

論文 ヤシ繊維補強ピナツボ骨材コンクリートの破壊力学特性

松永 直樹^{*1}・川口 哲生^{*2}・二羽 淳一郎^{*3}・Pagbilao Dominador^{*4}

要旨：ピナツボ火山より噴出した火山弾（以下，ピナツボ骨材と称す）を粗骨材として用いたコンクリートに，東南アジアで容易に入手可能であるヤシ繊維を混入し，その補強効果を破壊エネルギーと引張軟化曲線を基に検討した。その結果，ヤシ繊維を混入することにより破壊エネルギーの増加及び引張軟化曲線の変化が確認された。また，ピナツボ骨材とヤシ繊維を用いた，せん断補強を有しない RC はりの曲げ試験を行い，ヤシ繊維を混入することで，部材レベルにおいても補強効果が期待できることを確認した。

キーワード：ピナツボ骨材，破壊力学特性，ヤシ繊維補強

1. はじめに

フィリピンには，1991 年のピナツボ火山噴火の際に噴出された約 11km³ の膨大な火山弾が存在している。フィリピン政府及び民間研究所は，この火山弾を有効利用する方法として軽量コンクリートの粗骨材に適用することを検討している。筆者らはこれまでに，ピナツボ骨材を用いたコンクリートの力学特性及び破壊力学特性について研究¹⁾を実施し，その結果，ピナツボ骨材を用いたコンクリートは骨材の引張強度が弱く骨材自体が破壊するため，普通コンクリートに比べて破壊エネルギーが小さくなり，脆性的に破壊する傾向を示すことが結論として得られている。

雨宮ら²⁾は，軽量骨材を用いたコンクリートに種々の繊維を混入することで，破壊エネルギーが増加し，脆性破壊を防止できることを確認している。

そこで，本研究ではピナツボ骨材を用いたコンクリートに短繊維を混入し，混入量を変化させることにより補強の効果を検討した。また破壊力学に基づいて，破壊エネルギーを求め，さらに修正 J 積分法³⁾を用いて引張軟化曲線を算出した。

ピナツボ骨材を用いたコンクリートは資源の有効利用と共に低価格であることが特徴である。そして，これから得られるコンクリートもフィリピン国内での利用を対象としているため，補強に用いる短繊維は，粗骨材同様低価格であり，フィリピンで容易に入手可能であることが前提となる。さらに，ピナツボ骨材を用いたコンクリートの破壊エネルギーは，普通コンクリートの破壊エネルギーに比べて小さいためにその用途は限られることから，補強に用いる短繊維はそれほど高強度でなくても良いと考えられる。そこで，本研究では低価格かつ容易に入手可能であるヤシ繊維を繊維補強の材料として用いることにした。

また，部材レベルの実験として，ヤシ繊維混入量 0%及び 1.0%で RC はり供試体を製作し，載荷実験を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究で使用した材料特性及びヤシ繊維の物性値を表 - 1，表 - 2 に示す。

ピナツボ骨材とヤシ繊維は吸水率が非常に高いため，練混ぜの際に粗骨材と短繊維の吸水に

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*3 東京工業大学大学院教授 理工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)

*4 Technological University of the Philippines, Integrated Research and Training Center, Assoc.Prof.

表 - 1 使用したコンクリートの材料特性

種類	密度 (t/m ³)	その他
早強セメント	3.16	比表面積：4550cm ² /g
千葉県小櫃産陸砂	2.63	粗粒率：2.56
ピナツボ骨材	1.40	吸水率：31%
高性能 AE 減水剤	1.00	ポリカルボン酸系

表 - 2 ヤシ繊維の物性値

項目	物性値
密度(t/m ³)	1.20
吸水率(%)	121
アスペクト比	78.1
繊維長(mm)	25
断面径(mm)	0.32
引張強度(MPa)	99.0

表 - 3 示方配合

供試体名	W/C (%)	s/a (%)	単用量 kg/m ³						
			W	C	S	G		繊維	高性能 AE 減水剤
						5~13mm	13~20mm		
P-00	40	55	185	463	974	240	240	0	3.5
P-03	40	55	185	463	974	240	240	3.6	7.0
P-05	40	55	185	463	974	240	240	6	7.0
P-10	40	55	185	463	974	240	240	12	7.0
P-15	40	55	185	463	974	240	240	18	7.0

