

非鋼繊維で補強した覆工コンクリートの引張軟化特性と曲げ耐力の評価(その1)

西松建設株式会社 正会員 ○竹村いずみ 亀谷 英樹 椎名 貴快
首都大学東京 正会員 西村 和夫

1. はじめに

トンネルの覆工コンクリートは、短繊維による補強によって、靱性向上や剥離防止の効果が得られると共に、ひび割れ後も引張応力を負担できるため曲げ耐力の向上も期待できる。このうち、鋼繊維補強コンクリートは、既往の研究¹⁾において曲げ耐力の定量的な設計法が提案されており、この設計法を用いた施工実績も数多く報告されている。しかし、発錆の問題等により近年は施工実績が減少傾向にある。一方、非鋼繊維は、施工実績は近年急増しているものの、曲げ耐力を定量的に評価した事例は少なく、評価法が確立されているとは言い難い。この評価方法を確立することは、覆工の薄肉化や補強鉄筋の代替等が可能となるため、覆工構造の経済的かつ合理的な設計を実現することができると考えられる。

本稿は、非鋼繊維部材の曲げ耐力の評価法に関する研究の初期段階として、標準的な曲げ試験を実施して、曲げ耐力と引張軟化の特性を明らかにするものである。

2. 曲げ試験の概要と試験結果

曲げ試験の試験方法は、基本的に JSCE-G522-2003 に準拠した。供試体寸法は 150×150×530mm とし、供試体中央に幅 3mm、深さ 45mm の切欠きを設けた。荷重は 3 等分点曲げ荷重とし、荷重スパンは梁高さの 3 倍とした。実験に用いた繊維補強材は、アラミド、鋼およびポリプロピレン(以下、それぞれ AF, SF, PP と称す)の 3 種類とし、それぞれの繊維について 3 試験体の実験を行った。各供試体の繊維混入率は全て 0.5vol.%とした。短繊維の仕様を表-1 に示す。また、表-2 にコンクリートの配合を示す。配合は NEXCO の繊維補強覆工コンクリート配合決定のための基準²⁾を参考に、繊維混入後のスランプ 15±2.5cm、空気量 4.5±1.5%となるように高性能 AE 減水剤の添加量で調整した。曲げ試験により得られた荷重-ひび割れ肩口開口変位 (CMOD) 曲線を図-2 に示す。図中の第一軸(左軸)において、実線は各繊維の試験結果を示しており、白抜きマーカーは後述する供試体毎の逆解析結果を示している。試験結果から、SF と PP の最大荷重はひび割れ発生時の約 15kN で、その後、両者共に軟化傾向を示している。PP よりも SF の方が緩やかで一定勾配の軟化傾向を示し、PP は CMOD が 0.6~0.8mm 以降で緩やかな硬化傾向に転じている。AF は、ややバラツキを有する供試体もあるが、荷重荷重が概ね 15~18kN 以降において、顕著な非線形性を示し、その後も荷重が増大して約 22kN の最大載荷荷重となった。すなわち、AF は SF や PP に比較して約 1.5 倍の曲げ耐力を有している結果となった。なお、ひび割れ発生後の軟化・硬化の挙動は、ひび割れ界面に存在する繊維の本数、硬さ、径および付着強さに依存していると考えられる。また、図-2 の第二軸(右軸)には、CMOD に対応する中立軸比率(=中立軸高さ : x/有効高さ : h (=部材高さ一切欠き長さ))として実線で示している。中立軸の位置は供試体側面

表-1 短繊維の仕様

繊維名	AF	SF	PP
材質	アラミド	スチール	ポリプロピレン
密度(g/cm ³)	1.39	7.85	0.91
引張強度(MPa)	3,300	1,080	500
引張弾性率(GPa)	70	210	7
繊維径 d(mm)	0.50	0.60	0.68
繊維長 l(mm)	35	30	48
アスペクト比 l/d	70	50	71
供試体番号	No.1~No.3	No.4~No.6	No.7~No.9

