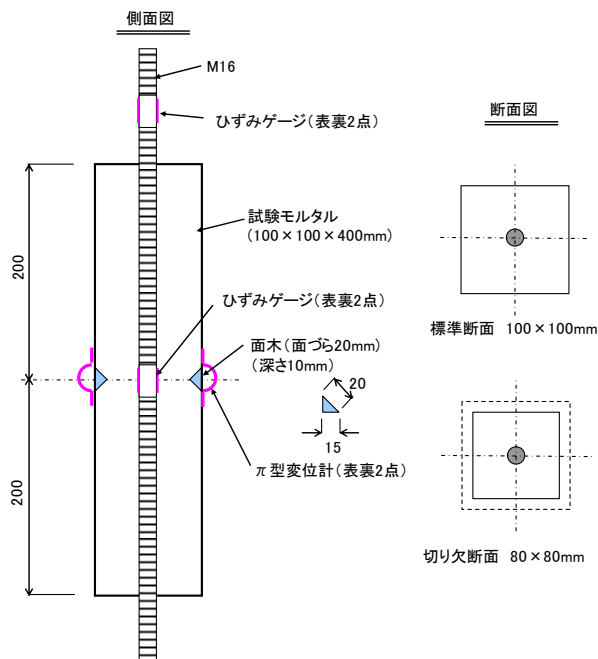


図-3 両引き試験供試体

表-1 繰返し荷重試験ケース

載荷ケース	荷重(kN)	鋼棒応力度 (N/mm ²)
1～7	20,25,30,35, 55,60,80	140,175,210,245 384,419,559

下限荷重はいずれも 5kN

表-2 モルタルの材料特性値

材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
87	45.6	3.88	18500
105	48.0	4.26	18400

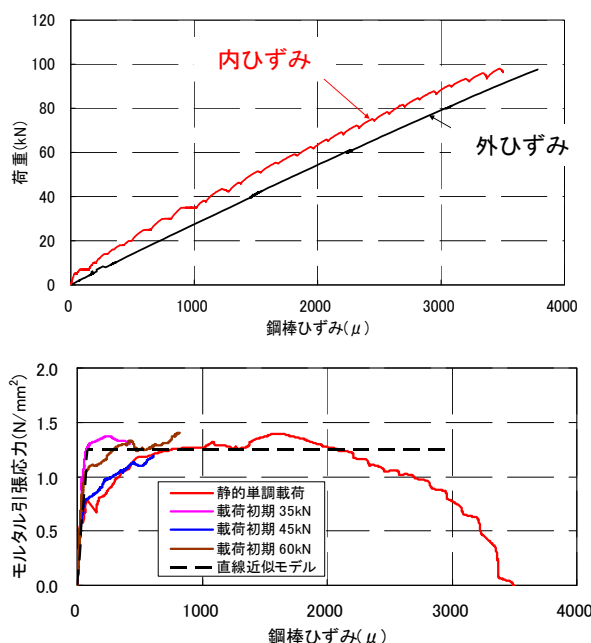


図-4 両引き試験結果

(2)繰返し载荷

図-5 は、上限荷重 35kN の場合の経過時間と内・外ひずみの挙動の変化を示している。振幅中央の荷重 (20kN) まで単調に増加させた後、繰返し载荷を実施すると、外ひずみ (以降、外ひずみ) が約 200~1240 μ で変動するのに対し、内ひずみは約 500~900 μ と小さい範囲で変動する。その後、繰返し载荷を続けると内ひずみの振幅が徐々に大きくなり、本ケースの場合約 2 万回で収束した。図に示すように収束後の変動は 600~1500 μ となり、振幅は約 900 μ でほぼ外ひずみの振幅 (約 1000 μ) と同等になることが分かる。

収束後の内ひずみの挙動は、外ひずみの挙動を 300 μ 程度上にスライドしたものとなっていた。スライドするひずみ量は荷重ケースにより変動するが、この傾向自体は変動荷重の最も小さい 20kN のケースを除いて生じていた。これの明確な理由は現時点では不明であるが、ひび割れ近傍の鋼棒とモルタルが付着切れすることによって摩擦が生じ、発熱することも一つの要因と考えられる。

図-6 は、上限荷重 25kN と 35kN のケースを例として、横軸に繰返し回数、縦軸に内ひずみ (左軸) と切り欠き位置のひび割れ幅 (右軸) の最大値の変動を示したものである。最大荷重 25kN のケースを見ると载荷開始とともに徐々にひずみ値とひび割れ幅が増加するが、約 8 万回から 12 万回にかけて両値の急激な増加が見られ、その後一定値に収束した。35kN のケースでも同様の傾向が見られた。

