# 論文 PC 混合より線をエネルギー消費要素に用いた RC 架構の耐震性能

小田 衛<sup>\*1</sup>·金尾 伊織<sup>\*2</sup>·河野 進<sup>\*3</sup>·渡邉 史夫<sup>\*4</sup>

要旨:高強度素線と低強度素線からなる混合より線を高復元性とエネルギー消費能力を有す る引張材として用いるため,繰返し荷重を作用させた要素実験を行い,座屈拘束により高い エネルギー消費能力を得る軸力ー伸び関係を有する拘束型混合より線を開発した。さらにモ デル化した混合より線をブレースとして用いた RC 架構の地震応答解析を行い,大きなエネ ルギー消費性能と小さい残留変形を共に満足する架構が実現できることを示した。 キーワード:混合より線,引張ブレース,エネルギー消費,座屈拘束

#### 1. はじめに

プレキャストプレストレストコンクリート (以下, PCaPC)構造は,緊張材 (PC 鋼材)を 通し配筋し,圧着目地部のみに変形を集中させ, 部材の損傷を防ぐことができる。渡邉ら<sup>1)</sup>は, PCaPC 構造の通し配筋に用いられるより線に, 強度の異なる素線を組み合わせた混合より線を 用いることで,高復元性を保ちつつエネルギー 消費能力を有する構造システムを提案し,実験 によりその効果を検証した。

混合より線が十分にエネルギー消費能力を発 揮するには、低強度素線が降伏し、座屈せずに 繰返し軸力を負担しなければならない。そこで、 混合より線はこれまでより線の周囲をグラウト するコンクリート曲げ部材に埋設する場合にし か用いられなかった。しかし、土木構造物や建 築物には、ケーブルやブレース方式の構造が多 く採用されており、これらにエネルギー消費能 力を持たせることができれば、耐震補強から制 振構造への適用まで、新築・既存を問わず、幅 広く応用できるため、エネルギー消費能力を有 する引張材の開発が必要とされている。

そこで,混合より線を,グラウトせずに高復 元性とエネルギー消費能力を有する引張材とし て用いるための基礎的研究と,ブレースとして

\*1 京都大学 工学研究科建築学専攻 大学院生 (正会員)
\*2 京都工芸繊維大学 工芸科学研究科造形工学部門 准教授 工博
\*3 京都大学 工学研究科建築学専攻 准教授 工博 (正会員)
\*4 京都大学 工学研究科建築学専攻 教授 工博 (正会員)

用いるための RC 架構の地震応答解析を行った。

### 2. 混合より線引張試験

### 2.1 混合より線

本研究で用いた混合より線は、図-1に示す ように、4本の超高強度素線と3本の低強度素 線からなる。各素線の材料特性は、表-1(a)に 示すとおりである。初期導入力と変形範囲を制 御して、超高強度素線は弾性範囲、低強度素線 は弾塑性範囲で変形するようにできれば、図-2に示すようにエネルギー消費能力を有する引 張材が実現できる。実際に混合より線が、満足 するような実挙動を示すか実験的に検証する。



### 2.2 実験概要

試験体は表-2に示すように,座屈拘束(2 種類)と端部拘束(3種類)の方法を組み合わ せた3種類の試験体を各2体ずつ製作した。

座屈拘束に関しては、材料特性を表-1(b)に 示す炭素繊維トウシート(FTS-C1-30)を,エポ キシ系接着剤を塗布したより線に巻きつけ,そ の上から同接着剤を塗布して硬化させ実現した。

端部拘束は、溶接とカーボランダムを用いた



Gracom, C-Fiber W-Fiber (a) ストランド端部 (b)変位計取付 写真-1 試験体の設置方法

表-	1	材料特性
	(a)	素線

	断面積 (mm <sup>2</sup> )	<b>降伏応力度</b> (N/ mm <sup>2</sup> )	降伏ひずみ
超高強度素線	19.8	2100	0.0103
低強度素線	19.8	570	0.0028
(b)炭素繊維			

繊維見付	厚さ (mm)	引張強度 (N/ mm²)	ヤング係数 (N/ mm <sup>2</sup> )
300g/m <sup>2</sup>	0.111	3400	$2.3 imes10^5$

