

論文 繊維補強高強度コンクリート梁部材の曲げ破壊挙動に関する研究

日置 一秀*¹・上原 匠*²・小畑 誠*³・信田 佳延*⁴

要旨：混入する鋼繊維の形状が、破壊時の挙動へ及ぼす影響を明らかにするため、形状の異なる3種類の鋼繊維を用いた、圧縮強度80MPa程度の繊維補強高強度コンクリート梁の曲げ破壊試験を行い、形状の違いによる破壊靱性等の比較を行った。また、試験結果をもとに、仮想ひび割れモデルを組み込んだ有限要素法による逆解析手法から各鋼繊維の引張軟化曲線を求め、鋼繊維の形状の違いが引張軟化曲線に与える影響についての考察を行った。その結果、繊維補強高強度コンクリートの破壊靱性等が、鋼繊維の形状により異なることが明らかとなった。

キーワード：繊維補強高強度コンクリート、引張軟化曲線、逆解析手法

1. はじめに

近年、構造物に対する要求の高度化から高強度コンクリートの利用が進められつつある。コンクリートは高強度になるほど脆性化する傾向があるので高強度コンクリートを鋼繊維で補強し、高靱性化させた繊維補強高強度コンクリートを対象とした破壊靱性の改善についての研究が行われている。しかしながら普通強度のコンクリートにくらべ高強度コンクリートについては研究例が多くなく、実構造への適用に関してまだ明らかにしておかなければならないことが多い。著者らはこれまでに、圧縮強度60~80MPa程度の高強度コンクリートに対する鋼繊維補強がもたらす力学的性質の改善について実構造への適用を念頭におき破壊力学パラメーターを用いて評価してきた。^{[1][2]}そしてその基本的な評価手法や力学的性質について明らかにしてきた。しかしながら実用上問題となる鋼繊維の形状の違いが破壊靱性に与える影響について研究した例は、あまり見られない。また、破壊力学上、重要と考えられる引張軟化曲線については、これまですべての鋼繊維に対し同等もしくは似たような値を取るものとして考えられてきた。そのため、鋼繊維の形状の違いから引張軟化曲線を評価した研究例は、少ないようである。そこで、本研究では、形状の異なる3種類の鋼繊維を対象に、RILEMの「コンクリートの破壊エネルギーの試験方法」に準じた圧縮強度80MPa程度の繊維補強高強度コンクリート梁部材を作製し、曲げ破壊試験を行い、破壊靱性および曲げ破壊挙動について比較検討した。そして、試験結果より仮想ひび割れモデルを導入した逆解析手法を用いて、引張軟化曲線を推定し、鋼繊維の形状の違いが引張軟化曲線に与える影響について考察を行った。

2. 実験方法

本実験では、鋼繊維の形状が繊維補強高強度コンクリートの破壊靱性等に及ぼす影響を見ることを目的に、表1に示す形状の異なる3種類の鋼繊維を用いて各シリーズにつき供試体を、3体作製した。鋼繊維は、すべて「JIS G3505 SWRM6」に準拠し製造されたものを用いた。各鋼繊維

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (正会員)

*2 名古屋工業大学講師 工学部社会開発工学科、工博 (正会員)

*3 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科、Ph.D.

*4 鹿島建設(株)技術研究所第二研究部第二研究室主任研究員、工修 (正会員)

とも材質の違いはなく（スチール製引張強度 110kgf/mm²）、表1に示すように形状のみが異なる。ただし、各鋼繊維の長さは30mmで統一した。表2および表3に、繊維補強高強度コンクリートの作製に用いた使用材料および示方配合を示す。供試体は、鋼繊維補強コンクリート設計・施工指針案に準拠して作製した。^[3] 供試体寸法は、RILEMより提案されている「コンクリートの破壊エネルギーの試験方法」^[4]に準拠し、大きさは100×100×900mmとした。供試体中央部には、ひび割れ発生位置と進行方向を特定するため幅0.5mm、深さ50mmの切欠きを設けた。図1に、曲げ破壊試験の概略を示す。曲げ破壊試験の載荷は、3点載荷で行った。載荷速度は、たわみ制御で行い最大荷重まで0.1mm/minとし、最大荷重以降はたわみ速度を増し最大2.0mm/minとした。測定項目は、荷重、たわみ、ひび割れ開口部における変位および支点沈下量である。開口変位およびたわみ量は、載荷位置の不整による偏心を確認し、調整するため表と裏の2カ所で測定した値の平均値を用いることとした。これら