図-7 は、各ケースにおける载荷初期と収束後のひび割れ幅を示している。図には単調载荷におけるひび割れ幅の変化も併記しており、初期ひび割れ幅はこの値とほぼ等しい。繰返し载荷によってひび割れ幅は 0.1~0.2mm 程度増加して収束するが、この時点で、ビニロンの架橋効果は大きく低下しているものと考えられる。一方、上限荷重が 20kN のケースでは、40 万回の繰返し载荷を行ったが初期ひび割れ幅からの増加がほとんどなく、ビニロンの引張負担が持続していたことが考えられる。

図-8 は図-5 で示した内ひずみの振幅の変化に着目し、その繰返し回数との関係を図化したものである。縦軸は、ビニロン短繊維の効果残存率とした。これは、载荷開始時点の振幅量を残存率 100%、外ひずみの振幅量まで増加した時点で残存率が 0%になっていると仮定したものである。図から、最大荷重 20kN では、40 万回を越えても振幅の変化はほとんどなく、残存率はほぼ 100% で推移することが分かる。一方、最大荷重が 25kN 以上になると、ある時点で残存率が大きく低下し、最終的には 10~20% 程度の残存率に落ち着くことが分かる。

荷重が 20kN 時の鉄筋の応力は 140N/mm²、切り欠き位

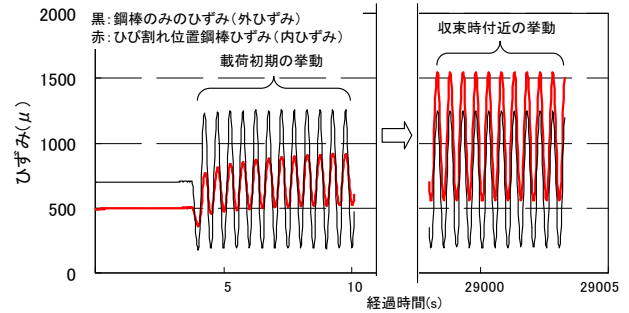


図-5 繰返しによる挙動の変化

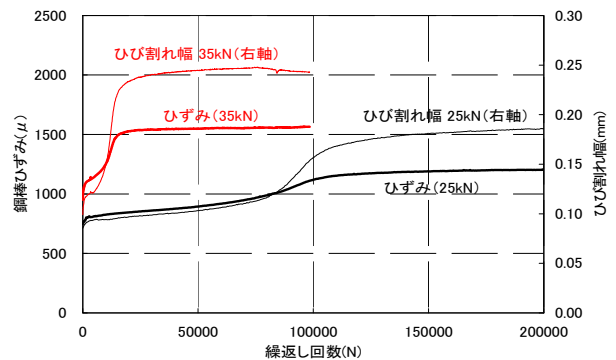


図-6 ひずみとひび割れ幅の推移

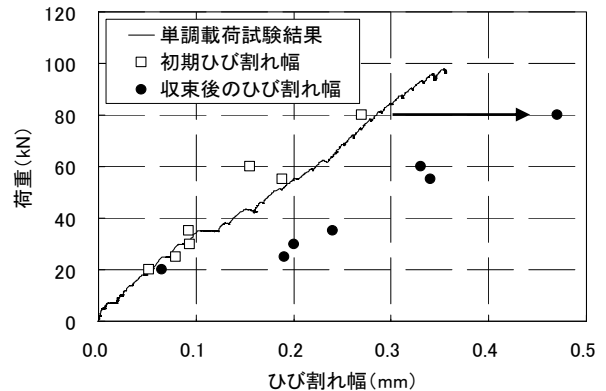


図-7 ひび割れ幅の変化

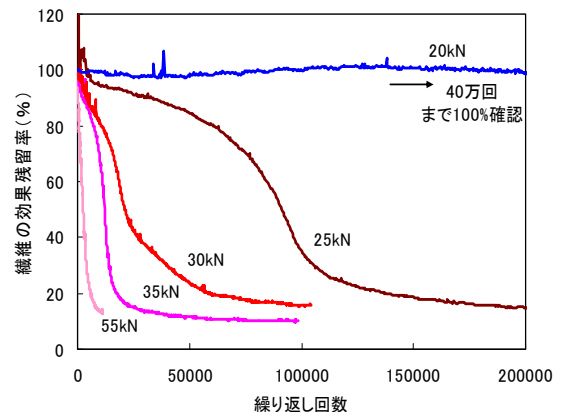


図-8 ビニロン短繊維の効果残存率の変化

置のひび割れ幅は、約 0.05mm（図－7）であり、ビニロンの効果を消失させないための一つの目安となる。

3. 梁供試体の繰返し載荷試験

3.1 試験の概要

