# 論文 天然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<sup>\*1</sup>・Joseph REMIGIO<sup>\*2</sup>・二羽 淳一郎<sup>\*3</sup>

要旨:フィリピンのピナツボ火山より噴出した火山弾(以下,ピナツボ骨材と呼ぶ)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な天然繊維であるヤシ,竹,およびサイザルを混入し,その補強効果を破壊力学的機構に基づいて検討した。その結果,天然繊維の混入により破壊エネルギーが増加することが確認された。また,ピナツボ骨材を用いたせん断補強筋を有しない RC はりに対して,補強効果に優れるサイザル繊維を混入し,載荷実験をすることで, 部材レベルにおいても補強効果が十分に期待できることを確認した。 キーワード:天然軽量骨材,破壊力学特性,天然繊維補強

1. はじめに

フィリピンには,1991年のピナツボ火山噴火 の際に噴出した約 11km<sup>3</sup>の膨大な火山弾が存在 している。フィリピンの政府および研究機関は, 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<sup>1)</sup>はこれまでに,この火山弾を粗骨 材に用いたコンクリート(以下,ピナツボコンク リートと呼ぶ)をヤシ繊維によって補強した際 の力学特性,および破壊力学特性について検討 し、その結果、ピナツボコンクリートはヤシ繊維 のような天然繊維を用いた場合でも破壊エネル ギーの増加ならびに引張軟化曲線の変化など, 破壊力学特性が改善されることを明らかにした。 しかし,ヤシ繊維の混入による破壊力学特性の 改善は十分とは言えず,実用化のためには,さ らにピナツボコンクリートの破壊力学特性を改 善する方法について検討する必要がある。

そこで,本研究では,既往のヤシ繊維による 補強効果と比較検討する形で,破壊力学特性の 改善に効果的となる天然繊維の種類ならびに, 混入量について検討を行った。破壊力学に基づ いて評価する観点から,破壊エネルギーの算出, および修正J積分法<sup>2)</sup>を用いた引張軟化曲線の 推定を行った。

なお,ピナツボコンクリートは,資源の有効 利用が可能となると共に低価格であることが特 長である。そもそも,ピナツボコンクリートも フィリピン国内における使用を前提としている ため,補強に用いる短繊維も,フィリピンで容 易かつ安価に入手可能であることが要求される。 このため,本研究では,前記の要件を満たす繊 維として,天然の竹繊維,およびサイザル繊維 を新たな補強材料として検討することにした。

また,部材レベルにおいて検討するため,サ イザル繊維を混入したピナツボコンクリートの RC はりを作製して,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の物性,および天然繊 維の物性をそれぞれ表 - 1,表 - 2に示す。

天然繊維およびピナツボ骨材は吸水率が非常 に高いため,モルタル中の水分を吸水してスラ ンプロスが発生する。このため,天然繊維は事 前に24時間吸水させた後,短繊維表面に付着し た水分を遠心分離操作によって除去した上で使 用した。

\*1 三井住友建設名古屋支店 工修 (正会員)

\*2 Department of Civil Engineering, De La Salle University

\*3 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 教授 工博 (正会員)

種類	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	その他
早強セメント C	3.14	比表面積:4550cm <sup>2</sup> /g
フライアッシュ FA	2.23	比表面積:3370 cm <sup>2</sup> /g
千葉県小櫃産陸砂 S	2.63	粗粒率:2.56
ピナツボ骨材 G	1.35	吸水率:33.6%, 最大寸法 20mm
高性能 AE 減水剤	1.23	ポリカルボン酸系
AE 減水剤	1.10	リグニンスルホン酸系

コンクリート配合(要素試験)

S

928

928

928

928

928

928

928

FA

146

146

単位量(kg/m<sup>3</sup>)

G

388

388

388

388

388

388

388

高性能 AE

減水剤

2.22

2.22

2.22

2.22

2.22

2.22

2.22

単位量(kg/m<sup>3</sup>)

G

404

404

表 - 3

s/a

(%)

55

55

55

55

55

55

55

W

178

178

178

178

178

178

178

W

195

195

195

195

表 - 4

s/a

(%)

51

51

51

51

С

444

444

444

444

444

444

444

С

341

341

W/C

(%)

40

40

40

40

40

40

40

W/

(C+FA)

(%)

40

40

40

40

配合

名

NF

C-05

C-10

B-05

B-10

S-05

S-10

配合

名

NF

S-05

S-10

S-15

表 - 1 使用した材料の物性

# 表-2 天然繊維の物性値

<b>壬</b> 壬 米百	平均径	繊維長	引張強度	密度
<b>个里</b> 犬只	(mm)	(mm)	(MPa)	$(g/cm^3)$
ヤシ	0.280	25	270	1.20
竹	0.241	25	351	1.34
サイザル	0.165	25	580	1.17



