論文　楔挿入試験による繊維長の長い FRC の引張特性の評価

守田　貴昭[*1]・酒井　天河[*2]・内田　裕市[*3]

要旨：繊維長の長い FRC の材料試験の簡便化を検討することを目的として，曲げ供試体に比べコンパクトな供試体が利用可能な楔挿入試験を行った。60mm の鋼繊維を使用し，楔挿入試験を行う場合の課題の検討と，楔挿入試験から得られる結果と曲げ試験から得られる結果を比較検討した。試験の結果，200×200×800mm の供試体の曲げ試験に対し 100×100×400mm の供試体の曲げ試験や本試験の楔挿入試験は引張軟化曲線の応力が高く推定される傾向があった。しかし引張軟化曲線の形状には大きな差はないため，応力が増加することを考慮しておけば，繊維長の長い FRC の材料試験として楔挿入試験は有用であることが示された。

キーワード：繊維補強コンクリート，楔挿入試験，曲げ試験，寸法効果

1. はじめに

通常の繊維補強コンクリート（FRC）においては，繊維長のより長いものを用いた方が引張強度，靭性などの力学特性が向上することが経験的に知られている。しかしながら，長い繊維を用いる場合の課題の一つとして材料試験が困難になることがあげられる。すなわち，一般に繊維補強コンクリートの材料特性試験では曲げ試験が行われるが，土木学会の規準によれば繊維長が 40mm を超える場合には曲げ供試体の断面寸法を 150×150mm とし，長さは供試体高さの 3.5 倍以上とすることが規定されている [1)]。そのため，供試体の重量は通常用いられている 100×100×400mm 曲げ供試体の約 3 倍（30kg 程度）となり，試験に要する労力は非常に大きくなる。また供試体の体積のほとんどは破壊特性にはほとんど関係のない部分（せん断スパン）の体積であり，試験後には多量の廃棄コンクリートが生じる。さらに，一般に繊維補強コンクリートの曲げ特性は通常のコンクリートに比べばらつきが大きいため，供試体数を多く要するため廃棄コンクリートの量はさらに多くなる。

そこで，筆者らは繊維長が 60mm の FRC の引張特性を評価するため，100×100×400mm と 200×200×800mm の曲げ供試体を用いた曲げ試験を行い，試験結果から推定される引張軟化曲線の比較を行った [2)]。なお，断面寸法 200×200mm の供試体を用いたのは繊維長が 60mm のため，土木学会規準の 150×150mm では小さいと考え，従来，繊維長が 30mm 程度の場合，100×100×400mm の供試体が用いられることが一般的であることを考慮し，これと同一の寸法比率としたためである。その結果，100×100×400mm 供試体の方が 200×200×800mm 供試体より 2 割程度引張応力が高くなり供試体寸法の影響が明確に現れる結果となったが，引張軟化曲線の概形に大きな差はないことが明らかになった。

本研究では繊維長の長い FRC の材料試験の簡便化を検討することを目的として，曲げ供試体に比べコンパクトな供試体が利用可能な楔挿入試験を対象として，楔挿入試験を行う場合の課題について検討するとともに，楔挿入試験から得られる結果と曲げ試験から得られる結果を比較検討した。さらに，200×200×800mm の供試体から 100×100×400mm の供試体を切出して曲げ試験を行う方法についても検討した。