の切欠き付き供試体に加えて参考のため切欠きだけを無くした切欠き無し供試体も作製し載荷実験を行った。これらの試験結果から曲げ強度・曲げ靱性係数を求め比較検討を行った。曲げ靱性係数は、鋼繊維補強コンクリート設計施工指針案に示される規定値までの平均値を示し式(1)のように表される。^[3]

$$\bar{\sigma}_b = \frac{T_b \cdot l}{\delta_{ib} \cdot b \cdot h^2} \quad \dots (1) \quad \bar{\sigma}_b: \text{曲げ靱性係数} \quad (N/mm^2)$$

δ_{ib} : スパン1/150のたわみ(mm)
 T_b : 曲げタフネス (Nmm)
 b : 破断面の幅 (mm)

表1 鋼繊維の形状

シリーズ名	寸法(mm)	1本当たりの質量(g)	単位体積当たりの混入本数(本/m ³)	アスペクト比(L/d)	フックの有無	インデントの有無
鋼繊維A	φ0.6×30	0.067	1769	50	無	有
鋼繊維B	0.28×1.15×30	0.079	1553	26.09	有	無
鋼繊維C	φ0.5×30	0.044	2547	60	有	無

表2 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 比重:3.14
細骨材	豊田市田初山産山砂 表乾比重:2.55 吸水率:1.77 粗粒率:2.74
粗骨材	春日井市外之原産 表乾比重:2.65 吸水率:0.75 粗粒率:6.76
鋼繊維	形状の異なる3種類を使用 (詳細は、上表に記載)
高性能AE減水剤	名称 : HP-8 主成分 : 有機酸系誘導体
AE助剤	名称 : AE-300 主成分 : 樹脂酸塩および特殊イオン表面活性剤

表3 示方配合

粗骨材の最大寸法(mm)	目標スランブ(cm)	目標空気量(%)	W/C(%)	S/a(%)	単位量				減水剤*1(g)	AE助剤*2(g)	鋼繊維混入率(%)
					W(kg)	C(kg)	S(kg)	G(kg)			
20	8±2.5	5±1.5	30	61	214	712	781	497	14240	7120	1.5

*1 減水剤は、高性能AE減水剤HP-8(表示は原液)を使用した。
 *2 AE減水助剤は、AE-30(表示は100倍溶液)を使用した。

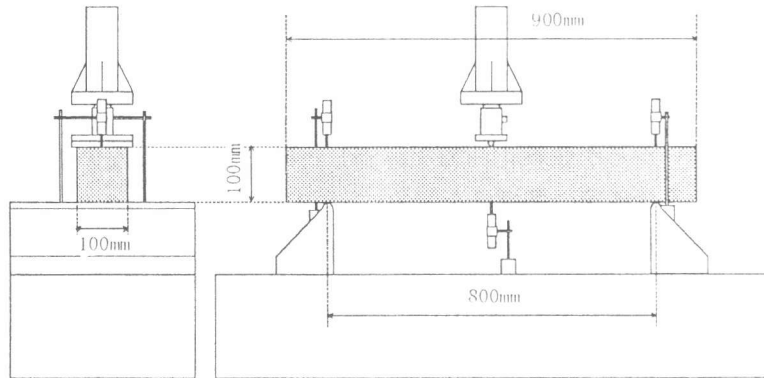


図1 曲げ破壊試験概略

また、繊維補強高強度コンクリートの材料特性を把握するため、φ 100×200mm の円柱供試体を作製し、土木学会規準に準じた圧縮・引張強度および弾性係数試験を行った。^[5]

3. 引張軟化曲線の推定

引張軟化曲線の推定は、供試体中央のひび割れが進展していくと予想される部分に仮想ひび割れモデルを組み込んだ有限要素解析による逆解析手法を用いて行った。^[1]引張軟化曲線のモデルには、高強度コンクリートに鋼繊維を用いた場合、2直線モデルである程度良好な解析結果が得られているため、図 2 に示す2直線モデルを用いることとした。^{[1][2]}引張軟化曲線を決定するパラメータのうちコンクリートの引張強度 f_t は、円柱割裂試験より得られる引張強度を 1.4 で除して用いた。^[6]有限要素解析には市販の汎用非線形有限要素法プログラムを用いた。解析に必要な材料特性値を表 4 にまとめて示す。図