	衣一2 試験体				
		端部拘束			
	试験体名	無	溶接	カーボ ランダム	
	毎	Gracom-1			
座	***	Gracom-2			
屈			W-Fiber-1		
拘	炭素		W-Fiber-2		
束 績	繊維			C-Fiber-1	
				C-Fiber-2	



(写真-1(a))。後者に関しては、楔の部分に のみ硬度の高いカーボランダムをより線の心線 にふりかけた。これは、混合より線の場合、低 強度素線が先に降伏して、ひずみが増大すると、 未降伏の高強度素線との間ですべりが生じ、そ の結果、低強度素線のみが楔から抜け出すこと があり、この現象を防ぐためである。

混合より線外周部6本の素線の試験体中央に ひずみゲージを貼付し,楔間変位および試験体 中央の伸びを変位計で計測した。試験体中央の 伸びは標点間距離を100mmとして,ばね式金具 に変位計を取り付けて計測した。(写真-1(b))

載荷装置は 500kN の万能試験機に混合より線の試験体を通してクロスヘッド上下に耐圧版をあて,既成の楔(ワンタイムグリップ)でより線両端を留めた。試験体全長は L=1500mm であるが,より線両端の楔間距離は,1220mm とした。

載荷は、6枚のひずみゲージで計測したより 線の平均ひずみで制御した。載荷履歴は図-3 に示すように、引張載荷時に超高強度素線が弾 性域に留まり、除荷時に軸力が引張に納まる範 囲で行っている。なお、より線に楔を噛ませる ため、載荷前に、低強度素線の降伏耐力(80kN) まで載荷し、その後繰返し引張実験を開始した。

## 2.3 実験結果

実験結果を図-4~図-6に示す。図-4は 軸力(F)と楔間伸びの関係、図-5は軸力(F)と試 験体中央に取付けた変位計で計測した伸びの関 係、図-6は低強度素線の軸力( $N_L$ )とひずみの関 係を示す。 $N_L$ は、超高強度素線のひずみにヤン グ係数、断面積を乗じて超高強度素線の軸力( $N_H$ ) を算出し $N_L$ =F- $N_H$ として求めた。それぞれ、(a) はGracom, (b)はW-Fiber, (c)はC-Fiberの荷重 -変位関係を示す。縦軸は引張軸力、横軸は楔 間変位を示す。

図-4(a)の Gracom-1,Gracom-2 で異なる履歴 を示した。これは、端部拘束無しによる楔のめ り込み量や、座屈補剛無による縒りによる初期 の伸び量が一致しなかったためであり、1サイ クル目以降の履歴形状は同じである。



図-4, 図-5より, 座屈補剛無の Gracom の 荷重 - 変位関係は, スリップ型の履歴を示し, エネルギー消費がほとんど無いことが分かる。 これは, 低強度素線の軸力が圧縮域に入り, 座 屈を起こすためである。一方, 炭素繊維で座屈 補剛した W-Fiber, C-Fiber はループを描きエネ ルギーを消費していることが分かる。

図-6より, Gracom は低強度素線の軸力が除 荷時に圧縮域に入ると,減少していたひずみが 増加に転じ,低強度素線が座屈していたことが 分かる。また, Gracom は,載荷当初ひずみが圧 縮の方向に増加するが,これはより線端部のす べり拘束をしておらず,超高強度素線の伸びに 低強度素線が追従できずに圧縮力を受けるため である。一方,炭素繊維で座屈補剛した W-Fiber, C-Fiber は,軸力が圧縮域に入ってもひずみは減 少し紡錘形の履歴を描く。(b)と(c)では,より 線端部のすべり拘束の違いはほとんど挙動には 現れず,カーボランダムは溶接と同等の効果が あることが示された。

 図-7に、6つの試験体の等価粘性減衰定数 h<sub>eq</sub>を示す。耐震補強要素としては、5%程度の 減衰があれば効果があると考えられるが、
 Gracomではいずれも5%を大きく下回っている。
 一方、W-Fiber、C-Fiberは5.5%以上を示しており、混合より線が、エネルギー消費能力を有する引張材として利用できる結果が得られた。

