

プラスチック短繊維補強コンクリートの曲げタフネス計測における変位ジャンプ問題の分析

Analysis on Displacement Jump Problem of the Bending Toughness Measurement of Plastic Fiber Reinforced Concrete

函館工業高等専門学校 環境都市工学科 学生員 中塚 祥憲(Yoshinori Nakatsuka)
 道南地区コンクリート技術センター 正員 中村 大(Dai Nakamura)
 函館工業高等専門学校 環境都市工学科 正員 澤村 秀治(Shuji Sawamura)

1. はじめに

昨今、トンネル2次覆工や高架橋のコンクリートの剥落が、たびたび重大な第三者災害を引き起こし、大きな社会問題となっている。これらのコンクリート剥落事故は、コールドジョイントなど施工時に生じた欠陥、アルカリ骨材反応によるひび割れの発生、塩害や中性化、あるいは施工不良やかぶり不足による鋼材の腐食、構造部材の疲労による損傷の進展などが主な要因となっている。このようなコンクリート剥落事故に対する予防的措置として、近年、プラスチック短繊維補強コンクリートが積極的に用いられるようになってきた。

これらのプラスチック短繊維補強コンクリートの品質管理や性能の確認には、土木学会基準 JSCE-G 552-1999 に準拠した曲げタフネス試験が行われている。曲げタフネス試験では、タフネス値を荷重-たわみ曲線で囲まれる面積によって評価しているが、プラスチック短繊維補強コンクリートの曲げタフネス試験では、ピーク荷重後の曲げひび割れ発生時に変位計測データに大きなジャンプが生じるため、これが試験結果の評価を難しくしている。このような、変位計測データのジャンプ現象は、プラスチック短繊維補強コンクリートでは、剥落防止のみを目的に繊維混入量が決められているため補強量が小さく、鋼繊維補強コンクリートに比べてひび割れ発生時の供試体剛性の低下が著しいことが要因になっている。

そこで本研究では、プラスチック短繊維補強コンクリートの曲げタフネス試験時のコンクリート供試体の挙動、さらに試験で使用する試験機そのものの挙動を1/1000秒の時間刻みによる動的計測によって詳細に捉え、曲げタフネス試験の試験条件が変位データのジャンプ量や曲げタフネス計測値に及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と水準

本研究では、プラスチック短繊維補強コンクリートの曲げタフネス試験の条件が、変位(たわみ)の計測結果に及ぼす影響を考察するために、実験の要因をコンクリートの繊維混入量、コンクリートの圧縮強度とし、それぞれの水準を表-1のように設定した。また、曲げタフネス試験に使用する試験機の性質や性能が試験結果に及ぼす影響を調べるために、同様の実験を道南地区コンクリート技術センター(以下、試験機A)、函館高専・コンクリート構造実験室(以下、試験機B)のそれぞれによって行うこととし、試験機の種別も要因に加えた。

実験で用いたコンクリートの配合を表-2に、使用材料を表-3に示す。プラスチック短繊維補強材は、表面がエンボス加工、親水処理がなされた公称長さ48mmのポリオレフィン

表-1 実験の要因と水準

実験の要因	実験の水準	
繊維混入量	4水準	0.0%, 0.3%, 0.6%, 1.0% (体積混入率)
コンクリート強度	3水準	L(低強度), M(中強度), H(高強度)
試験機の種別	2水準	試験機A 道南地区コンクリート技術センター, 1000kN クロスヘッド式 試験機B 函館高専・コンクリート構造実験室, 2000kN 固定フレーム式

表-2 コンクリートの配合

Name	Fiber		W/C	s/a	単位質量(kg/m ³)						
	vol%	kg			W	C	S1	S2	G	混和剤	助剤
L00	0.0	0.00	66.0	53.6	177	268	584	391	869	2.7	0.0
L03	0.3	2.73									
L06	0.6	5.46									
L10	1.0	9.10	48.0	51.2	166	346	548	368	896	2.4	0.0
M00	0.0	0.00									
M03	0.3	2.73									
M06	0.6	5.46	30.0	51.2	170	567	487	327	797	8.5	3.4
M10	1.0	9.10									
H00	0.0	0.00									
H03	0.3	2.73									
H06	0.6	5.46									
H10	1.0	9.10									