2. 予備試験

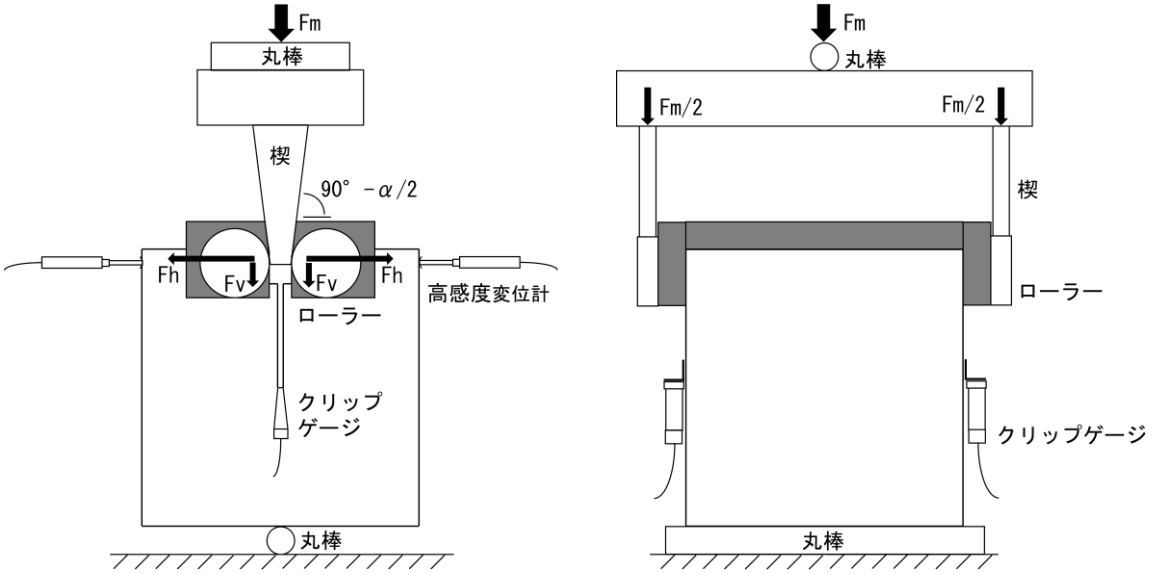
2.1 楔挿入試験の概要

図－1 に楔挿入試験の概要を，**図－2** に供試体の形状寸法示す。楔挿入試験は，金属分野の破壊力学試験で用いられているコンパクトテンション試験を圧縮試験機を用いて行うものである。供試体のリガメント部（破断面）に引張力を作用させるために，コンパクトテンション試験では供試体を直接引っ張るのに対して，楔挿入試験では，供試体に取り付けたローラー間に楔を圧入することで引張力を作用させる。そのため，楔挿入試験に用いる供試体には，**図－1** に示すように楔からの水平力（押し広げる力）を作用させるための溝と切欠きを設けるのみでよく，あらかじめ治具を埋め込んだりする必要はない。角度 α の楔を荷重 Fm で挿入すると，楔とローラー間に摩擦がないと仮定すれば，供試体に $Fh=Fm/(2\tan(\alpha/2))$ の水平力 Fh を作用させることができる。なお，楔から作用する鉛直方向の圧縮力は本実験では，α=15.3°とした楔を用いることから，水平力の 1/4 程度であり破断面に作用する圧縮応力はコンクリートの圧縮強度に対して十分に小さく無視できる。

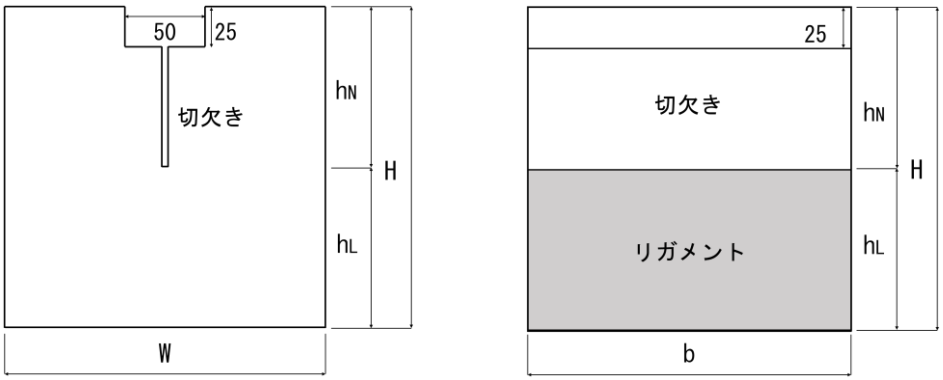
2.2 供試体の形状寸法と切欠きの深さ

*1 岐阜大学大学院　工学研究科　社会基盤工学専攻　(学生会員)
*2 岐阜大学　工学部　社会基盤工学科
*3 岐阜大学　工学部社会基盤工学科教授　博士(工学)　(正会員)