3 に3点荷重による曲げ試験を対象とした解析モデルの要素分割および境界条件を示す。ひび割れは、A-A' 面に沿って進むものと仮定し、この部分には弾性支床要素を配置した。そして、弾性支床要素のバネ特性を引張軟化曲線に一致するように与えることにより、仮想ひび割れモデルをシミュレーションした。逆解析の収束判定は、式(2)中の W が最小となるときのパラメータを決定することによって行った。

$$W = \sum_k (P_E(X_k) - P_N(X_k; s_1, w_1, w_2))^2 \quad \dots(2)$$

X_k : 観測点でのたわみ

P_E : 荷重 (実験値)

P_N : 荷重 (解析値)

ここで、 s_1, w_1, w_2 はそれぞれ図 2 の引張軟化曲線の特徴を表す量である。上記の観測点としてはたわみ 10mm に達するまでの 0.1mm ごとの点とし、合計 100 個とした。

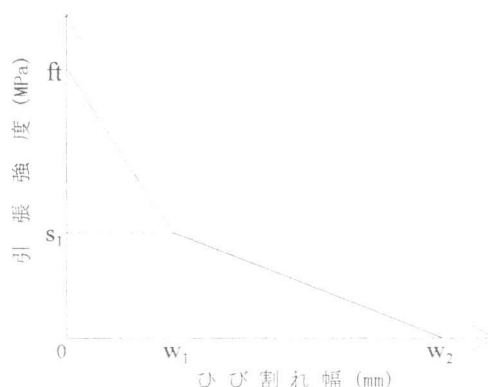


図 2 引張軟化曲線モデル

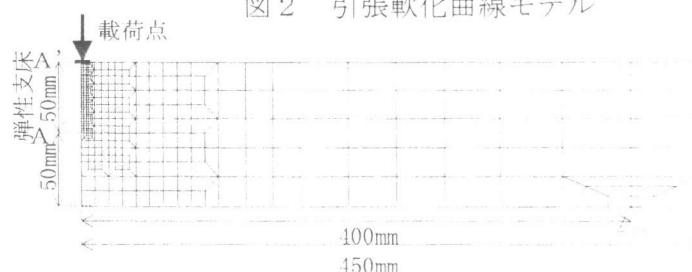


図 3 要素分割および境界条件

表 4 繊維補強高強度コンクリートの材料特性

シリーズ名	最大圧縮強度 (MPa)	最大引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	ポアソン比
鋼繊維 A	91.36	6.84	35.49	0.27
鋼繊維 B	82.30	6.45	33.52	0.27
鋼繊維 C	88.29	6.69	33.11	0.27

4. 実験結果および解析結果

4. 1 曲げ強度および曲げ破壊挙動

切欠き付き供試体に対する曲げ破壊試験結果を図 4,5,6 に示す。なお、試験結果は全て 3 つの供試体の平均値を示す。図 4 に各シリーズにおける曲げ強度および曲げ靱性係数を、図 5 に各シリーズにおける荷重-たわみ曲線を、図 6 に各シリーズにおける荷重-開口変位曲線を示す。これらの試験結果より、高強度コンクリートを短鋼繊維で補強した場合に鋼繊維の種類が力学的性質に有意な影響を与えていることがわかる。シリーズ別に比較した場合、曲げ強度・曲げ靱性係数については、A シリーズと C シリーズがともに高い値を示した。そしてわずかではあるが C シ

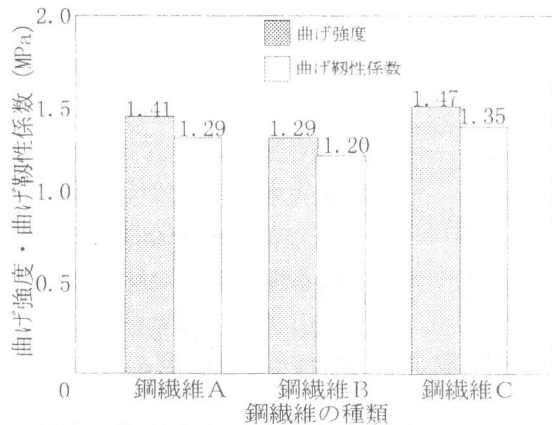


図4 曲げ強度・曲げ靱性係数の比較 (切欠き付き)

