

論文 エネルギー消費能力を有するPC緊張材の開発とRC構造物にダンパーとして適用した場合の地震応答評価

笠 直介*1・市岡 有香子*2・河野 進*3・佐藤 尚隆*4

要旨: 高強度鋼素線と低強度鋼素線からなる混合より線を高い復元性およびエネルギー消費能力を両有する緊張材として用いるため、混合より線単体に繰返し引張荷重を作用させた素材実験を行い、外層の高強度鋼素線が、内層及び中心の低強度鋼素線を座屈拘束することにより高いエネルギー消費能力を示すことを確認した。また、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、解析上でも混合より線がエネルギー消費を行うこと、ブレースなしの場合に比べて最大層間変形角を低減できることを確認した。

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

兵庫県南部地震以降、構造物の安全性確保だけでなく、地震後の機能維持や補修可能性が重視されている。特に近年の都市型地震の被害から、損傷を修復不要なレベルに低減した構造物の必要性が明らかになった。建築物の耐震要素として広く用いられているものに、鉄骨ブレース（筋交）、鋼板壁、コンクリート壁などがある。これらは、強度によって地震力に抵抗することを基本としており、振動抑制の機能はない。損傷を低減するために、建物の応答を弾性範囲に留めることや、免震構造を用いることは大掛かりな仕組みが必要であるととも、コストも高い。

筆者らは、エネルギー消費能力を有するPC緊張材として、降伏強度の異なる素線をより合わせた混合より線を用いたダンパー型ケーブルを提案する。ダンパー型ケーブルは大掛かりな仕組みを必要とせず、免震構造や制震構造と同じ振動制御機能を発揮することが期待できる。また、鉄骨ブレース等の耐震要素と比較して、大変小さな断面で同等の水平耐力を発揮し、より効果的に構造物の地震応答を減少することが可能と考えられる。

本研究では、まず提案する混合より線の繰返し引張試験を行い、ダンパー型ケーブルが単体で、引張軸力下においてエネルギー消費性能を有することを確認した。次にダンパー型ケーブルをブレースとして適用したRC構造物を対象として、動的解析を行い、ダンパー型ケーブルがエネルギーを消費すること、及びダンパーなし架構に比べて地震応答が低減されることを確認した。

2. 実験概要

2.1 混合より線について

混合より線は、低強度と高強度の鋼素線をより合わせたものであり、図-1に示すように、地震荷重下で低強度鋼素線が圧縮及び引張側で降伏し、エネルギーを消費する。高強度鋼素線は低強度鋼素線と同じひずみ範囲で弾性挙動し、架構の残留変形を抑制する。地震時の建物変形による伸縮が、低強度鋼素線のエネルギー消費によるダンパー機能を生み出す一方で、超高強度鋼素線がケーブル全体の張力を常に引張に保つ役割と地震水平力に抵抗する役割を果たす。

本研究では、図-2に示すように、7本の低強度鋼素線（降伏強度 $f_y=2100 \text{ N/mm}^2$ ）の外側に12本の超高強度鋼素線（ $f_y=331 \text{ N/mm}^2$ ）を配置した19本よりの混合より線を用いた。超高強度鋼素線を低強度鋼素線の外側に配置することによって、ケーブルの伸縮を許しながら、超高強度鋼素線の横拘束効果によって、低強度鋼素線の圧縮応力時の座屈を防止する。

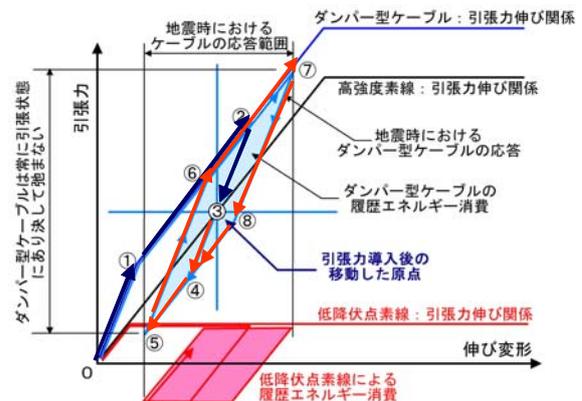


図-1 混合より線の地震荷重下における引張力-ひずみ関係

*1 京都大学 工学研究科建築学専攻 (正会員)
 *2 京都大学大学院 日本学術振興会特別研究員 DC (正会員)
 *3 京都大学 工学研究科建築学専攻 准教授 工博 (正会員)
 *4 科学技術振興機構 (JST) 研究員 (正会員)