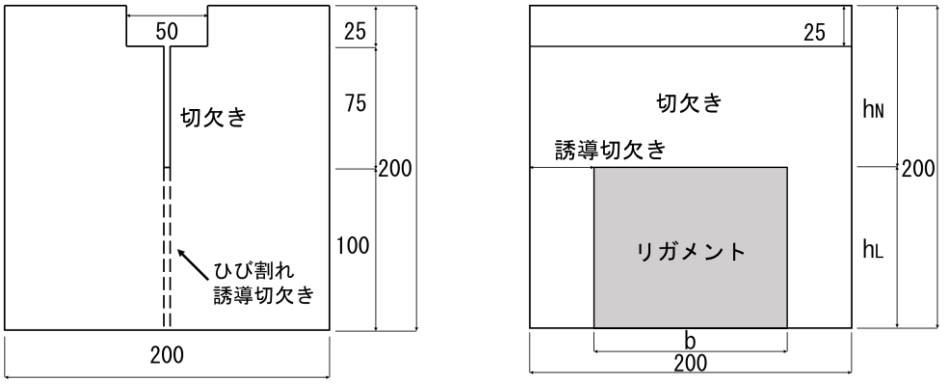
楔挿入試験に用いる供試体の形状寸法，および載荷方法を検討するため，石黒らによる既往の研究 [3]を参考に予備試験を行った。本研究では長さ 60mm の繊維を用いた FRC を対象とすることとした。曲げ試験の場合，土木学会の規準によれば繊維長が 40mm を超える場合には供試体の断面寸法は 150×150mm とされていることから，これに準じ，楔挿入供試体として 1 辺が 150mm（S サイズ）と 200m（L サイズ）の立方供試体を用いることを基本とした。また高さ 150mm，幅 200mm（M サイズ）とした供試体も作製した。水平力を作用させるための供試体上部の溝は深さ 25mm，幅 50mm で一定とした。楔挿入試験の場合，曲げ試験と異なり，切欠き先端には楔からの水平力による曲げ作用により，**図－1** において，鉛直方向と水平方向の引張力が作用する 2 軸引張状態となる。そのため，鉛直方向と水平方向の引張力の比率によっては，ひび割れは鉛直方向に進展しない可能性がある。



図－1　楔挿入試験の概要　左：正面図　右：側面図



（a）誘導切欠きのない供試体



（b）誘導切欠きのあるＬサイズ供試体

図－2　楔挿入供試体の形状寸法　左：正面図　右：中央断面図

そこで，**表－1** に示すように供試体寸法，切欠き深さ，およびひび割れを鉛直方向に誘導するための切欠きの寸法をパラメータとして載荷試験を行った。

2.3 使用材料および配合

表－2 にコンクリートの配合を示す。セメントは早強ポルトランドセメント，細骨材は揖斐川産の川砂，粗骨材は揖斐川産の川砂利を使用した。繊維は鋼繊維（繊維長 60mm, 繊維径 0.75mm, 引張強度 1080N/mm^2）とした。混和剤には高性能減水剤を使用した。繊維の混入率は 1.0vol%とした。

2.4 載荷方法

試験には容量 100kN の精密万能試験機を使用した。ひび割れ先端開口変位(CTOD)を計測するために供試体の表面と裏面の切欠き先端部にクリップゲージを設置した。また，水平力作用点（楔とローラーとの接点）位置での水平方向変位を計測するために，供試体の両側面に高感度変位計を取り付けた。

試験機のテーブル上に置いた丸棒上に供試体を設置し，分配ビームに固定された楔を自重のみで挿入して載荷の初期状態とした。その後，試験機のクロスヘッドを降下させて載荷を開始した。載荷速度は載荷開始からほぼ 10 分程度で載荷を終了するようにした。