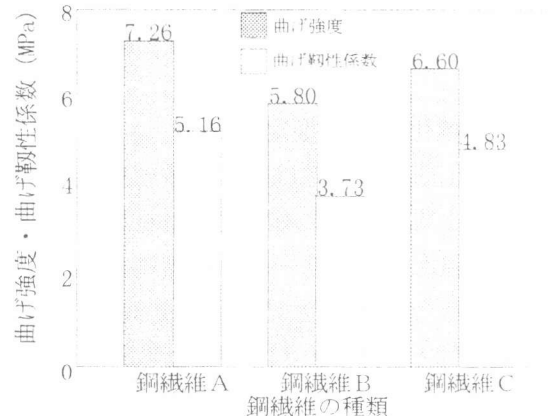


図7 曲げ強度・曲げ靱性係数の比較 (切欠き無し)

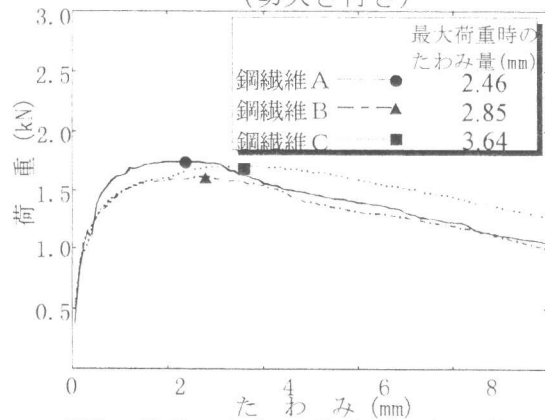


図5 荷重-たわみ曲線 (切欠き付き)

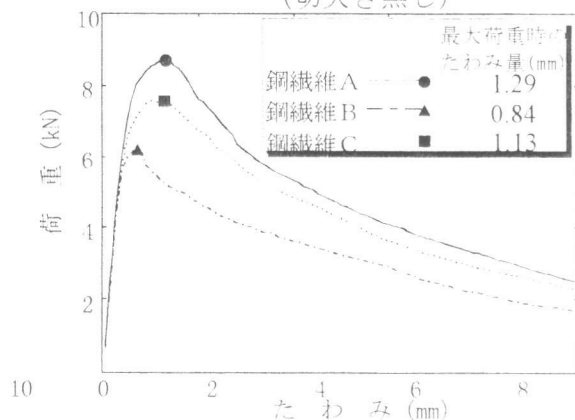


図8 荷重-たわみ曲線 (切欠き無し)

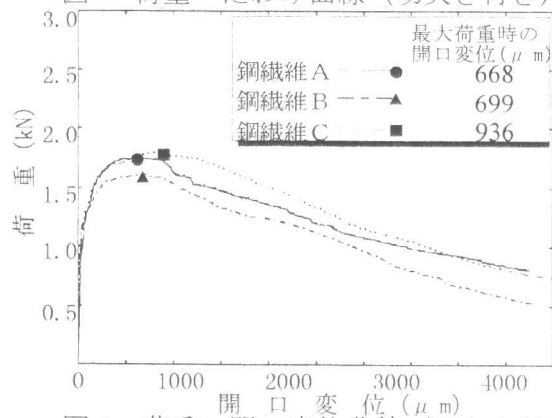


図6 荷重-開口変位曲線 (切欠き付き)

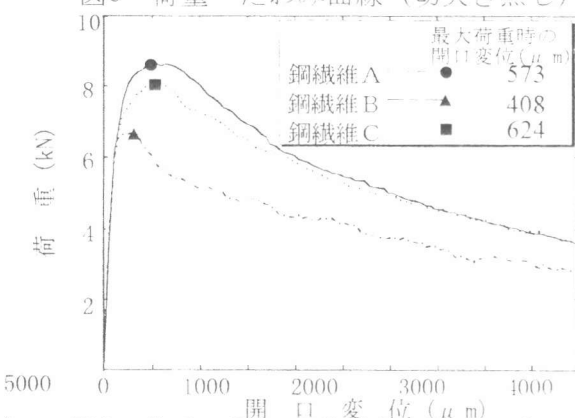


図9 荷重-開口変位曲線 (切欠き無し)

リーズの方が大きな値を示している。荷重-たわみ曲線および荷重-開口変位曲線について見ると、Cシリーズは最大荷重時におけるたわみ、開口変位量がA、Bに比べ大きく、変形量の大きな範囲まで鋼繊維による補強効果が見られた。同時に、最大荷重以後の荷重低下量が少ない点からも靱性効果が大きいことがわかる。