図－9 に試験体の形状寸法を示す。試験体は図－2 の連結床板を部分的に切り出したものを想定し、低弾性モルタルを用いた梁（M）と通常の鉄筋コンクリート梁（RC）の 2 試験体とした。断面は 375mm×200mm で、せん断スパン長 850mm、主鉄筋の有効高さは 141mm でせん断スパン比は約 6.0 である。主鉄筋には D22 を使用し、梁の断面積に対する主鉄筋断面積の比を 3.1%とした。両引き試験体の鋼材 M16 の断面積を切欠き断面積で除して求めた鋼材比も 3.1%である。

主鉄筋の降伏強度は 386N/mm²、引張強度は 560N/mm²であった。試験開始時（材齢 31 日）のコンクリートおよびモルタルの物性値を表－3 に示す。モルタルの弾性係数はコンクリートの約 55%しかないが、曲げ強度は 2 倍以上を有している。

載荷方法は、2 点支持 2 点載荷曲げ試験とし、載荷荷重の上限値は、36.7kN、下限値は 12.0kN とした。載荷方法は、荷重を上限値と下限値の間で繰返して 200 万回載荷した。荷重上限値は、活荷重相当として鉄筋の引張応力が 120N/mm²に達する荷重とした。これは、両引き試験においてビニロンの効果が消失しなかった 20kN のケース（鋼棒応力度は 140N/mm²）および鉄筋の許容応力度（140N/mm²）を若干下回る荷重となる。荷重下限値は床板死荷重時を想定した荷重である。このとき鉄筋応力度は 40N/mm²となる。

これらの荷重値は、道路橋示方書に準じて材料の応力－ひずみ特性をモデル化してファイバーモデルにより断面計算を行い求めたものである。コンクリートおよびモルタルの設計圧縮強度は 30N/mm²とし、低弾性モルタルのビニロンの効果は考慮していない。

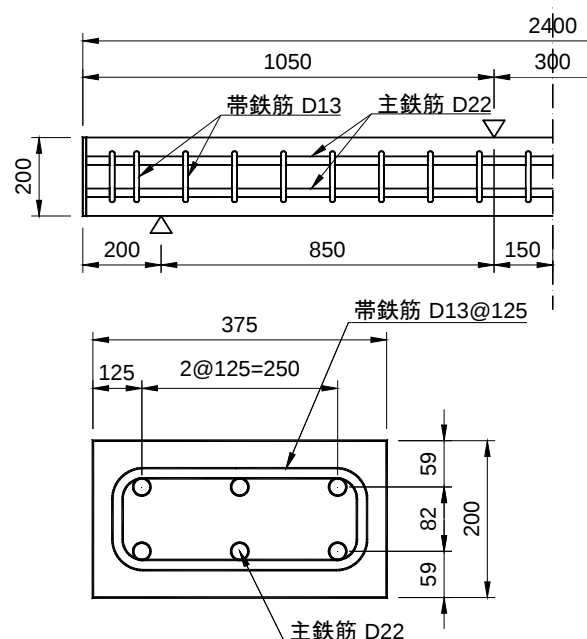
計測項目は、梁の変形、鉄筋およびコンクリート表面のひずみ、主要なひび割れの幅で、所定の繰返し回数に達した時点で静的に下限～上限荷重を 1 回載荷して計測した。レーザ式変位計を一部用いており、これらは繰返し載荷の間も計測を行った。

3.2 試験結果

(1)初期静的載荷

繰返し載荷試験結果を示す前に、まず、上限荷重まで単調に載荷した結果から、低弾性モルタル梁の挙動を簡単に考察する。図－10 に両試験体の梁中央のたわみと荷重の関係を示す。