2.5 予備試験の結果

試験後の供試体の破壊状況の一例を**図－3** に示す。**図－3（a）** に示すように，S サイズ供試体のように幅が小さいものや M サイズ供試体のように切欠き深さが相対的に浅い（断面高さの 0.3 倍）供試体では，切欠き先端から斜め方向にひび割れが進展し，複数のひび割れを伴って破壊した。そこで，L サイズ供試体において切欠き深さを断面高さの 1/2 まで深くした（**図－3（b）左**）。しかし，ひび割れは斜め方向に進展する結果となった。そこで，ひび割れを鉛直方向に誘導するために供試体の表裏面に誘導切欠きを設けることとした。切欠き深さを断面高さの 1/2 として表裏面のひび割れ誘導切欠きの深さをそれぞれ 30mm とした供試体（**図－3（b）中央**）では，ひび割れは誘導切欠きに沿って進展するものの，水平方向のひび割れも発生した。一方，切欠き深さを断面高さの 1/2 として誘導切欠きの深さを 50mm とした供試体（**図－3（b）右**）では切欠き先端から 1 本のひび割れが誘導切欠きに沿って進展し破壊に至った。

以上より本試験では切欠き深さは断面高さの 1/2 とし，誘導切欠きの深さを断面幅の 1/4 ずつ（リガメント幅は断面幅の 1/2）とすることとした。また，誘導切欠きを設けるために S サイズの供試体ではリガメントの大きさが小さくなってしまうため，L サイズの供試体を採用することとし，リガメントの寸法は 100×100mm とすることとした。

また，丸棒上に供試体を設置する方法は載荷が始まるまで不安定であり，さらに載荷中に楔が傾く現象がみられた。そこで，本試験では供試体を上下逆転させて載荷することとし，楔を試験機のテーブル上に設置して，その上に供試体をセットすることで載荷開始前から載荷中も安定して載荷できるようにした。本試験の載荷状況を**図－4** に示す。

3. 本試験の概要

3.1 供試体

供試体は，楔挿入供試体と曲げ供試体を作製した。**図－5** に示す楔挿入供試体を 6 体作製した。曲げ供試体の寸法は 200×200×800mm（スパン 600mm）とし，5 体作製

表－1　供試体寸法とリガメント寸法

	供試体寸法(mm)			リガメント(mm)	断面に対するリガメント
供試体名	高さ (H)	幅 (W)	奥行 (B)	高さ×幅 (hL)　(b)	(切欠き深さ(hN)/高さ(H)) ×(幅(b)/奥行(B))
S-75-150	150	150	150	75×150	0.5×1.0
M-105-150	150	200	150	105×150	0.7×1.0
L-140-200	200	200	200	140×200	0.7×1.0
L-100-200				100×200	0.5×1.0
L-100-140				100×140	0.5×0.7
L-100-100				100×100	0.5×0.5

表－2　コンクリートの配合

	単位量(kg/m^3)					
W/C	水(W)	セメント(C)	細骨材	粗骨材	鋼繊維	減水剤
55	195	355	945	698	78.5	1.4

（a）左：S-75-150　右：M-105-150

（b）左:L-100-200　中央:L-100-140　右:L-100-100

図－3　試験後の供試体の破壊状況

した。さらに，曲げ試験後の供試体から高さ×幅×長さが 98×100×400mm（スパン 300mm）供試体を 5 体切出した。供試体を切出したのは，断面 100×100mm の型枠に打込んだ場合と断面 200×200mm の型枠に打込んだ場合では繊維の配向が異なる可能性が高いと考えたためである。なお，高さを 98mm としたのは，コンクリートカッターのきりしろによる断面損失があるためである。コンクリートの使用材料および配合は 2.1 節と同様であり，打込み時の空気量は 3.8%，スランプは 8.0cm，載荷試験時の圧縮強度は 42.6N/mm^2 であった。

コンクリートは棒形振動機を挿入して締め固めた。棒型振動機の挿入が繊維配向に与える影響を考慮し，楔挿入供試体は角部の 4 点のみとした。曲げ供試体は長手方向の中央，左右の順にコンクリートを投入し，中央部以外の左右の部分のみに振動機を挿入した。打設後，材齢 1 日で脱型し，楔挿入供試体は水中養生，曲げ供試体は湿布養生を試験直前まで行った。切欠き作製はコンクリートカッターを使用した。曲げ供試体は長手方向中央の位置に断面高さの 0.3 倍の切欠きを設けた。