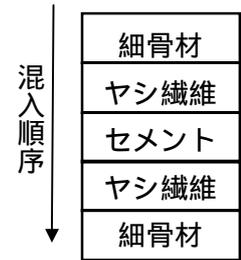


図 - 1 混入順序

よるスランプロスを防ぐ必要がある。そこで、粗骨材を 24 時間吸水させた後、室温 110℃、湿度 20%程度に保った乾燥炉で約 5 時間骨材表面の様子を見ながら乾燥させることで骨材表面の水分を蒸発させて、表乾状態の粗骨材を準備した。本研究で使用したピナツボ骨材を写真 - 1 に示す。



写真 - 1 ピナツボ骨材



写真 - 2 ヤシ繊維

ヤシ繊維は、繊維長を 25mm とし、24 時間吸水させた後、練混ぜの際に短繊維表面に付着した水分を取り除いて使用した。本研究で使用したヤシ繊維を写真 - 2 に示す。

表 - 3 にコンクリートの示方配合を示す。

ヤシ繊維量をコンクリート体積あたり 0%混入したケースを P - 00 ,0.3%を P - 03 ,0.5%を P - 05 , 1.0%を P - 10 , 1.5%を P - 15 とした。

練混ぜの際にファイバーボールが発生して不均一なコンクリートになることを防ぐため、セメント、細骨材、ヤシ繊維のみを、図 - 1 に示すような 5 層となるようにミキサーに入れてから 30 秒間空練りを行った。その後、練混ぜながら 30 秒間で水を入れ、ミキサーに付着したモルタルをそぎ落とした後に粗骨材を加えてさらに 2 分間練混ぜを行った。このように粗骨材を表乾状態に保ち、また練混ぜ方法を工夫することで、

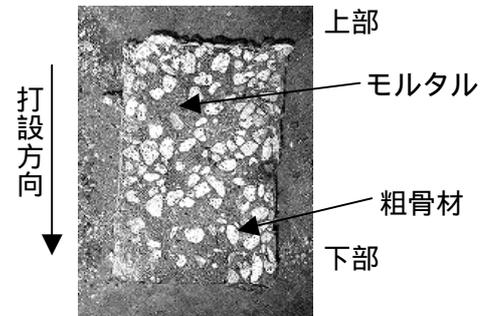


写真 - 3 割裂引張供試体断面図

ワーカビリティが良く材料分離が生じない均質なコンクリートを作成することができた。写真 - 3 に割裂引張試験に用いた供試体の試験後の破断面を示す。ピナツボ骨材は上部にやや多いが、下部にも存在しており、ほぼ均質なコンクリートであることが確認できる。

しかし、ファイバーボールができないようにヤシ繊維を混入することに非常に手間がかかることや、ワーカビリティを改善するために高性能 AE 減水剤を加える必要があることなど施

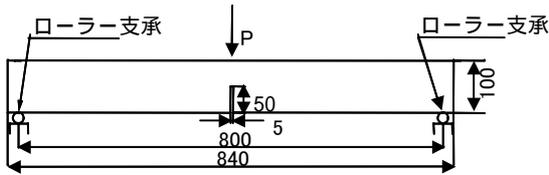


図 - 2 3点曲げ試験供試体概要図
(単位：mm)

表 - 4 破壊力学特性値の結果

供試体名	f'_c (MPa)	f_t (MPa)	G_F (N/m)
P - 00	23.7	2.0	43.7
P - 03	23.1	2.2	43.3
P - 05	22.4	2.3	58.4
P - 10	24.8	2.2	62.6
P - 15	24.5	2.3	81.4

工性や費用の点で、今後さらに検討を要する。

2.2 破壊力学特性値供試体概要

試験方法として、RILEM が推奨する切欠きはりの3点曲げ試験を行った。供試体概要を図-2に示す。荷重は変位制御試験機を使用し、変位速度0.1(mm/min)で荷重を作用させた。測定項目は荷重、載荷点変位、両支点変位及びリガメント部のひび割れ幅とし、供試体変位は載荷点変位から両支点変位の平均値を引いたものとした。支点部分での拘束を取り除くためにローラー支承を用い、水平反力が生じないようにした。