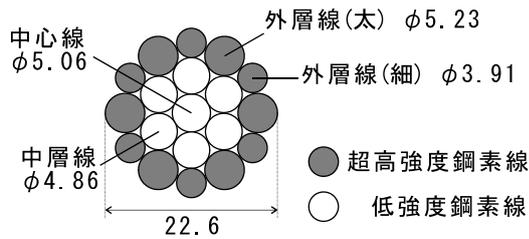


図-2 混合より線の断面図 (単位: mm)

2.2 実験目的

2.1 節に示した混合より線単体の繰返し引張試験を行った。実験の目的は、以下の4点である。

- (1) 軸力-ひずみ関係において、履歴がループを有し、図-1に示すエネルギー消費面積を示すことを確認する。
- (2) 外周部の超高強度鋼素線が内部の低強度鋼素線の座屈拘束することを確認する。
- (3) 実験結果から混合より線のエネルギー消費能力を定量化する。
- (4) グリップの定着性状を確認する。

2.3 試験体

低強度鋼素線の種類を実験変数とし、超高強度鋼素線と低降伏点鋼素線を組み合わせたより線を LC 試験体、超高強度鋼素線と軟鋼素線を組み合わせたより線を UC 試験体と称する。使用する混合より線の材料特性は表-1のとおりである。既成のワнтаイムグリップを 500kN の力で圧入している。

表-1 試験体の材料特性

| 試験体名 | 構成 | 部位 | 構成本数 | 断面積 mm ² | ヤング係数 N/mm ² | 降伏応力度 N/mm ² | 降伏ひずみ |
|------|-------|--------|------|------------------------|----------------------------|----------------------------|--------|
| LC | 超高強度鋼 | 外層線(太) | 6 | 21.48 | 205 | 2100 | 0.01 |
| | | 外層線(細) | 6 | 12.01 | 205 | 2200 | 0.011 |
| | 低降伏点鋼 | 中心線 | 1 | 20.08 | 205 | 338 | 0.0016 |
| | | 中層線 | 6 | 18.54 | 205 | 338 | 0.0016 |
| UC | 超高強度鋼 | 外層線(太) | 6 | 21.48 | 205 | 2100 | 0.01 |
| | | 外層線(細) | 6 | 12.01 | 205 | 2200 | 0.011 |
| | 軟鋼 | 中心線 | 1 | 20.08 | 205 | 331 | 0.0016 |
| | | 中層線 | 6 | 18.54 | 205 | 331 | 0.0016 |

※混合より線1本あたりの値

2.4 載荷装置

500kN のアムスラー型万能試験機を用いて引張試験を行った。図-3に載荷装置を示す。試験体の両端部は既成のワнтаイムグリップを 500kN の力で圧入した。今回は、グリップの定着性状を確認する目的も含まれているため、試験機のチャックは使用せず、クロスヘッドの上下に耐圧板を当て、グリップを耐圧版にかませることで混合より線に引張力を与えた。グリップ間の距離は 1200mm~1215mm であり、また、グリップ間距離において、高強度鋼素線と低強度鋼素線は、共に 3.5 回転している。