3.2 曲げ載荷試験

曲げ載荷試験は JCI 規準の切欠きはりを用いた繊維補強コンクリートの荷重－変位曲線試験方法 [4]に準じて行った。載荷試験には梁試験機を使用した。荷重の計測には容量 100kN のロードセル，ひび割れ肩口開口変位（CMOD）の計測はクリップゲージ（容量 5mm，感度 /1000mm）を用いた。載荷点変位の計測は高感度変位計（容量 25mm，感度 1/500mm）を変位計測治具を介して供試体に固定して行った。載荷速度はいずれの供試体の場合も載荷開始からほぼ 10 分程度で載荷を終了するようにした。

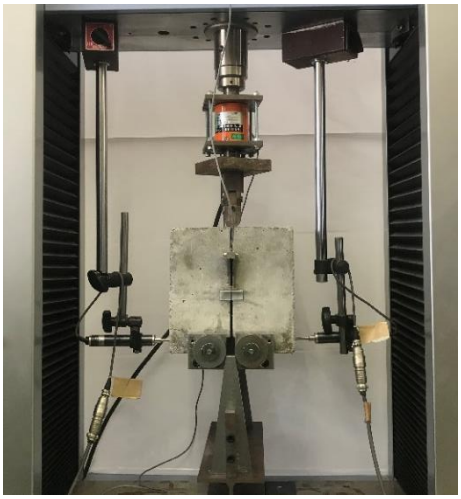
3.3 引張軟化曲線の推定

楔挿入試験と曲げ試験の結果を直接比較することはできないため，楔挿入試験で得られた荷重－載荷点変位－CTOD 関係と曲げ試験で得られた荷重－載荷点変位－CMOD 関係からそれぞれ引張軟化曲線を推定することとした。ここでは引張軟化曲線の推定法として修正 J 積分法 [5]を適用した。修正 J 積分法は数値解析を必要とせず，微分計算のみで推定可能であることから大変位領域まで安定的に推定できるという特徴がある。なお，修正 J 積分法では CTOD を計測する必要があるが，曲げ試験では CMOD を計測しているため，供試体の変形モードを圧縮縁を回転中心とした剛体回転として幾何学的関係から CMOD を換算して CTOD を求めた。また，CMOD の計測に用いたクリップゲージの容量が 5mm であるため，これを超える範囲では，幾何学的関係から載荷点変位を換算して CTOD を求めた。**図－6** に載荷点変位，CTOD，CMOD の幾何学的関係を示す。また楔挿入試験においてもクリップゲージの容量を超える範囲は剛体回転を仮定して幾何学関係から求めた。**図－7** に載荷点変位 δ と CTOD の関係を示す。

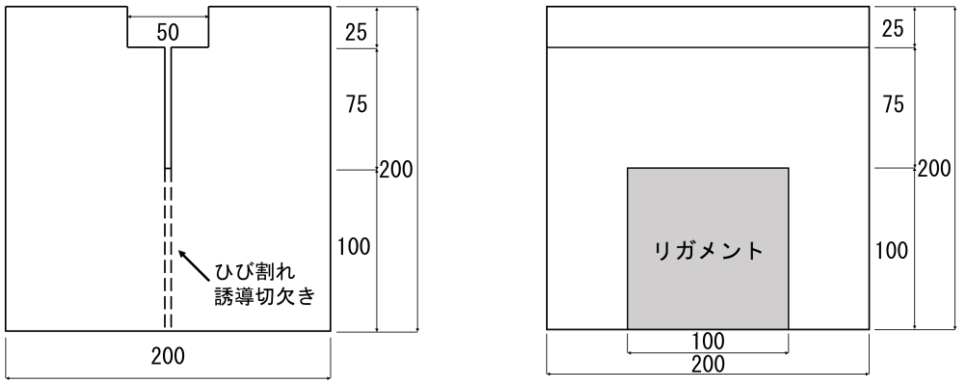
4. 実験結果

4.1 曲げ試験結果

図－8 と**図－9** は曲げ試験で得られた荷重－載荷点変位関係であり，図中の実線は平均値を示す。また同図中には同一の繊維で同一の混入量とした既往の実験結果 [2]も併記した。凡例の 2017 は既往の実験結果，2018 は本試験の結果を示す。