-939-



### 3. 数值解析

## 3.1 解析モデル1

引張材として骨組解析に組み込む場合に必要 な簡易モデルを提案する。

図-8に示すように、材長100mmの混合より 線の一部を取り出し、3つの部材からなるモデ ルを考える。それぞれの部材断面は、4つの材 料線要素からなり,元のストランド断面の断面 2次モーメントと同じになるよう材料線要素の 配置を決定している。なお、低強度素線に関し ては、3本の素線を2部材で表現しているため、 断面積は素線3本分の断面積を2等分し、断面 2次モーメントに関しては、もとの素線3本分 と一致するようにモデル化している。材料特性 は、バイリニアモデルで表現し、ヤング係数 E=2.05×10<sup>5</sup>N/mm<sup>2</sup>,降伏後の接線係数 E<sub>s</sub>=2.05×  $10^3$ N/mm<sup>2</sup>,低強度素線の降伏応力  $\sigma_{y}$ =570N/mm<sup>2</sup>, 超高強度素線 σ<sub>v</sub>=2100N/mm<sup>2</sup> としている。素線 周囲の座屈補剛材をバネでモデル化し, 剛性を 1.5×10<sup>5</sup>N/mm<sup>2</sup>とした。これは、事前に座屈を拘 東するために必要なバネの剛性を数値実験から

算出した値である。

使用したプログラムは,梁-柱有限要素を用 いた動的解析法を用いており,この精度は既に 検証済みである<sup>3),4)</sup>。一定速度で変形を与える条 件で,動的解析をし,そのときの復元力特性を プロットしている。部材は,材軸方向に10要素 に等分割し,各部材の質量を節点に与えた。

実験結果と解析結果の比較を図-9,図-10 に示す。より線中央部を標点間距離100mmで計 測した変位と軸力の関係を示し、図-9は軸力 と軸方向変位の関係、図-10は低強度素線軸力 と軸方向変位の関係である。それぞれ(a)は座屈 補剛を施していない Gracom-2,(b)は炭素繊維で 座屈補剛した W-Fiber-1の結果である。実線は解 析結果,点線は実験結果を示す。図-9より, 初期勾配,降伏荷重,除荷時の剛性は概ね実験 結果を予測できている。また,図-10では, W-Fiber-1の座屈耐力は10%程度の誤差で予想 している。解析モデル1は,低強度素線の座屈 を含めた混合より線の履歴復元力特性をうまく 予想できる。



### 3.2 解析モデル2

混合より線をブレースとして建築物に配置す る場合,解析モデル1ではブレースのたるみが 考慮できないため,図-11の解析モデル2を考 える。解析モデル2は,解析モデル1を軸方向 に12個つなぎ合わせて,ブレースとしたもので ある。解析条件は解析モデル1に従う。載荷履 歴は,1200mmのより線に対して,伸び 0.1mm ~15mmの範囲で繰返し載荷する(図-11(b))。

W-Fiber-1の解析結果を図-12に示す。縦軸は 軸力,横軸は楔間の伸びを示す。実験では,楔 が素線に食い込むまで楔内でより線がすべり, 初期勾配は解析で模擬できないため,最大振幅 を実験の伸びの最大振幅に一致させて解析し, 両者を比較している。解析モデル2は,繰返し 載荷時の剛性や耐力,軸力0付傍のたるみによ って応力負担がなくなる,といった実験結果を よく模擬している。また,楔が素線に食い込む までのより線のすべりが予測できていないが, 建築物に混合より線をブレースとして配置する 場合,ブレースは初期導入力を与えた状態から 出発するため,初期導入力以後の履歴性状が予 測できればよいと考えられる。

### 3.3 復元力特性のモデル化

図-13 に解析モデル1と解析モデル2の計算 結果を示す。縦軸は軸力,横軸は軸方向の変形 を示している。解析モデル2は力と変形をその ままプロットしているが,解析モデル1は全長 が100mmであるため,解析モデル2と合わせる ため,軸力はそのままで,変形のみを12倍した。 解析モデル1は、圧縮力を負担するなど、ケー ブルのたるみ挙動を正当に評価できない。しか し、解析モデル2は、除荷途中で座屈によって 剛性が低下し、軸力0近傍において、たるみに よって応力負担がなくなる等の挙動をモデル化 できている。