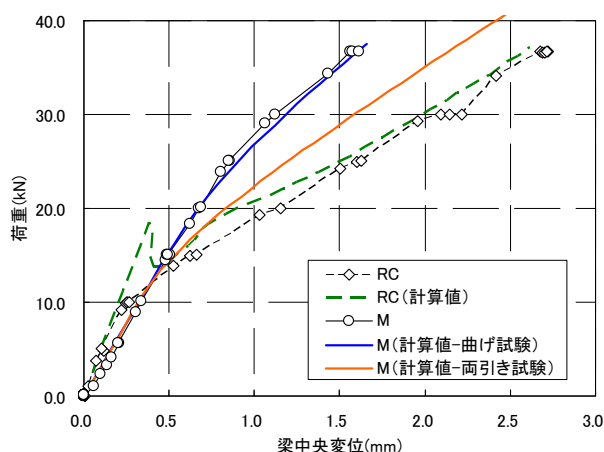
RC 梁は、10kN 程度の荷重でひび割れが発生して剛性が低下した後、一定の剛性を保持したまま上限荷重に達



図－9 梁試験体形状寸法

表－3 コンクリート・モルタルの材料特性値

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)
RC	34.5	3.03	28300	4.14
M	38.0	3.20	15700	9.57



図－10 載荷初期の荷重－たわみ関係

している。一方、低弾性モルタル梁（M）では、初期の剛性は RC よりも小さく推移するが、ひび割れが生じても剛性の低下は小さいことが分かる。

図に併記した計算値は、ファイバーモデルによって計算した値である。材料特性は試験値を用い、コンクリートおよびモルタルの圧縮側の応力－ひずみ関係は、圧縮試験結果を道路橋示方書に示されたモデルにフィッティングして用いた。引張側の応力－ひずみ関係については、RC 梁については、引張強度に達した後すぐに引張

応力がゼロになるモデルを用いた。一方、低弾性モルタルでは、図-11に示す両引き試験の結果を直線で簡易にモデル化したものと、 $100\text{mm} \times 400\text{mm}$ の供試体の曲げ試験の結果をファイバーモデルにより逆解析することによって求めた応力-ひずみ関係を適用することを試みた。

図-11 左はそれぞれの試験から設定した応力-ひずみ関係、右は曲げ試験をシミュレーションした結果である。なお、ファイバーモデル計算における断面の分割幅は 5mm 、梁軸方向の分割幅は 20mm とした。これは、梁の解析において、それぞれ40分割、50分割となり、道路橋示方書で推奨している分割数とほぼ一致する。

図-10の低弾性モルタル梁の計算値との比較から、モルタルの引張応力-ひずみ特性に両引き試験の結果を用いるとひび割れ以降の剛性を小さめに評価することが分かった。両引き試験結果を梁の曲げ挙動のシミュレーションに用いる際には注意が必要である。一方、曲げ試験から求めた応力-ひずみ関係は実験結果とよく一致しているが、比較的ばらつきの大きい $100\text{mm} \times 400\text{mm}$ の曲げ試験結果を元に推定する点や、ファイバーモデルで曲げ試験を解析するという手間もあり、その設定方法には課題が残る。

(2)繰返し載荷

図-12に初期静的載荷直後と200万回の繰返し載荷後のひび割れの発生状況を示す。RC梁では200万回繰返し載荷によって新たなひび割れはほとんど発生せず、ひび割れが若干進展する程度である。低弾性モルタル梁では初期静的載荷直後のひび割れ本数や長さがRC梁よりもかなり少ないことが分かる。これはビニロン短繊維がひび割れ面で引張力を負担していることによる。

一方、繰返し載荷がひび割れ性状に与える影響については低弾性モルタル梁の方がRC梁よりも大きく、ひび割れ本数が倍以上に増えるとともに、既存のひび割れの進展も比較的大きい。しかしながら、繰返し載荷によって新たに発生したひび割れは支点近くまで達しており、RC梁よりも短いひび割れが分散する傾向にあることから、低弾性モルタル梁は変形やひび割れが集中し難い構造であることが分かる。

載荷開始後のひび割れは1万回程度までの間にほとんどが生じていた。また、等曲げ区間に発生したひび割れのいくつかに亀裂変位計を付けてひび割れ幅を観察した結果、低弾性モルタル梁のひび割れ幅はRC梁の半分程度であった。

図-13は梁中央変位の変化を示している。横軸は対数表示としている。両試験体とも徐々に変位が大きくなる傾向を示しており、10万回を越えるとその傾向が顕著になるものの、載荷初期からの増加量は200万回でも 1mm 程度と十分に小さな値である。低弾性モルタル梁の変位