図－4　本試験の載荷状況



図－5　楔挿入供試体　左：正面図　右：中央断面図

本試験の結果について最大荷重時の変動係数を見ると，断面が 100mm の供試体は 0.22，200mm の供試体は 0.12 であり，断面が小さい供試体ではばらつきが大きくなる傾向が見られた。これは繊維長が断面寸法に対し相対的に長いことに加え，100mm 供試体の場合には供試体表面近傍の繊維が切断されているためと考えられる。

次に既往の実験結果と本試験の結果を比較すると，水セメント比が異なるため荷重差は多少あるものの曲線の概形は概ね同様の結果となった。

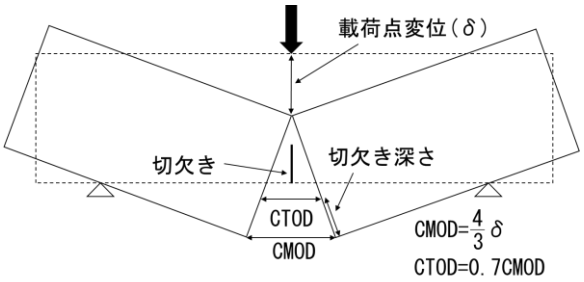
図－9 において 5 体のうち荷重が著しく低くなった 1 体は外れ値として平均値および変動係数の算出と引張軟化曲線の推定から除外した。なお，除外した供試体は，他の供試体に比べ破断面の繊維本数が著しく少なくなっており，締固め時に振動機を挿入したことで繊維の分散に偏りが生じたためと考えれる。

4.2 楔挿入試験結果

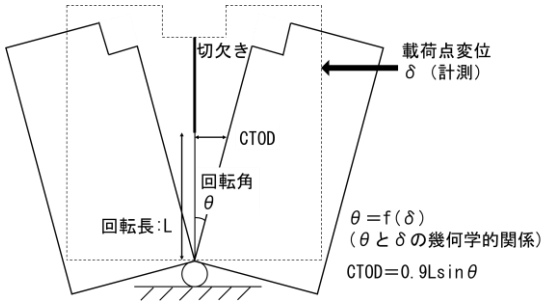
図－10 は楔挿入試験で得られた荷重－載荷点変位関係であり，図中の実線は平均値を示す。楔挿入供試体はコンクリートのひび割れ発生後に荷重増加がほとんど見られず，単調減少する曲線となった。また曲げ試験と同様に供試体間においての荷重差は見られるもののそれぞれの概形に大きな差は見られなかった。また最大荷重時の変動係数は 0.16 であり，曲げ試験と同程度のばらつきであった。

5. 引張軟化曲線

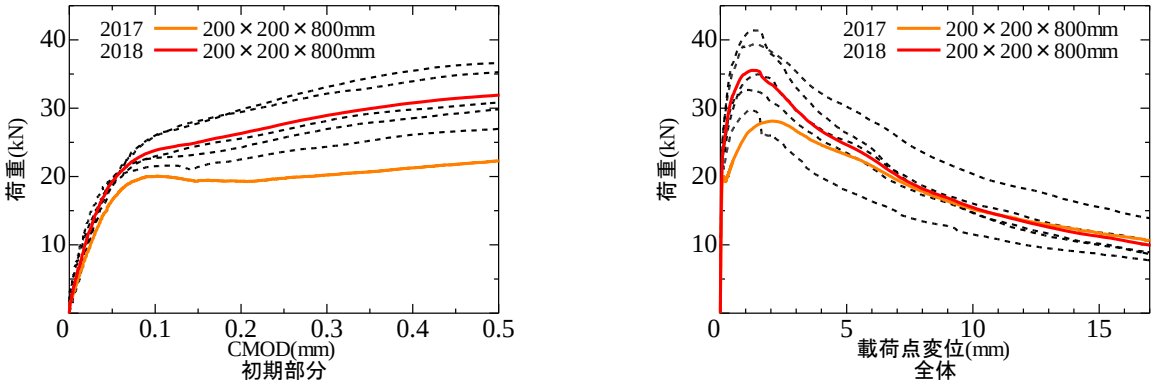
図－11 にそれぞれの試験結果の平均値を用いて修正 J 積分法で推定した引張軟化曲線の結果を示す。凡例の 2017 は既往の実験結果，2018 は本試験の結果を示す。曲げ供試体の結果を見ると，断面が 100mm の方が 200mm のよりも引張応力が高く，いわゆる寸法効果の影響が表れており，その差は 0.1～0.5N/mm^2 程度の値となっている。また既往の結果と比較すると断面が 200mm の場合