ただし、実大ブレースの解析に解析モデル2 を取り入れる場合、節点数が非常に多くなり、 計算負荷が大きくなる。そこで、汎用骨組解析 プログラムにも容易に適用できるように、混合 より線を非線形バネとして、その履歴特性を図 -14 のようにモデル化した。この復元カモデル は、超高強度素線が降伏しない範囲での弾性剛 性、低強度素線塑性化後の剛性において、解析 モデル2の挙動を模擬できており、ケーブルの 履歴復元力特性を表現する簡易モデルとして適 切であると考えられる。4章ではこの復元カモ デルを用いて解析を行った。



図-14 復元力特性のモデル化

### 4. 骨組解析

動的弾塑性解析プログラム(RESP-F3D<sup>5</sup>)を用 いて ELCENTRO-NS 波による地震応答解析を行 った。図-15 に示す1層1スパン RC 骨組にモ デル化した混合より線をブレースとして組み込 んだ。図-16,表-3に柱・梁の断面形状を示 す。各柱には540kN(軸力比0.1)の軸力を与え た。混合より線の復元力特性は図-14の実線に 示す弾性剛性 E= $1.88 \times 10^{5}$ N/mm<sup>2</sup>,降伏後の接線 係数 E<sub>s</sub>= $1.35 \times 10^{5}$ N/mm<sup>2</sup>とし,1本当たり150kN の初期導入力を与えたものを3本ずつ使用した。



	鉄筋	コンクリート 圧縮強度	
łì	主筋	12-D22	
ſΙ	せん断補強筋	φ9− <b>□</b> −@125	
洂	主筋	8-D22	TOMPa
木	せん断補強筋	φ9− <b>□</b> −@125	







解析結果を図-17に示す。(b)は混合より線を 3本ずつ組み込んだ結果(H4L3と表記),(a)は 比較の為に(b)の混合より線の初期剛性と同じ 剛性を有する完全弾性の PC より線をブレース に配したモデル(H7L0と表記),と架構のみで ブレースが無いモデル(フレームのみと表記) の結果である。(a)では、フレームのみと表記) の結果である。(a)では、フレームのみと H7L0 は同等の応答を示し、完全弾性の PC より線によ る耐震性能の向上はみられなかった。一方,(b) ではエネルギー消費能力を有する混合より線を 組み込むことにより、H7L0に比べて最大応答変 位・残留変形ともに約 65%の減少がみられた。 また、より線には常に引張力が作用していた。

### 5. 結論

(1)混合より線は,低強度素線を座屈拘束 することで,高いエネルギー消費能力が得られ ることを実験で確認した。(2)より線の一部を 取り出した単純なモデルを用いて,復元力特性 をモデル化した。(3) RC 架構の地震応答解析 の結果,混合より線をブレースとして用いると, 最大応答変位・残留変形ともに約 65%減少し, 大きなエネルギー消費能力と小さい残留変形能 力を共に満足できることを示した。

#### 謝辞

本研究の一部は,平成18年度国土交通省建設技術 開発助成(代表者:渡邉史夫)および平成18年度鹿 島学術振興財団研究助成(代表者:河野進)を用いて 行なわれた。また研究全般を通して,松田拓己君(当 時 M2)の多大な尽力があった。ここに謝意を表する。

### 参考文献

- Watanabe, F. and Nishiyama, M.: Controlled Yield Sequence of Reinforcement in Concrete Members, High Performance Materials in Bridges, ASCE Special Publication, pp. 87-96, 2002.
- 渡邉有香子ほか:混合より線を用いた PCaPC 梁の力学的性状に関する研究, コンクリート工学年 次論文報告集, JCI, Vol.27, No.2, pp. 571-576, 2005.
- 1) 門藤芳樹ほか:梁-柱有限要素法による立体弾塑 性骨組の動的大たわみ解析,日本建築学会構造系 論文集,第 572 号,pp. 105-110, 2003.
- 4) 金尾伊織ほか:座屈・破断を考慮したブレース付 骨組モデルと断層近傍強震動下の応答,日本建築 学会構造系論文集,第 577 号,pp117-122,2004.
- 5) 構造計画研究所, RESP-F3D, V10.00 利用者マニュ アル, 2006.