2.3 破壊力学特性値算出方法

破壊エネルギー G_F は、式(1)より求める。

$$G_F = (W_o + \frac{1}{2}mg\delta_o) / A_{lig} \quad (1)$$

ただし、 W_o : 実測された荷重変位曲線下の面積、 mg : 供試体の両支点間の重量、 δ_o : 終局時の変位、 A_{lig} : リガメント面積を表す。

引張軟化曲線は修正 J 積分法を用いて算出した。修正 J 積分法では切欠きはりの3点曲げ試験において荷重、供試体変位、切欠き先端部の開口変位を計測する。なお、引張軟化曲線の軟化開始応力は推定値であり、使用するデータに依存するため、ばらつきが大きくなる。そこで、

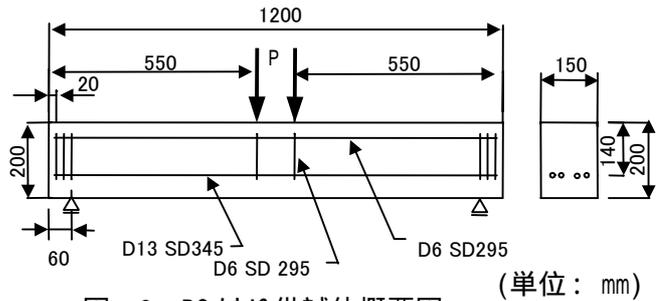


図 - 3 RC はり供試体概要図
(単位：mm)

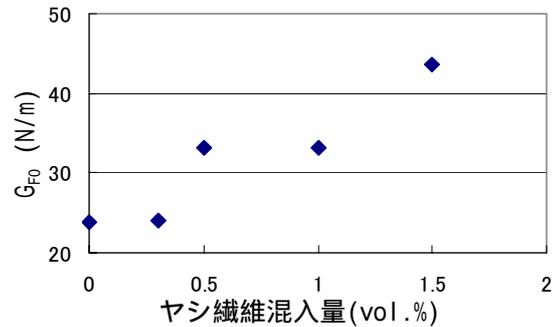


図 - 4 実験値より算出した G_{F0} の比較

本研究では軟化開始応力にコンクリートの割裂引張強度を用いることにした。

2.4 RC はりの載荷実験

本研究で行った RC はりの供試体概要を図-3に示す。供試体の形状は、斜め引張破壊を誘引すべく、せん断スパン比 a/d を 3.5 とし、有効高さを 140mm、せん断スパンを 490mm とした。軸方向鉄筋に異形鉄筋 SD345 ($f_y=385\text{MPa}$) を使用し、軸方向鉄筋比を 1.8% とした。また、せん断スパン内にせん断補強筋は配置していない。支点はローラー支持とし、拘束による水平反力が発生しないように支圧板と供試体の間にはテフロンシートの上にグリスを挟んだ減摩パッドを挿入した。荷重は荷重制御の試験機を用いて静的載荷を行った。