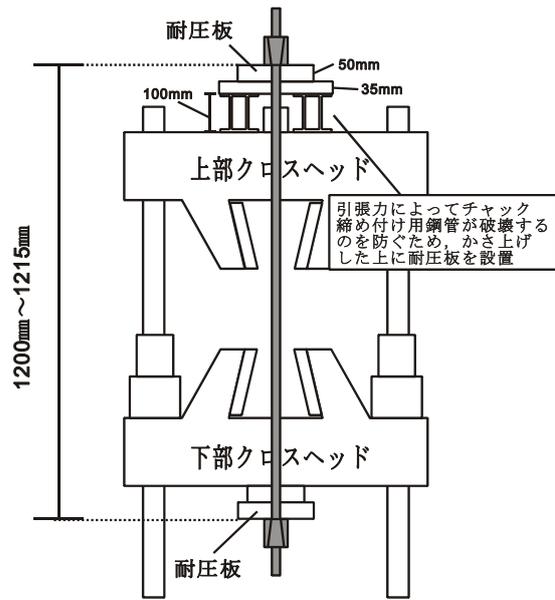


図-3 載荷装置断面図

2.5 載荷履歴

載荷は荷重制御により行った。混合より線の使用範囲は、超高強度鋼素線が弾性で、かつ、より線の総軸力が引張となる範囲である。載荷履歴を図-4に示す。P を引張荷重とし、 $120\text{kN} \leq P \leq 240\text{kN}$ を 3 サイクル、 $70\text{kN} \leq P \leq 290\text{kN}$ を 3 サイクル、 $10\text{kN} \leq P \leq 350\text{kN}$ を 10 サイクル、 $0\text{kN} \leq P \leq 420\text{kN}$ を 3 サイクル与えた。荷重にして 120kN 以上の振幅であれば低強度素線が圧縮側の降伏点に到達すると考えられるため、上記振幅は、最初の振幅時には低強度素線が圧縮側で降伏しない範囲にあたり、それぞれの載荷履歴において、4 サイクル目以降は低強度素線の圧縮側の塑性域まで達してループを描くと予想される。

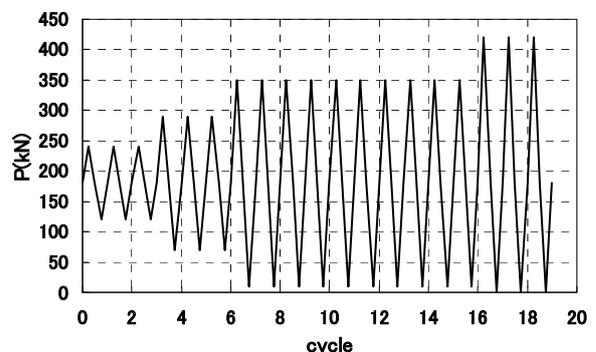
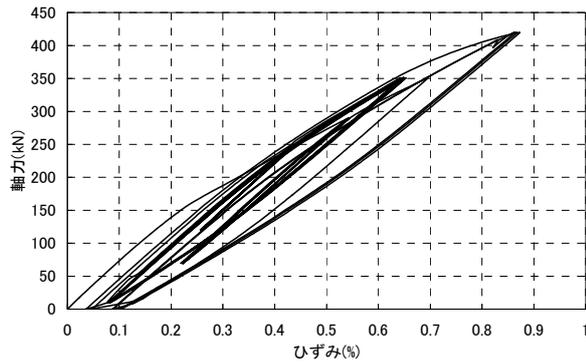