表-3 使用材料一覧

名称	仕様等	密度 (g/cm ³)
補強材	ポリオレフィン系短繊維	0.91
セメント	普通ポルトランドセメント	3.15
細骨材	S1: 函館市豊原産天然砂	2.59
	S2: 上機義朗産砕砂	2.64
粗骨材	上機義朗産砕石2005	2.70
混和剤	高性能AE減水剤標準型	1.08
助剤	Micro-air 101 (1000倍希釈)	1.00

系のものを使用した。コンクリートの強度については、水セメント比を変えて3水準を設定しており、曲げタフネス試験実施時に測定したブレンコンクリートの圧縮強度の平均値は、L=37.3N/mm², M=54.8N/mm², H=84.5N/mm²であった。

2.2 曲げタフネスの計測

コンクリート供試体のたわみ、試験機各部の変位は、高感度変位計によって計測した。計測装置の概要を図-1に示す。供試体のたわみの測定(TD5, TD6)は、専用のたわみ測定装置に変位計を取り付けて行った。上側反力フレームの変位(TD1), 載荷テーブルの変位(TD2), 載荷点の変位(TD3, TD4)については、試験機から完全に独立した不動梁を設置し、ここを不動点として絶対変位を測定した。データの収録は各変位計に動ひずみアンプを接続し、高速A/D変換ロガーとパーソナルコンピュータによって、1/1000秒の時間刻みで、TD5, TD6の測定値が2mm、中央点たわみに換算してスパンの1/150である3mmに達するまで行った。試験機A(道南地区コンクリート技術センター)、試験機B(函館高専・コンクリート構造実験室)における実験の状況を写真-1、写真-2に示す。

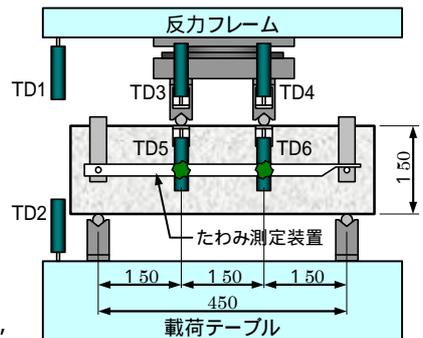


図-1 計測装置の概要



写真 - 1 試験機 A (道南地区コンクリート技術センター)



写真 - 2 試験機 B (函館高専・コンクリート構造実験室)

3. 実験結果

3.1 ひび割れ発生時の試験機 供試体の挙動

変位ジャンプの影響で異常な荷重 - たわみ関係となった曲げタフネス試験の例を図 - 2に示す。通常行われているデータロガーを使用した 1/2sec. 刻み程度のサンプリングでは、図 - 2の太線で示されるような特異な挙動が見られることがある。これに今回実施した 1/1000sec. 刻みの高速サンプリングデータを重ねてみると、実際にはさらに激しい供試体変位のジャンプと振動が発生していることがわかる。このような計測異常の原因は、計測システムのエラーではなく、ひび割れ発生時の変位ジャンプと振動の中のある一点を偶然捉えてしまった結果である。

供試体にひび割れが発生した瞬間に、設置された各変位計によって記録されたデータの例を図 - 3に示す。供試体は、ひび割れ発生瞬間から大きな変位を示し、0.1 秒の間は振動が記録されている。このような状況では、ひび割れ発生時に供試体と載荷点ローラーは接触しておらず、荷重はゼロになるはずである。しかしこのデータでは、実際には荷重値の低下に 0.5 秒程度の時間を要しており、試験機の荷重計測システムの応答性能が要因となっているため、ごく短時間で急激な荷重の低下に追従できなかったためと思われる。

また、反力フレームと載荷テーブルでは、曲げひび割れ発生時の荷重解放による、変位と振動が確認できた。これらより、ひび割れ発生時の供試体および試験機の挙動を以下のように推測した。

ひび割れ発生時の荷重解放の瞬間、上側の反力フレームは、試験機の弾性変形に相当する変位の戻りが生じ、載荷テーブルもわずかに跳ね上がる。これらの試験機の挙動が、ひび割れ発生瞬間に供試体を弾き出している可能性が大きい。