写真 - 1 天然繊維(左からヤシ ,竹 ,サイザル)

単位容

積質量

 $(t/m^3)$ 

1.94

1.94

1.94

1.94

1.94

1.94

1.94

短繊維

0

6

12

18

短繊維

0

6

12

7

13

6

12

AE

減水剤

2.4

2.4

6

3

単位容

積質量

 $(t/m^3)$ 

1.91

1.91

1.91

1.91

スラ	
ンプ	Bachite
(cm)	
10	· HOYEL
4	we have
1	SHATTER O
4	CEC. PO
2	

ピナツボ骨材 它盲

一一五	2	
]		
		細骨材
スラ	混 入	天然繊維
(cm)	順	セメント
16	ידו	天然繊維
14	↓	細骨材

図 - 1 混入順序

粗骨材は24時間以上吸水させた後、ウエスと 共にオムニミキサに投入して攪拌することで, 表面水を取り除いて表乾状態として使用した。 本研究で使用した天然繊維、およびピナツボ骨 材をそれぞれ写真-1,写真-2に示す。

表 - 3 はコンクリート要素試験に用いたコン クリート配合を示したものである。また,表-4 に示すように RC はりの試験では, コンクリ ートをより低価格化するため,AE 減水剤を使 用した。フライアッシュの使用,および単位水 量の増加によって,高性能 AE 減水剤を用いた 場合と同等の流動性を確保できた。実際に本配 合の場合,容積混入率 1.0%のサイザル繊維を 混入したときのスランプは 9cm であり, 容易な 打込みが可能であった。しかし,容積混入率を 1.5%まで増加させると施工性が著しく低下す るため、練混ぜ方法ならびに配合は今後さらに 検討が必要である.

9

4

配合名は、繊維を混入しないものを NF とし、 繊維を混入したものは、ヤシ(Coir)、竹(Bamboo)、 およびサイザル(Sisal)繊維の英語名の頭文字で 記し,例えば0.5%の竹繊維を用いた配合,およ び 1.0%のサイザル繊維を用いた配合は ,それぞ れB-05,S-10と表した。

練混ぜの際に繊維がファイバーボール状にな ってコンクリートが不均質化することを防ぐた め, セメント, 細骨材, 天然繊維を, 図-1に 示すような5層に分割してミキサに投入してか

### 146 821 404 2.4 341 341 404 146 821 2.4

821

821

S

コンクリート配合(RC はり)



図 - 2 3点曲げ試験供試体概要図(単位:mm) ら 30 秒間空練りを行った。その後,練混ぜなが ら 30 秒間で注水し,ミキサに付着したモルタル をかき落とした後に粗骨材を投入してさらに 2 分間練混ぜた(計3分間の練混ぜ)。粗骨材およ び天然繊維を事前吸水させること,ならびに練 混ぜ方法を工夫することにより,所定のワーカ ビリティーを有する材料分離のない均質なコン クリートを製造することができた。

2.2 コンクリート要素の破壊力学特性試験

(1) 供試体の概要

破壊力学特性値を算出するため,RILEM が推 奨する切欠きはりの3点曲げ試験を行った。そ の供試体の概要を図-2に示す。載荷には,変 位制御試験機を用い,変位速度0.1mm/minで荷 重を作用させた。測定項目は荷重,載荷点変位, 両支点変位およ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 平均値を差し引いたものとした。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) 破壊力学特性値の算出方法

破壊エネルギー $G_F$ は,式(1)より求めた。

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

ただし, *W*<sub>o</sub>: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<sub>o</sub>:終局時 の変位, A<sub>lig</sub>:リガメント面積を表す。

引張軟化曲線は修正」積分法を用いて算出し た。なお,引張軟化曲線の軟化開始応力は推定 値であり,使用するデータによって,ばらつき が生じやすい。そこで,本研究では軟化開始応 カ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 はり試験の供試体の概要 を図 - 3 に示す。供試体の形状は,斜め引張破



図 - 3 RC はり試験供試体概要図 (単位:mm)

表-5 破壊力学特性値の結果

配合名	f'c (MPa)	f <sub>t</sub> (MPa)	G <sub>F</sub> (N/m)
NF	23.1	2.12	49.2
C - 05	22.4	2.20	65.4
C - 10	24.0	2.20	66.6
В - 05	21.7	2.03	79.7
B - 10	23.5	2.07	76.4
S - 05	22.6	1.97	125.2
S - 10	22.2	1.93	270.9