参考のため行った切欠きの無い供試体に対する曲げ破壊試験結果を図7.8.9に示す。なお、試験結果は全て3つの供試体の平均値を示す。図7に各シリーズにおける曲げ強度および曲げ靱性係数を、図8に各シリーズにおける荷重-たわみ曲線を、図9に各シリーズにおける荷重-開口変位曲線を示す。これらは切欠き付きの梁の結果とは異なる傾向を示しAシリーズにおける靱性改善効果が最も顕著であり、次いでCシリーズとなった。この原因としては、切欠きの無い供試体では多数のひび割れが発生して破壊にいたったのに対し、切欠き付きの梁ではひび割れの発

生・進展面が限定されたことが考えられる。すなわち切欠きの無い供試体ではひび割れ面が分散するために鋼繊維の分布の偏りよりも鋼繊維の様々な形状の違いが強度特性に影響しやすいが、切欠き付きの供試体では破断面が特定されるため、むしろ破断面に含まれる鋼繊維の本数が大きな影響因子となったと考えられる。実際、破断面における繊維本数を測定したところ、切欠き付き供試体に関しては、単位体積当たりの混入本数と破断面の繊維本数との間には似た傾向が見られることが確認された。したがって、切欠き付きの実験ではインデントおよびフックの有無よりも単位体積当たりの鋼繊維の混入本数が影響し、Cシリーズが曲げ強度や靱性の改善において優れた性能を示したと考えられる。

4. 2 引張軟化曲線

表 5 に各シリーズにおける 3 体の試験結果を基に逆解析から得られた引張軟化曲線のパラメータの平均値を示す。また図 10 は荷重-たわみ曲線の解析値と実験値の一例（鋼繊維 B シリーズ No1 供試体）である。図 10 に示すように、逆解析によるパラメータを用いた解析結果と実験結果は、比較的よく一致している。図 11 に各シリーズの逆解析から得られた引張軟化曲線の平均値を示す。荷重-たわみ曲線同様引張軟化曲線においても各シリーズで相違が認められる。以下、各シリーズに対して得られた引張軟化曲線を決定する主要なパラメータ (f_t, s_1, w_2) に与える影響について述べる。

表 5 解析結果

シリーズ名	f_t	s_1	$f_t - s_1$	w_1	w_2	偏差
鋼繊維 A	6.84	2.894	3.946	0.004	2.127	0.0216
鋼繊維 B	6.45	2.777	3.673	0.004	2.151	0.0111
鋼繊維 C	6.69	2.794	3.896	0.004	3.251	0.0159

ここでの f_t は逆解析ではなく円柱割裂実験での結果であるため切欠き無し曲げ供試体と同様の傾向が見られる。これに対し切欠き付き供試体の曲げ破壊強度は、単位体積当たりの鋼繊維混入本数が多くなるものほど高い値を示す傾向を示している。その中で、混入本数の差以上に A シリーズが高い値を示しているのは鋼繊維の表面のインデントによる効果ではないかと考えられる。次に s_1 に関して比較すると、今回の解析における傾向は f_t と同様であるが鋼繊維の種類による差は全体に小さくなっている。引張軟化曲線においてひび割れ直後の応力低下は、マトリクスであるコンクリートの引張破壊によって生じるものであり、繊維の引き抜きが生じないこの領域では鋼繊維の形状の違いによる鋼繊維とコンクリートとの付着性状の違いの影響はあまり受けず、このような結果が得られたものと考えられる。最大荷重点後の荷重低下が特に少なかった C シリーズに対する逆解析によって得られた w_2 は他のシリーズにくらべ大きく、ひび割れ幅の大きい範囲まで架橋応力が伝達されていることを示している。 w_2 に関しては鋼繊維のコンクリートマトリクスからの引き抜き性状が直接影響するため、インデントやフックの効果が大きいと予想される。結果として、