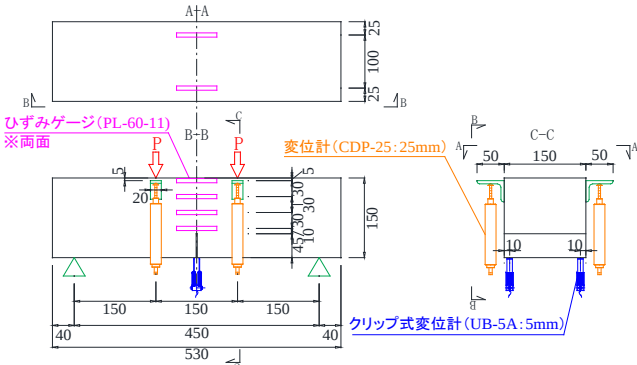


図-1 曲げ載荷試験の概要および寸法

表-2 コンクリートの基本配合

G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad
20	50.0	53.0	175	350	919	832	1.925

キーワード：アラミド繊維，ポリプロピレン繊維，鋼繊維，多直線近似法，引張軟化曲線，覆工コンクリート
連絡先：〒105-8401 東京都港区虎ノ門 1-20-10 西松建設株式会社 土木事業本部 土木設計部 TEL 03-3502-7637

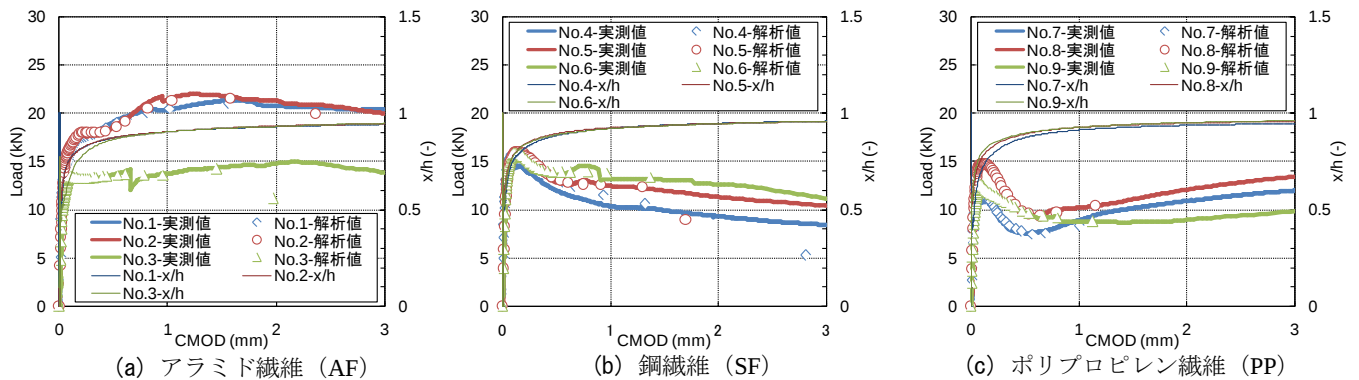


図-2 荷重-ひび割れ肩口開口変位 (CMOD) 曲線

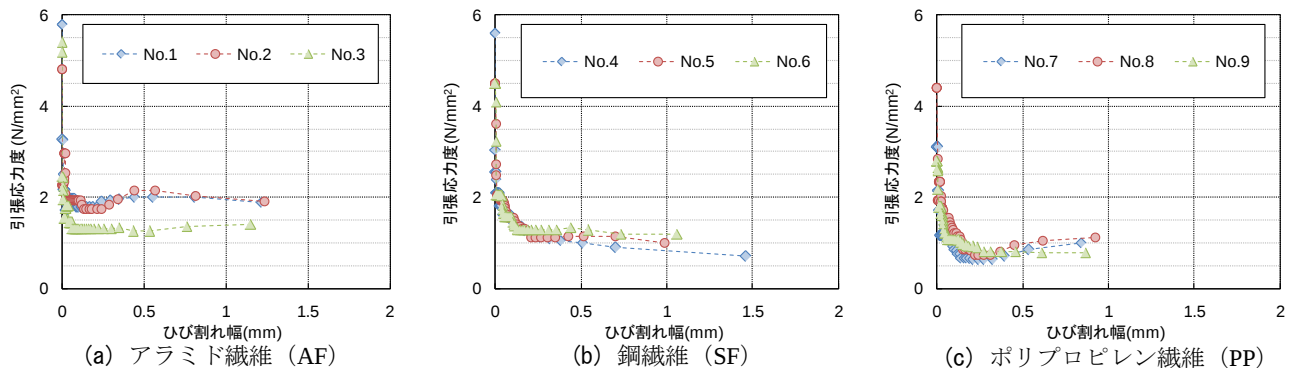


図-3 引張軟化曲線と中立軸の推移

に張付けたひずみゲージ(図-1 参照)から計算した。中立軸の推移に着目すると、全ての供試体で大きな差異は見られなかった。すなわち、全ての供試体において、中立軸は CMOD の増大と共に指数的に上昇し、有効高さの概ね 92~95%に漸近する。

3. 引張軟化曲線

曲げ試験で得られた荷重-CMOD 曲線を基にして、多直線近似法³⁾⁴⁾を用いた FEM 逆解析により引張軟化曲線を推定した。引張応力度とひび割れ幅との関係を図-3 に示す。図-2 の曲げ試験結果(実線)には、前述した引張軟化曲線を逆解析した時の解析値(マーカー)を追加している。解析値は、ややバラツキを有するケースがあるものの、大局的に実験結果を精度良く再現していると評価できる。すなわち、推定した引張軟化曲線はおおむね妥当であると評価できる。図-3 より、AF の引張軟化曲線は、ひび割れ後急激に低下するものの、 $f_t=1.3\sim 2.0\text{N/mm}^2$ の残留引張強度を示した。同様に、SF と PP は、AF よりも緩やかに軟化し、それぞれ $f_t=0.7\sim 1.2\text{N/mm}^2$ と $f_t=0.6\sim 1.1\text{N/mm}^2$ の残留強度を示した。AF は SF と PP よりも約 2 倍程度の残留引張強度を有している結果となった。