壊が生じるように, せん断スパン有効高さ比 a/d を 3.5 とし, 有効高さを 200mm, せん断ス パンを 700mm とした。軸方向鉄筋に異形鉄筋 D16SD345 (fy=385MPa)を使用し, 軸方向鉄筋比 を 2.0%とした。また,斜めひび割れの観察を容 易かつ確実に行うため,スパン片側のみにせん 断補強筋 D6SD295 (fy=325MPa)を100mm間隔で 配置した。支点はローラー支承とし,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間にグリースを挟ん だ減摩パッドを挿入した。載荷は荷重制御の試 験機を用いて, 2 点静的載荷とした。

3. 実験結果

3.1 破壊力学特性値

表 - 5 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 f'。およ び引張強度 ft は天然繊維の種類や混入量に依存 せずにほぼ一定であることがわかる。これに対 し,破壊エネルギーは天然繊維の種類や混入量 によって改善の程度が異なることがわかる。

図 - 4,および図 - 5 に示す各供試体の引張 軟化曲線においても,短繊維の種類によって引 張軟化曲線の形状が大きく変わることがわかる。



短繊維補強を行った供試体では,NF に比べて 第一勾配が緩やかになるとともにその領域が占 める割合が小さくなるため,勾配が変化するブ レークポイントでの応力が増加していることが わかる.S-05,および1.0%の繊維を混入した 供試体では,第二勾配の占める領域が広がり, 仮想ひび割れ幅が増大していることがわかる. このことから,本研究で使用した天然繊維にお いても,鋼繊維および合成繊維などを用いた繊 維補強コンクリートと同様に架橋効果が期待で きることが明らかになった.天然繊維の種類に よって破壊力学特性の向上効果が異なる理由は, 以下に示すような要因によると考える。

表 - 2から,ヤシ繊維に比べて,竹繊維は引 張強度が 1.3 倍,サイザル繊維は 2.1 倍ほど大 きい値を示している。そのため,ひび割れ面に 存在している短繊維の断面積が等しければ,短 繊維の架橋効果によって伝達できる応力はヤシ 繊維が最も小さく,続いて竹繊維,サイザル繊 維の順で大きくなる。

また,サイザル繊維は本研究で用いた3種類の繊維の中でアスペクト比(断面径に対する繊 維長の比)が最も大きい。本実験のようにコンク リートに対する体積比(外割)で繊維を混入した



場合,同一混入量におけるサイザル繊維の混入 本数は他の繊維に比べて多くなる。したがって, ひび割れ面において応力を伝達している短繊維 が徐々に破断していく際に,ヤシ繊維,および 竹繊維と比べて,サイザル繊維は架橋している 短繊維本数が多く,伝達応力の低下が緩慢にな ったものと考える。

以上のことから,ピナツボ骨材を用いたコン クリートに天然繊維を混入すると短繊維の架橋 効果によって破壊力学特性が改善され,その改 善効果は天然繊維の引張強度およびアスペクト 比によって異なることがわかった。特にサイザ ル繊維の場合,補強効果が大きいことが明らか になった。

3.2 RC はりの実験結果

表 - 6 に実験から得られた RC はりのせん断 耐力 V<sub>u.exp</sub> と, せん断耐力算定式に基づいた算 出結果 V<sub>u.cal</sub>を示す。せん断補強を行わない, 普 通コンクリートを用いた RC はりのせん断耐力 は式(2)に示す式<sup>3)</sup>を用いて算出した。

 $V_{u.cal} = 0.2 f_c^{1/3} (d/1000)^{-1/4} p_w^{1/3} b_w d$ 

 $\times (0.75 + 1.4/(a/d))$  (2)

ここで f<sub>c</sub>': コンクリート圧縮強度(MPa),p<sub>w</sub>: 軸方向鉄筋比(%), d: 有効高さ(mm), a: せん



断スパン(mm),  $b_w$ : ウェブ幅(mm)

この表から,ピナツボコンクリートの破壊エ ネルギーが増加するにつれて,実験結果と算出 結果の比,V<sub>u.exp</sub>/V<sub>u.cal</sub>,が増加し,せん断耐力は 普通コンクリートを用いた場合に近づくことが わかる。これは,斜めひび割れ発生面において, 短繊維が応力を伝達してせん断力に抵抗するこ とで,RC はり部材のせん断耐力が増加したた めと考える。短繊維による応力伝達は,破壊エ ネルギーが増加するにつれて大きくなると考え られる。