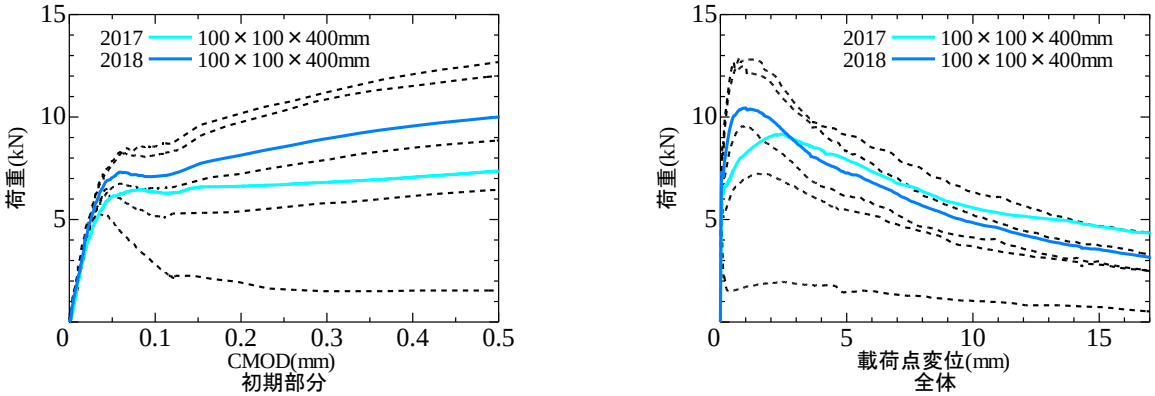
図－6　載荷点変位，CTOD，CMOD の幾何的学関係



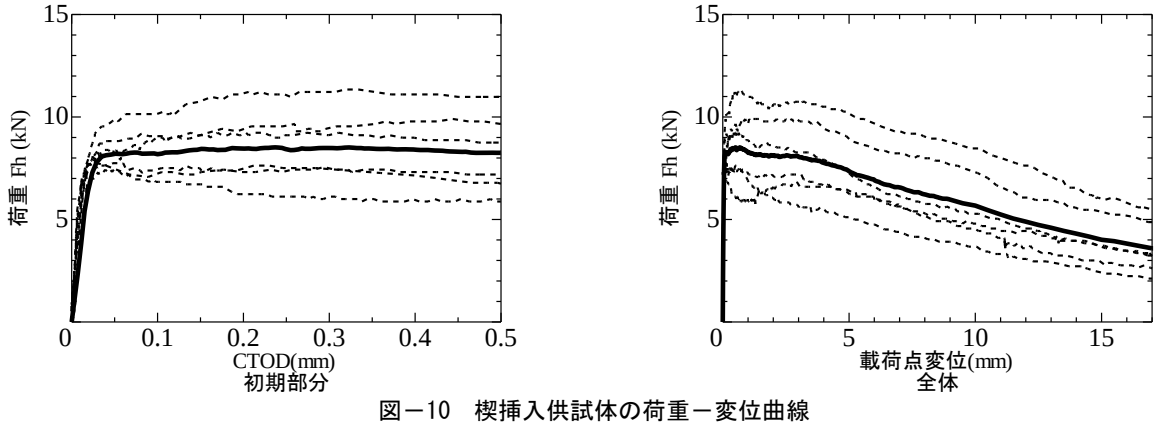
図－7　載荷点変位δと CTOD の関係



図－8　200×200×800mm 曲げ供試体の荷重－変位曲線



図－9　100×100×400mm 曲げ供試体の荷重－変位曲線



図－10　楔挿入供試体の荷重－変位曲線

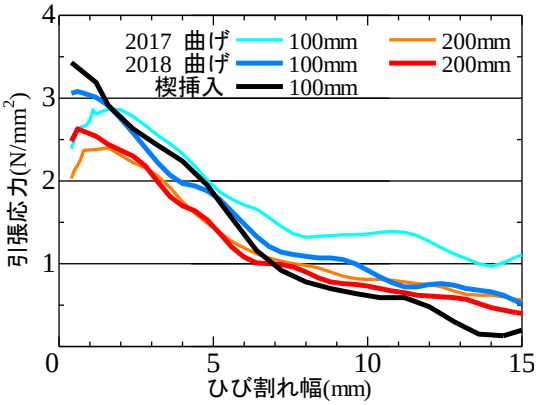
にはほとんど差が見られないが，100mm の場合には今回の切出した供試体の方が応力が低くなった。これは，既往の結果は 100×100×400mm の型枠に打込んだものに対して，今回の供試体は切出したものであるため，繊維の配向が異なっていること，切出しにより，供試体表面付近の繊維が切断されていることが影響しているためと考えられる。なお，4.1 節でも述べた通り，今回の切出した供試体の場合には振動機の挿入による繊維の分散の影響も考えられる。

楔挿入試験から得られた引張軟化曲線は，ひび割れ幅が 6mm 程度までは 200mm 曲げ試験で得られる引張軟化曲線より 0.5～1.0N/mm^2 程度応力が高くなり，100mm 曲げ試験の結果とほぼ同等となった。ひび割れ幅が 6mm 以上では応力はほぼ同じ程度となった。

以上の結果より，繊維長 60mm の FRC に対して楔挿入試験を適用した場合，200×200×800mm の供試体を用いた曲げ試験から求められる引張軟化曲線に比べ，ひび割れ幅の小さい領域は引張応力が 0.5～1.0N/mm^2 程度応力が高くなることがわかった。また，楔挿入試験で得られる引張軟化曲線は切出した 100×100×400mm の供試体を用いた曲げ試験から得られる引張軟化曲線とほぼ同等となることがわかった。

6. まとめ

1. 本研究の載荷システムを用いることで安定した楔挿入試験が実現できることが示された。