3. 実験結果

3.1 破壊力学特性値

表-4に実験から得られた破壊力学特性値の結果を示す。この結果から、圧縮強度及び引張強度はヤシ繊維混入量に依存せずほぼ一定であることが分かる。

CEB-FIP Model Code90 では破壊エネルギーはコンクリートの圧縮強度及び粗骨材最大寸法の

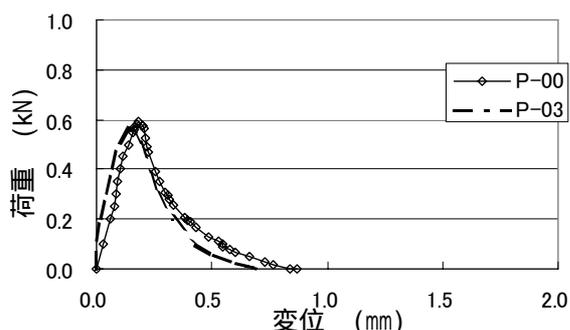


図 - 5 各実験ケースの荷重変位曲線

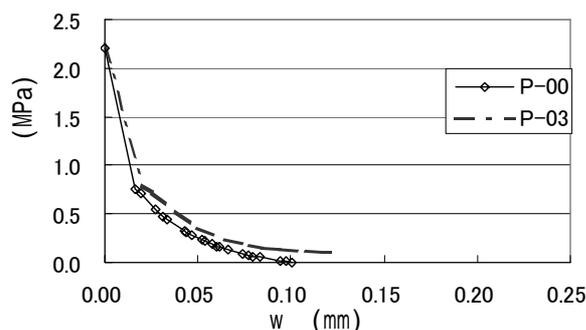


図 - 7 各実験ケースの引張軟化曲線

関数として与えられている。

そこで本研究でも、式(2)よりコンクリートの粗骨材最大寸法に依存する破壊エネルギーの基本値 G_{F0} を求め、 G_{F0} を材料の特性値として、比較することにした(図 - 4)。

$$G_{F0} = G_F / (f_c' / f_{co})^{0.7} \quad (2)$$

ただし、 G_F : 破壊エネルギー(N/m)、 f_c' : コンクリートの圧縮強度(MPa)、 f_{co} : 定数(10MPa)。

得られた G_{F0} を比較すると P - 03 は P - 00 とほとんど差が見られないが、P - 05 よりもヤシ繊維混入量が多い実験ケースでは、P - 00 に比べて G_{F0} が増加し、P - 05、P - 10 の G_{F0} は P - 00 の G_{F0} の約 1.5 倍、P - 15 では約 2 倍の値を得た。このことからヤシ繊維をコンクリート体積あたり 0.5%以上混入すると、破壊エネルギーの向上効果が顕著に見られることがわかる。また、その補強効果はヤシ繊維混入量によって変化する。

各実験ケースの荷重変位曲線を図 - 5、図 - 6 に示す。これらから、P - 05 は他のケースに比べてピーク荷重が高くなっているものの、その他のケースのピーク荷重は 0.6~0.7kN であり、大きく変化していないことがわかる。また、ピーク荷重に至るまでの剛性の変化もほとんど見ら

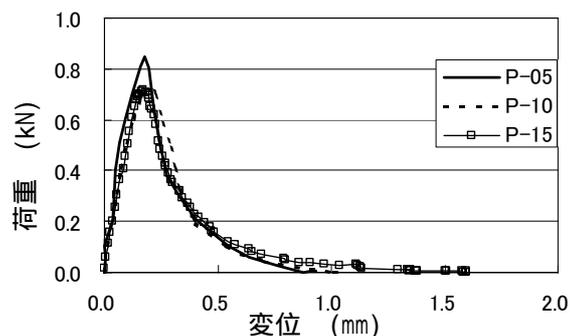


図 - 6 各実験ケースの荷重変位曲線

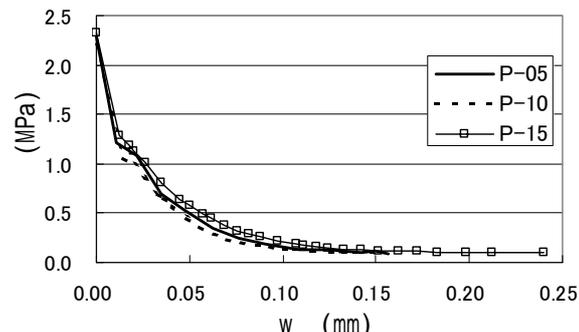


図 - 8 各実験ケースの引張軟化曲線

れない。しかし、ポストピーク領域では、軟化勾配に僅かに違いが見られることや、終局変位に差が見られることがわかる。

このことから、ヤシ繊維を混入するとポストピーク領域における変形性能が増加すると共に、荷重が急激に低下することへの抵抗性も増加することがわかる。さらに、その変形性能や荷重低下への抵抗性能はヤシ繊維混入量が多いほど大きくなっている。

修正 J 積分法によって求めた各実験ケースの引張軟化曲線を、図 - 7、図 - 8 に示す。図 - 7 に示すケース P - 00 と P - 03 の引張軟化曲線では、ピーク強度の 1/2~1/3 程度となる、折れ曲がり点での結合応力に大きな差は見られない。これは破壊エネルギーの値や荷重変位曲線の傾向が P - 00 と P - 03 ではほとんど差が見られなかったことから、ヤシ繊維混入量が少ない場合は繊維補強による折れ曲がり点応力の向上効果が少ないと考えられる。しかし、応力が十分低下した領域では、ヤシ繊維の効果によってわずかではあるが引張応力が維持されていることが分かる。