供試体自身のひずみエネルギーの解放、に示した試験機の挙動によって、一時的に大きなたわみと振動

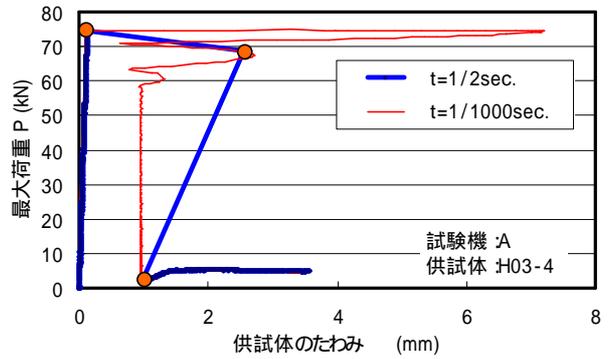


図 - 2 曲げタフネス試験における計測異常の例

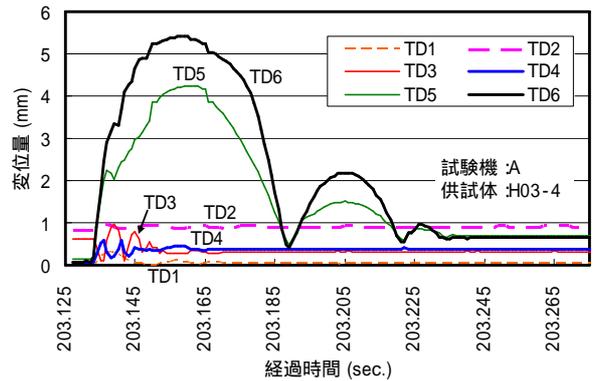


図 - 3 ひび割れ発生時の供試体 試験機の挙動

が発生し、ひび割れも発達する。その瞬間に、ひび割れを横切るプラスチック短繊維は引抜の荷重履歴、変位の履歴を受けることになる。繊維にはこれらの変位の履歴によって伸びやゆるみが生じていると考えられ、その程度によって変位ジャンプ以降の供試体挙動が支配されている。

したがって、プラスチック短繊維補強コンクリートの曲げタフネス評価では、ひび割れ発生時に生じる変位ジャンプの影響を十分に検討しなければならない。

3.2 各要因が曲げタフネス試験の結果に及ぼす影響

1) 曲げタフネスの評価方法

高強度供試体 (H) と中強度供試体 (M) に対する荷重 - たわみ関係の計測例を図 - 4に示す。ひび割れ発生後の残存荷重が大きいほど、一般には曲げタフネス値も大きく算出されるはずである。しかし、図 - 4では、高強度供試体のほうが残存荷重が小さいにも関わらず変位ジャンプ量が大きい。そのため、実体のない三角形部分の面積を算入することによって、曲げタフネス値が大きく算出される矛盾が生じている。

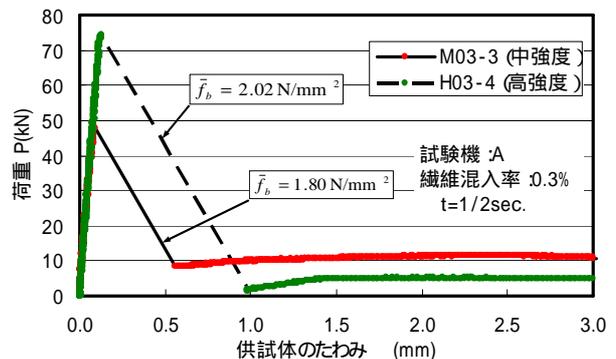


図 - 4 曲げタフネス値に矛盾を生じる計測例

そこで、プラスチック短繊維補強コンクリートの典型的な荷重 - たわみ関係を、図 - 5にモデル化し、 a 点 (荷重ピーク点)、 b 点 (再載荷点)、 c 点 (再載荷後の荷重ピーク点)、 d 点 (中央点のたわみがスパンの $1/150$ に達した点) の4点を曲げタフネス算定の要素として把握し、曲げタフネスの計算方法を図 - 6に示す3タイプを考え比較してみた。