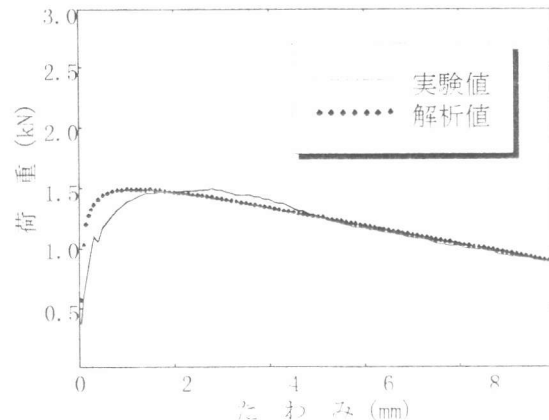


図 10 荷重-たわみ曲線

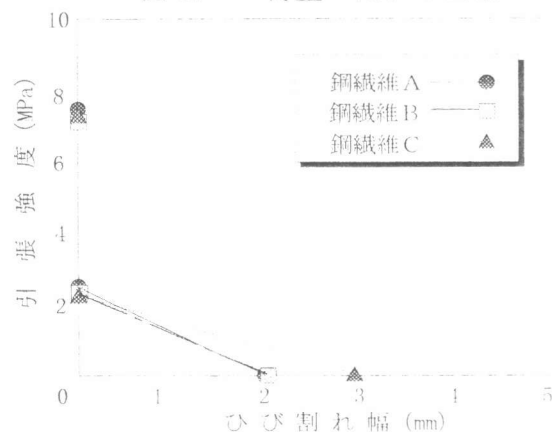


図 11 引張軟化曲線

A シリーズが小さい値を示したことから、繊維の引き抜きが進行した段階ではインデントの効果はフックよりも小さいことがわかる。

このように、断面のアスペクト比が大きく 1 本あたりの体積が小さいものほど（繊維の断面積が小さいものほど）鋼繊維の単位体積当たりの混入本数が多くなり、結果として f_t （引張強度）が大きく、かつ、広いひび割れ幅まで架橋応力を伝達することが明らかになった。また、A シリーズの結果から少なくともインデントに関しては、 f_t （引張強度）を増加させる結果が得られた。フックに関しては、引き抜きが進行した段階において効果の得られることが確認された。しかしながら、今回の実験では鋼繊維の形状が引張軟化曲線に与える影響よりも、単位体積当たりの鋼繊維の混入本数による影響が大きいと考えられる。したがって、その結果を分散ひび割れモデルの解析に有効に用いることができるかどうかについては、今後検討の余地があるものと思われる。

5. まとめ

形状の異なる 3 種類の繊維補強高強度コンクリートの曲げ破壊試験を行ったところ、曲げ強度・曲げ靱性係数、破壊時の挙動が鋼繊維の形状に影響されることが分かった。逆解析により求めた引張軟化曲線においても鋼繊維の種類による差異を確認したが、同様に繊維の分布の影響が大きいことを示唆するものであった。すなわち、断面のアスペクト比が大きく 1 本あたりの体積が小さく、単位体積あたりの繊維の本数が多いほど、広いひび割れ幅まで架橋応力を伝達するという結果が得られた。また、A シリーズの結果から少なくともインデントに関しては、 f_t （引張強度）を増加させる結果が得られた。フックに関しては、引き抜きが進行した段階において効果の得られることが確認された。

しかしながら、破断面を特定した切欠き付き供試体と参考のために行った切欠きの無い供試体の挙動に差が見られた。このことから切欠き付きの供試体に関しては、繊維の形状よりもコンクリート中での分布の影響が強かった可能性が考えられる。また、切欠き付き供試体と切欠き無し供試体の挙動の差は、実構造の解析に用いる引張軟化曲線を求める供試体の種類についても注意しなければならないことを示唆するものであり、これについては今後数値計算により実証していく予定である。

参考文献

- 1) 結城和宏、上原匠、小畑誠、信田佳延：高強度繊維補強コンクリートの破壊靱性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第 17 巻 第 1 号 pp.445-450.1995
- 2) 日置一秀、上原匠、梅原秀哲：高強度繊維補強コンクリートの引張軟化曲線に与える短繊維の影響に関する研究、土木学会第 50 回年次学術講演、第 5 部門 pp.338-339.1995
- 3) 鋼繊維補強コンクリート設計・施工指針案、(社)鋼材倶楽部スチールファイバー委員会
- 4) RILEM Draft Recommendation (50-FMC): Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by means of Three-point Bend Tests on Beams, Materials and Structures, Vol.18, No.106, 1985, pp285-290
- 5) 國分正胤：土木材料実験 pp.110-122.1991、技報堂出版社
- 6) 趙力采、小林一輔、西村次男：鋼繊維補強コンクリートの引張強度試験方法について、コンクリート工学年次論文報告集、pp.405-408.1979