図 - 8 に示す P - 05、P - 10、P - 15 の引張軟化曲線では、P - 15 のケースで終局時の仮想ひび割

れ幅が大きく増加し，軟化勾配も緩やかになっている。P - 15 の荷重変位曲線を見ると，他のケースに比べて軟化勾配が緩やかであり，終局変位も大きくなっている。このことは，引張軟化曲線の変化によりもたらされたものと考えられる。一方，P - 05 と P - 10 の引張軟化曲線はほぼ重なっている。これは破壊エネルギーの値に差が見られず，また引張軟化曲線も同様の挙動を示したためと考えられる。

折れ曲がり点における結合応力は P - 00 や P - 03 が引張強度の 1/3 程度であるのに対して，P - 05 以降での折れ曲がり点における結合応力は引張強度の 1/2 程度にまで向上している。これはヤシ繊維がひび割れ発生後の引張応力を負担し，応力が急激に低下することを防いだためと考えられる。

以上のことから，ピナツボ骨材を用いたコンクリートにヤシ繊維を混入すると，短繊維の補強効果によって，折れ曲がり点での結合応力が高くなり，軟化勾配も緩やかになり，また仮想ひび割れ幅が大きくなるなどコンクリートの引張軟化特性が着実に変化することがわかる。そして，その効果はヤシ繊維の混入量を 0.5% 以上にするとより顕著になる。

P - 10 は P - 00 に比べて折れ曲がり点が向上し，軟化勾配も変化してヤシ繊維による補強効果がよく現れているが，P - 10 と P - 15 とでは折れ曲がり点はほぼ等しく，軟化勾配の変化も小さくなり，ヤシ繊維混入量を増加させたことによる効果があまり見られない。このことから，変形性能はヤシ繊維混入によって大きく改善されるが，ヤシ繊維の引張強度が低いため，軟化勾配の改善に関しては限界点が存在し，それに向かって漸近して行くものと考えられる。

3.2 RC はりの実験結果

実験では P - 00 に比べて P - 10 のピーク荷重が増加したが，どちらのケースともピーク荷重直前に斜めひび割れが急激に伸展し，ピーク荷重に到達すると荷重が急速に低下して破壊に至った。短繊維の引張強度が高い場合はピーク荷

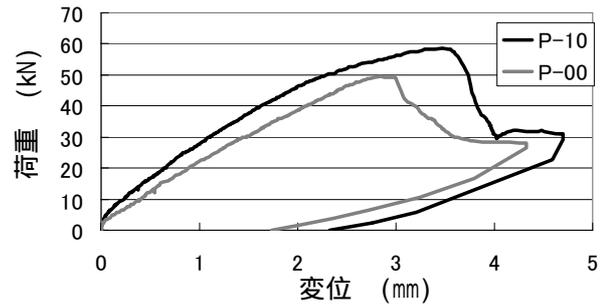


図 - 9 RC はりの荷重変位曲線

表 - 5 RC はりの実験結果

供試体名	f'_c (MPa)	$V_{u.exp}$ (kN)	$V_{u.cal}$ (kN)	$V_{u.exp}/V_{u.cal}$
P - 00	21.3	24.7	29.8	0.83
P - 10	22.9	29.2	30.6	0.96

重到達後も短繊維の効果によって脆性破壊が起こりにくくなると考えられるが，ヤシ繊維は引張強度が低いためピーク荷重後の脆性破壊を防ぐには至っていない。

実験から得られた RC はりの荷重変位曲線を図 - 9 に示す。

ケース P - 10 は P - 00 に比べてせん断耐力，剛性が増加し，ピーク荷重時における変位も増加している。さらに，荷重変位曲線の非線形性が増加していることが確認できる。ヤシ繊維がひび割れ発生後の RC はり中の引張応力を分担し，徐々に短繊維が破断していくことによりピーク荷重が増加し，非線形性も増したものと考えられる。