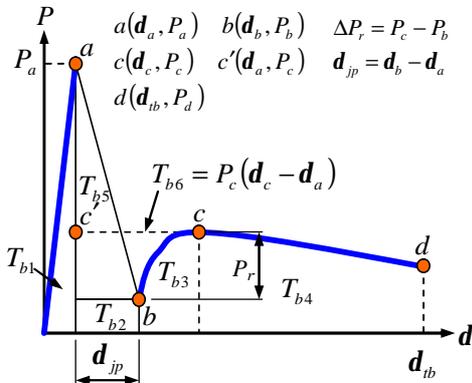


図 - 5 曲げタフネス試験の荷重-変位曲線モデル

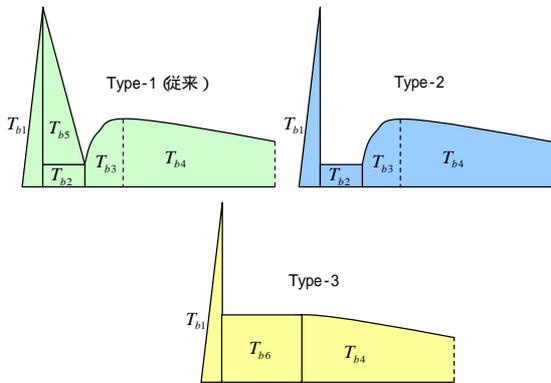


図 - 6 曲げタフネス評価のための算入面積の考え方

従来のように a 点と b 点を結んで実体のない面積 T_{b5} を含める方法を Type-1、 T_{b5} を含めないものを Type-2、供試体の変位ジャンプを全く生じさせない完全な変位制御による試験が行うことができたとすれば、その荷重 - 変位曲線は必ず c 点より上を通ると考えられることから、これを考慮して c 点と水平に c' 点を結んだ面積 T_{b6} を考えるものを Type-3 とした。

3タイプの評価方法による曲げタフネス計算値の相違を図 - 7に示す。これより Type-1 では繊維補強量が同じであっても、高強度供試体ほど曲げタフネスの計算値が大きくなる。これは、コンクリート強度が高いものほどひび割れ発生時の

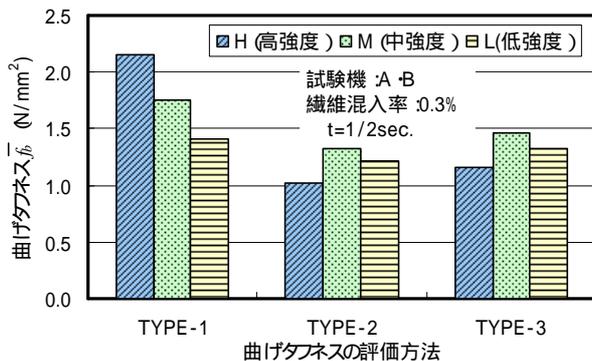


図 - 7 タフネス評価方法と曲げタフネス計算結果の関係

エネルギー解放が大きくなり、それに伴い変位ジャンプ量が増大するためである。変位ジャンプ量が多いものほど実体のない面積 T_{b5} の影響を強く受けることから、従来法である Type-1 では曲げタフネスを過大評価する可能性がある。Type-2 では、実体のない面積 T_{b5} の影響を排除して計算しているため、最も安全側の評価となる。しかし理想的な試験では、荷重 - たわみ曲線は図 - 5の c 点より上の経路をたどると考えられるため、本来持っている曲げタフネスより、かなり控え目の評価になっている。理想的な試験では、荷重は c 点を下回ることはないと考え、図 - 6において T_{b6} の部分を考慮した Type-3 は最も理想的な状態に近似しており、過大評価となることもない。曲げタフネスを最も安全側に計算する場合は Type-2、理想の荷重 - 変位曲線に近い曲げタフネスを計算する場合は Type-3 を用いるとよい。以降の、繊維混入率、コンクリート強度、試験機の違いが曲げタフネス計算値に及ぼす影響の検討では Type-3 の計算方法を用いた。

2) 繊維混入率と曲げタフネス値 変位ジャンプ量の関係

繊維混入率と曲げタフネス計算値の関係を図 - 8に示す。Type-3 によって計算した曲げタフネス値は繊維混入率の増加に伴って大きくなっており矛盾はない。Type-1 による計算では実体のない面積 T_{b5} のために、繊維混入率が小さいほうが曲げタフネスが大きいという逆転を生じるケースがあった。