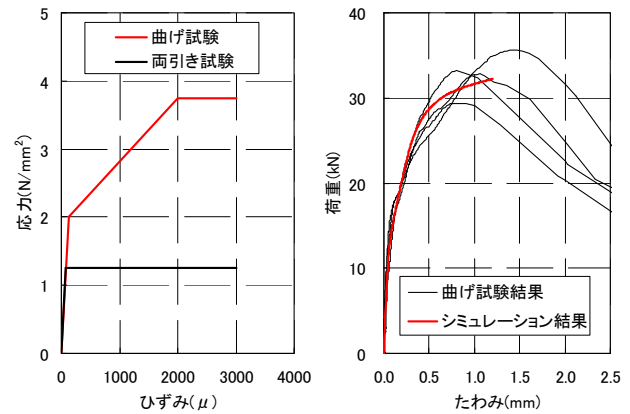


図-11 引張ひずみ-応力関係と曲げ試験のシミュレーション

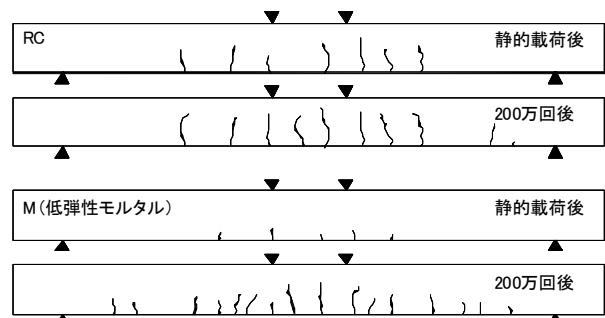


図-12 ひび割れ発生状況

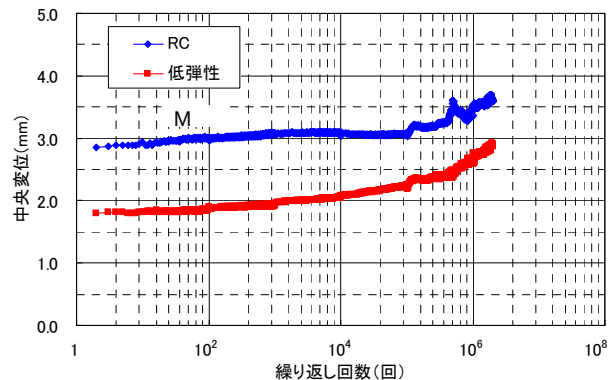


図-13 梁中央変位の変化

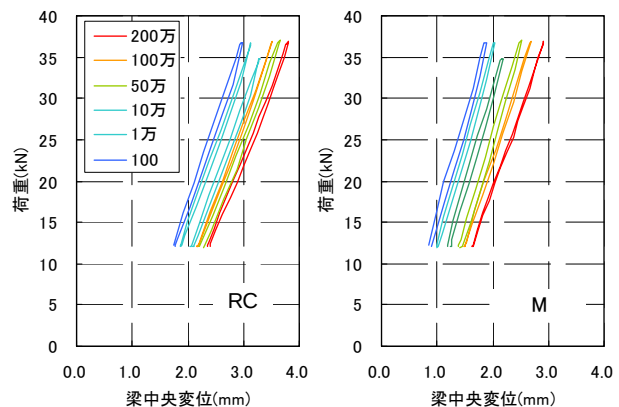


図-14 梁の剛性変化

M

が RC 梁よりも小さく抑えられる傾向は 200 万回到達後でも変化はなく、ビニロンの効果が有効であることを示している。

次に、梁の中央変位と荷重の関係を図-14 に示す。主要な繰返し回数時点における変位-荷重曲線は、残留ひずみの増加にともない右側にスライドしている。曲線の傾きで表される梁の剛性は繰返し回数の影響はそれほど大きくない。図-15 は、横軸を繰返し回数として梁の剛性(図-14 の曲線の傾き)の変化を見たものである。両試験体ともに、繰返し载荷開始直後から徐々に剛性が低下し、50 万回以降顕著となっている。低弾性モルタル梁の剛性低下が若干大きい、200 万回到達後でも RC 梁よりも大きな剛性を保持していた。

図-16 は引張側鉄筋と圧縮縁コンクリートのひずみの変化を示したものである。いずれも、等曲げ区間の 2 つの計測点の平均値を示している。ひずみの符号は+が引張ひずみを示している。