表 - 5 に実験から得られた RC はりのせん断耐力 $V_{u.exp}$ と，せん断耐力算出式に基づいた算出結果 $V_{u.cal}$ を示す。せん断補強を行わない RC はりのせん断耐力は式(3)に示す算出式⁴⁾を用いて求めた。

$$V_{u.cal} = 0.2f'_c{}^{1/3}d^{-1/4}p_w{}^{1/3}b_wd \times (0.75 + 1.4/(a/d)) \quad (3)$$

f'_c : コンクリート圧縮強度(MPa)， p_w : 軸方向鉄筋比(%)， d : 有効高さ(m)， a : せん断スパン(m)， b_w : ウェブ幅(m)。

今回の実験結果から， $V_{u.exp}/V_{u.cal}$ は P - 00 では 0.83 であったが，P - 10 ではその割合が 0.96 と約 16% 向上している。

土木学会コンクリート標準示方書では，軽量

骨材を用いた場合のせん断補強を行わない RC はりのせん断耐力は、普通骨材を用いて算出した $V_{u,cal}$ の 70%として良い⁵⁾とされている。しかし、今回の実験結果から、ヤシ繊維補強されたピナツボ骨材を用いた RC はりのせん断耐力を、普通骨材を用いた RC はりの 70%とすることは過小評価であると言える。ヤシ繊維補強をすることによって、圧縮強度が同等であれば、普通骨材を用いた RC はりと同等に扱ってよいレベルまでせん断耐力が増加することが確認できた。

図 - 10 に実験で観測された RC はりのひび割れ図を示す。

どちらの RC はりも斜めひび割れが発生しているが、P - 00 に比べて P - 10 は曲げひび割れがより多く発生していることが確認できる。ヤシ繊維を混入すると大きな斜めひび割れが発生する前の段階においてスパン全体でせん断に抵抗することで終局耐力が増加し、より多くの曲げひび割れが発生したと考えられる。

以上、ピナツボ骨材を用いたコンクリートに関して、引張強度の低いヤシ繊維を使用しても、繊維補強することの有効性が、部材レベルにおいても確認できた。

4. 結論

本研究により次の結論が得られた。

- (1) ピナツボ骨材を用いたコンクリートにヤシ繊維補強を行うことにより、破壊エネルギーが向上する。この効果はヤシ繊維混入量をコンクリート体積の 0.5%以上混入すると、より顕著に発揮される。
- (2) ピナツボ骨材を用いたコンクリートにヤシ繊維補強を行うことにより、引張軟化曲線の折れ曲がり点における結合応力が上昇し、終局時の仮想ひび割れ幅も増加する。
- (3) ヤシ繊維補強されたピナツボ骨材を用いた RC はりのせん断耐力は土木学会コンクリート標準示方書式の原式から算出した値の 96%となり、ヤシ繊維を混入することにより、せん断耐力が増加することが確認された。

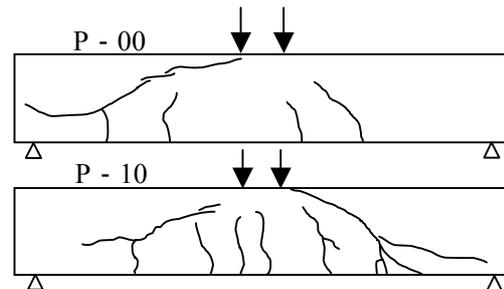


図 - 10 RC はりのひび割れ図

- (4) ピナツボ骨材を用いたコンクリートにヤシ繊維を混入する時は、均質なコンクリートにするために煩雑な作業と費用が必要であったことから、配合及び練混ぜについて今後さらに工夫する必要がある。
- (5) ヤシ繊維補強されたピナツボ骨材を用いたコンクリートは、フィリピンにおいて、設計強度が比較的小さい構造物への低価格材料としての利用が期待できると考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたりピナツボ骨材の入手に御協力を頂いた(株)クレオの財津寿太氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松永直樹, 川口哲生, 二羽淳一郎: ピナツボ火山噴出物を用いたコンクリートの破壊力学特性, 第 57 回土木学会年次学術講演会概要集, DISC2, V - 419, 2002.9
- 2) 雨宮美子, 川口哲生, 二羽淳一郎: 繊維補強された超軽量コンクリートの破壊力学特性値に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No2, pp.1453-1458, 2002.6
- 3) 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
- 4) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村 甫: せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, No.372, V-5, pp.167-176, 1986.8
- 5) 土木学会: 2002 年制定コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 2002