繊維混入率と変位ジャンプ量の関係を図 - 9に示す。これより、繊維混入率が増加するにつれ変位ジャンプ量が減少する傾向にあることが確認できた。また、繊維混入率 0.3% の供試体では、変位ジャンプ量のばらつきも大きいことがわかる。繊維量が少ないコンクリートでは、ひび割れ面に存在する個々の繊維の負荷が大きく、ひび割れ面における繊維の確率的分布が、繊維混入率の小さいときには変位ジャンプ量に大きく影響するため、ばらつきが大きくなる。

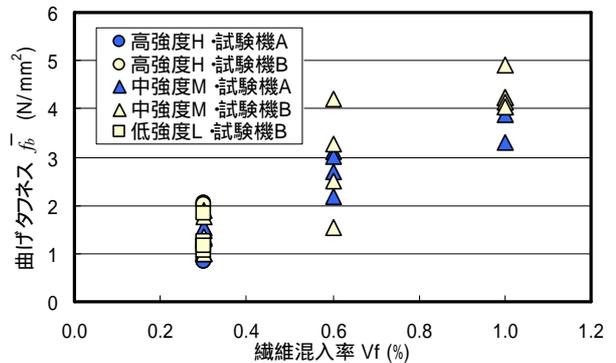


図 - 8 繊維混入率と曲げタフネス値の関係

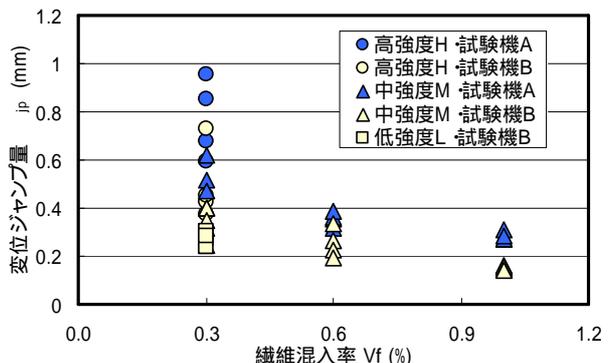


図 - 9 繊維混入率と変位ジャンプ量の関係

3) コンクリート強度と変位ジャンプ量の関係

図 - 7では、Type-3の方法によって計算すると、コンクリート強度の違いが曲げタフネスの計算値に与える影響が小さいことがわかった。図 - 10に、コンクリート強度と変位ジャンプ量の関係を示す。変位ジャンプ量はコンクリートの強度が高いほど大きい。この要因は、コンクリート強度が高い場合にはひび割れ発生時のエネルギー解放が大きいため、図 - 2に示した動的計測 ($t=1/1000\text{sec.}$)の結果に見られたように、ひび割れ発生の瞬間に過大な変位を生じるためである。

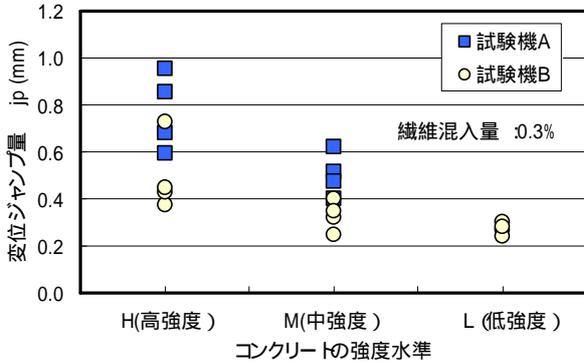


図 - 10 コンクリートの強度と変位ジャンプ量の関係

4) 試験機の特性と変位ジャンプ量の関係

試験機A, Bそれぞれにおける、供試体の曲げ強度と変位ジャンプ量の関係を図 - 11に示す。これによると、特に曲げ強度が高い領域で、試験機の特性の差が変位計測結果に大きく影響を及ぼしていることがわかる。この現象を照査するために、荷重と反力フレームの変位の関係を図 - 12に示した。微小な変位を計測しているので計測データにばらつきがあるが、供試体をセットした状態での試験機の剛性は、試験機Aは1280kN/mm、試験機Bでは6570kN/mmとなる。剛性が小さい試験機Aは、供試体にひび割れが発生し荷重解放