RC 梁、低弾性モルタル梁とも繰返し载荷により鉄筋は引張ひずみが、コンクリートは圧縮ひずみが増加する傾向は同様であり、その増加の度合いも同程度であった。200 万回繰返し後においても、低弾性モルタル梁のひずみは、鉄筋・コンクリートともに RC 梁よりも小さな値で推移しており、この程度の繰返し回数であれば、ビニロンの効果は消失しないことが分かった。

以上の通り、作用荷重が同じであれば低弾性モルタル梁はビニロンの効果により、鉄筋やコンクリートのひずみを抑え、その負担を減らすことが出来る。現時点では、設計上この効果を考慮するには至っていないが、今後更なる検討を進め、この材料を有効に利用する手法や部材開発を進める予定である。

4. まとめ

所要の圧縮強度を確保しつつ弾性係数をコンクリートの半分程度に低減したビニロン短繊維混入モルタルを開発し、繰返し荷重下における両引き試験および梁の曲げ試験を実施した。その結果、以下が明らかとなった。

- (1) 両引き試験により、ビニロン短繊維の引張り負担が非常に大きな引張ひずみ(通常の鉄筋降伏ひずみの倍程度)まで持続することが分かった。
- (2) 荷重振幅を変えた両引き試験の繰返し载荷の結果、鉄筋上限応力度が 140N/mm^2 以下であれば、40 万回以上の繰返しにおいてもビニロン短繊維の効果は消失しないことが分かった。
- (3) 梁の曲げ変形挙動は、RC 梁と同様にファイバーモデルで計算が可能である。その際、低弾性モルタルの引張応力-ひずみ挙動に両引き試験の結果を導入すると、梁の剛性を小さく評価することが分かった。

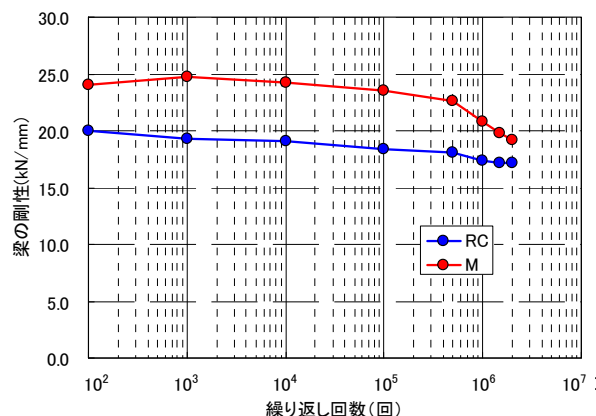


図-15 梁の剛性変化

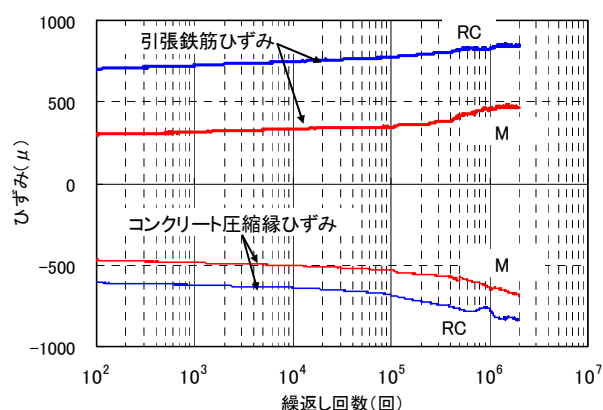


図-16 鉄筋およびコンクリートひずみの変化

- (4) $100\text{mm} \times 400\text{mm}$ を用いた曲げ強度試験における荷重-たわみ関係から求めた低弾性モルタルの引張応力-ひずみ関係を用いると、梁の挙動を精度良く計算できることが分かった。
- (5) 鉄筋応力度を 120N/mm^2 以下に抑え、200 万回の繰返し载荷をした結果、その性能に大きな変状は見られなかった。また、繰返し载荷が梁の剛性や材料のひずみに与える影響は RC 梁と同程度であった。

参考文献

- 1) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案), 2007.3
- 2) 谷口秀明, 佐々木亙, 樋口正典, 川上明大：低弾性高じん性セメント系複合体の開発, プレストレストコンクリート技術協会第 19 回シンポジウム論文集, pp.339-342, 2010.10
- 3) 趙 力采, 小林一輔：鋼繊維補強コンクリートの引張強度試験方法に関する研究, コンクリート工学, Vol.17, No.9, pp.87-95, 1979.9
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002