実験から得られた RC はりの荷重変位曲線を 図 - 6 に示す。全ての供試体で最大荷重到達直 後に荷重が急激に低下し,斜め引張破壊によっ て終局に至った。短繊維の混入量を増加するに つれて最大荷重も増加し,S - 15 の最大荷重は NF に比べて約 30%増加している。また,S - 10 およびS - 15 の供試体では斜めひび割れ発生後, ほぼ一定の荷重がしばらく保持される現象が観 察された。この時,実験ではサイザル繊維が斜 めひび割れ面で徐々に破断しながらひび割れ幅 が急激に増加し,その後に,耐力が低下したこ とが観察された。つまり,斜めひび割れ面にお いて短繊維がひび割れ増大に抵抗することによ って荷重が保持され,その後,ひび割れ面に蓄 えられたエネルギーが急激に解放されたため,



このような現象が生じたものと考える。また, 短繊維を混入することによって,曲げひび割れ 発生後の剛性が増加していることがわかる。こ れは,曲げひび割れ面において短繊維の架橋効 果によって応力伝達が生じるためと考える。 3.3 FEM 解析

実験結果から,破壊エネルギーの増加が RC はりのせん断耐力の向上に寄与することが明確 になった。しかし,式(2)には破壊エネルギーの 項目が含まれておらず,RC はりのせん断耐力 推定に破壊力学特性の違いが及ぼす影響を考慮 できない。

そこで,本研究では破壊力学特性が RC はり の最大荷重に与える影響を明確にするため,各 はり供試体に用いたコンクリートの引張軟化曲 線を組み込んだ FEM 解析を行った。解析対象 は NF と,短繊維補強の効果が確認された S-10,および S-15 である。なお,解析には汎用 ソフト「DIANA」を用い,図-7に示す要素分 割図を,また要素には4節点アイソパラメトリ ック四辺形要素を用いた。コンクリートの構成 則として,圧縮特性にはThorenfeldt式を用いた。 また,引張特性は引張強度到達までは弾性体と した。引張強度到達後は,切欠きはりの3点曲 げ試験による荷重変位曲線から,多直線近似に より推定した<sup>4)</sup>の引張軟化曲線を,ひび割れ進





展方向を考慮し要素幅の 2 倍で除してひずみ に変換したモデルを用いた。鉄筋は降伏強度ま で弾性体,それ以降は弾性係数の 1/100 で漸増 するバイリニアモデルとした。図 - 8 ~ 図 - 10 に各要素モデルを示す。

コンクリートの諸特性は表 - 5 から得られた 値を用いた。図 - 11 に各解析対象の引張軟化曲 線からひずみに変換した応力 - ひずみ曲線を示 す。鉄筋の降伏強度は主鉄筋を 385MPa とし, せん断補強筋を 295MPa とした。

図 - 12 に各供試体の実験値と解析結果によ る荷重 - 変位曲線を示す。各供試体において, 解析結果の曲げ剛性が実験結果に比べてやや高 く評価されているものの,ピーク荷重は概ね評 価できている。この解析結果から,本研究にお いて,RC はりのせん断耐力を変化させた要因 はサイザル繊維混入による破壊力学特性の改善 効果であることを確認できた。

以上のことから,サイザル繊維によって補強 されたピナツボコンクリートを用いた RC はり は,短繊維の架橋効果によってせん断耐力が増 加することがわかり,部材レベルにおいても有 効であることが明らかになった。

## 4. 結論

本研究から得られた結論を以下に示す。

- ピナツボ骨材を用いたコンクリートに天然 繊維を混入することで,破壊力学特性は向 上する。
- ピナツボ骨材を用いたコンクリートの破壊 力学特性の向上度合は天然繊維の引張強度, 混入量ならびにアスペクト比に影響される。

- サイザル繊維で補強されたピナツボコンク リートを用いた RC はりのせん断耐力は, 繊維無混入のものに比べて増加する。サイ ザル繊維を 1.5%混入するとせん断耐力は 約 30%増加した。
- サイザル繊維補強により RC はりのせん断 耐力が増加する要因は,破壊力学特性が向 上するためであり,このことは FEM 解析に よっても裏付けられた。

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,なら びにサイザル繊維の入手に御協力を頂いた(株) テザックの山本基由氏に感謝の意を表します。

### 参考文献

- 松永直樹ほか: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,コンクリー ト工学年次論文集,Vol.25,pp.1825-1830, 2003.7
- 2)内田裕市ほか: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
- 二羽淳一郎ほか: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
- 4) 栗原哲彦ほか: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-3,pp.119-129,1995.5