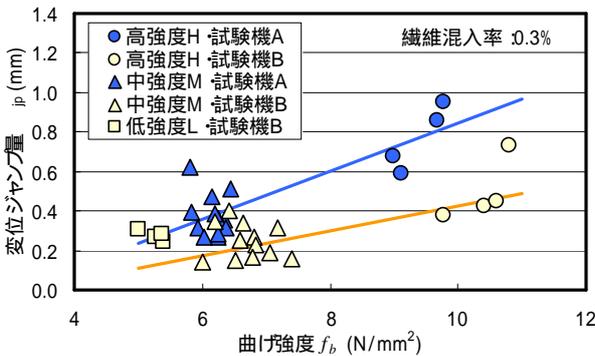


図 - 11 試験機の種別が変位ジャンプ量に及ぼす影響

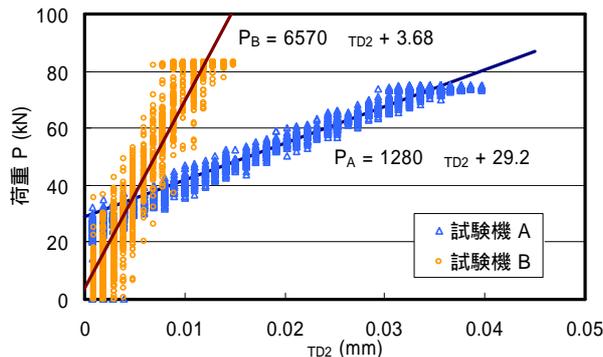


図 - 12 試験機A・Bのフレーム剛性の比較

されたときの反力フレームの変位が大きく、先に述べた「供試体の弾き出し」現象の影響が大きく、結果として変位のジャンプ量が大きくなる。

5) 変位ジャンプ量と荷重回復量の関係

図 - 13に、変位ジャンプ量と図 - 5に示したジャンプ後の荷重回復 Pr の関係を示す。これによると、変位ジャンプ量が大きいほど Pr が小さく、コンクリートの強度が高い、補強量が小さい、試験機剛性が小さいほど荷重回復が期待できないため、曲げタフネスが小さく算出されることがわかる。

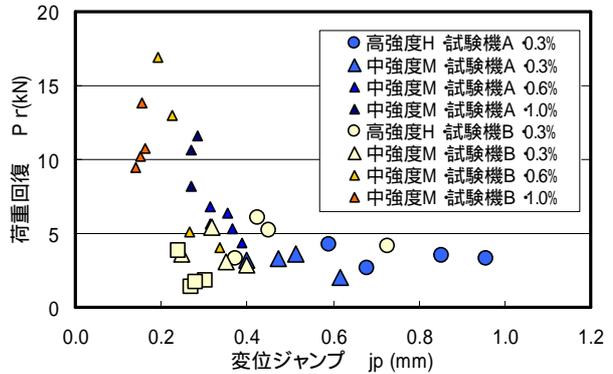


図 - 13 コンクリートの強度と変位ジャンプ量の関係

4.まとめ

本研究における実験の結果から、以下の知見を得た。

$t=1/1000\text{sec.}$ の動的計測によって、供試体にひび割れが発生した瞬間に、最も大きいもので7mm以上の変位が生じ、その後、試験機によって相違するものの、エネルギー解放と繊維の張力によると思われる、振動現象を確認することができた。

1)繊維混入率が小さい、2)コンクリート強度が高い、3)試験機の剛性が低い、の条件で、曲げタフネス試験における変位ジャンプ量が大きくなる。また、ひび割れ発生後の荷重回復量は、変位ジャンプ量が大きいほど小さくなる傾向があった。

曲げタフネスの評価については、従来の Type-1 の方法は、計算結果が変位ジャンプ量の影響を強く受けるため、条件によってはタフネスを過大評価する。

残存荷重のピーク値を用いる曲げタフネス評価方法 Type-3 は、完全な変位制御を行った理想的な試験結果に近いと考えられ、タフネスの計算結果は変位ジャンプ量の影響をあまり受けない。

本研究では、実用的な曲げタフネスの評価方法として Type-3 を提案する。

参考文献

- 1) 前田公治, 荒野広, 佐野敦志: 非鋼繊維補強履工コンクリートの計画について - 履工の剥落防止における最適な非鋼繊維の選定 - ,第48回北海道開発局技術研究発表会, 技-20, 2004
- 2) 土木学会コンクリート標準示方書〔基準編〕,鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験法 (SCE-G 552-1999), pp217 ~ 219, 2002
- 3) 日本道路公団:トンネル施工管理要領 (繊維補強履工コンクリート編), 2003