2. 曲げ試験において， 200×200×800mm の供試体よりも 200×200×800mm の供試体から切出した 100×100×400mm の供試体の方が試験結果のばらつきが大きくなった。
3. 繊維長 60mm の FRC に対し楔挿入試験と曲げ試験から求められる引張軟化曲線を比較すると，楔挿入試験の結果はひび割れ幅の小さい領域では 200×200×800mm の曲げ供試体よりも 0.5～1.0N/mm^2 程度応力が高くなる。また切出した 100×100×400mm の曲げ供試体と同程度となる。



図－11　引張軟化曲線

繊維長さ 60mm の FRC に対して，100×100×400mm の供試体を用いた曲げ試験や本試験の楔挿入試験を適用すると，引張軟化曲線の応力が高く推定される傾向があることがわかった。しかし，引張軟化曲線の形状には大きな差はないため，応力が増加することを考慮しておけば，繊維長の長い FRC に対して品質管理の目的であれば小型の供試体を適用することも可能であると考えられる。

参考文献

1) 土木学会：鋼繊維補強コンクリートの強度およびタフネス試験用供試体の作り方(案)(JSCE-F-552-2013)，土木学会コンクリート示方書[規準編]，2013
2) 守田貴昭，仲野弘識，内田裕市：繊維長と供試体寸法が繊維補強コンクリートの引張軟化特性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，vol39，pp223-228，No1，2017
3) 石黒覚：楔挿入割裂試験および 3 点曲げ試験における破壊力学パラメータの解析，コンクリート工学年次論文集，vol25，pp157-162，No.2，2003
4) JCI 基準：切欠きはりを用いた繊維補強コンクリートの荷重－変位曲線試験方法，JCI-S-002-2003
5) 内田裕市，六郷恵哲，小柳　洽：曲げ試験に基づく引張軟化曲線の推定と計測，土木学会論文集，No.426/V-14，pp.203-212，1991.2