また、PP では、ひび割れ発生後に軟化した引張応力が緩やかな硬化に転じる特徴がある。これは、繊維自体の弾性係数が小さいため、ひび割れ界面の繊維全体が引張力を有効に負担するまでに、ある程度の変形が必要であるためと考えられる。この挙動は AF にも若干の傾向が見られるが、繊維の弾性係数が最も大きい SF では確認できない。

4. まとめ

本試験の結果、AF は SF や PP に比較して高い曲げ耐力を示し、SF と PP は大局的に同等の曲げ耐力を示した。しかし、試験結果には、ばらつきが大きいことや同じ材質でも繊維の製法や形状等の差異によって、繊維の力学特性や付着特性が異なる⁵⁾と考えられることから、本試験の結果や傾向が全ての条件下に適用できると考えることは適切ではない。曲げ耐力の評価方法を考える際には、これらの問題についても考慮する必要があると考えられる。

- 参考文献 1) 日本鉄鋼連盟：鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル トンネル編，技報堂出版，2002 年 11 月
 2) 東・中・西日本高速道路(株)：トンネル施工管理要領(繊維補強覆工コンクリート編)，平成 23 年 7 月
 3) 栗原哲彦，安藤貴彦，国枝稔，内田裕市，六郷恵哲：多直線近似法による引張軟化曲線の推定と短繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状，土木学会論文集，No.532/V-30，pp119-129，1996 年 2 月
 4) 解析プログラム掲載 URL：http://www.jci-net.or.jp/jci/study/jci_standard/kitsutaka_dl.html 作成者 内田裕市
 5) 三谷浩二，武内淳：繊維補強吹付けコンクリートの仕様と設計手法に関する検討，日本道路公団試験研究所報告，Vol.35，pp.56-62，1998 年 11 月