図-4 載荷サイクル

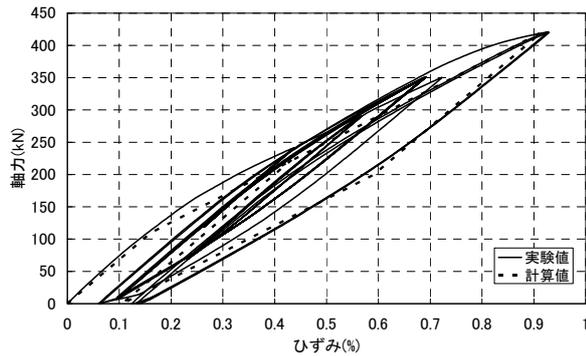
3. 実験結果

3.1 軸力-ひずみ関係

図-5に LC 試験体と UC 試験体の軸力-ひずみ関係を示す。ただし、ひずみは、外周部の超高強度鋼素

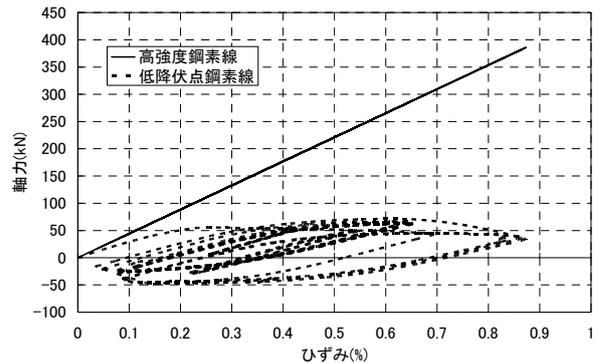


(a) LC 試験体

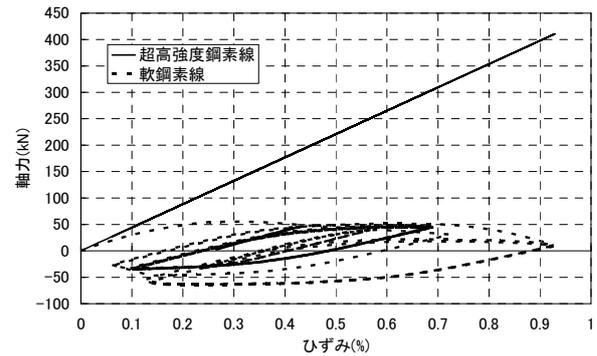


(b) UC 試験体

図-5 混合より線の軸力-ひずみ関係



(a) LC 試験体



(b) UC 試験体

図-6 各素線における軸力-ひずみ関係

線(太) 6本に貼付したひずみゲージ測定値である。図-5において、履歴がループを示していることから、混合より線のエネルギー消費能力が確認された。

また、図-6に超高強度鋼素線と低強度鋼素線における軸力-ひずみ関係を示す。実験の荷重範囲では、超高強度鋼素線は弾性であるため、超高強度鋼素線の軸力をヤング係数にひずみと断面積を乗じて求めた。低強度鋼素線の軸力は、より線の軸力から超高強度鋼素線の軸力を差し引いたものである。LC、UCとも低強度鋼素線の最大軸力が表-1に示す降伏軸力を若干上回る結果となった。これは、ひずみゲージを超高強度鋼素線の素線方向に貼り付けたため、低強度鋼素線との角度の違いからひずみに差が生じたことと、軸力の一部がより線を絞る力に消費されたことが起因していると考えられる。

図-6より、両試験体の低強度鋼素線の履歴はループを描きエネルギー消費をしていることがわかる。また、除荷時に低強度鋼素線の軸力が、圧縮側の降伏軸力でほぼ横ばいとなっており、ひずみの変化との不整合は見られなかった。これより、外層の超高強度鋼素線が内層及び中心の低強度鋼素線を良好に座屈拘束できたことが確認された。

グリップの定着に関しては、低強度鋼素線が降伏しひずみが増大すると、未降伏の超高強度鋼素線との間ですべりが生じ、低強度鋼素線がグリップから抜け出

す可能性があるが、実験においてはその現象は見られず、グリップを500kN程度で圧入しておけば端部拘束に問題がないことが確認できた。

軸力が0付近に近づいた時に、より線のよりが緩む方向に上下のグリップが回転する現象が見られた。ただし、より線の履歴復元特性に大きな影響を与えることはなかった。

3.2 等価粘性減衰定数

混合より線のエネルギー消費性能を定量化するため、等価粘性減衰定数を算出した。

提案する混合より線は、初期導入力を作用させた状態からのエネルギー消費を問題としているため、図-7に示すように各ループの中心をO'とし、ループの面積(ΔW)と弾性ひずみエネルギーにあたる斜線の面積の三角形面積($\Delta W'$)として、式(1)に適用した。

$$h_{eq} = \Delta W / (4\pi \times \Delta W') \quad (1)$$

図-8に算出したLC試験体とUC試験体の等価粘性減衰定数を示す。両試験体とも低強度鋼素線が圧縮側で降伏しない5サイクル目と6サイクル目を除いて、 h_{eq} が5%を上回っている。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ため、両試験体において効果的なエネルギー消費性能が確認された。

また、両試験体に大きな違いはないが、LC試験体の方が素線の強度差が若干ではあるが小さいため、LC

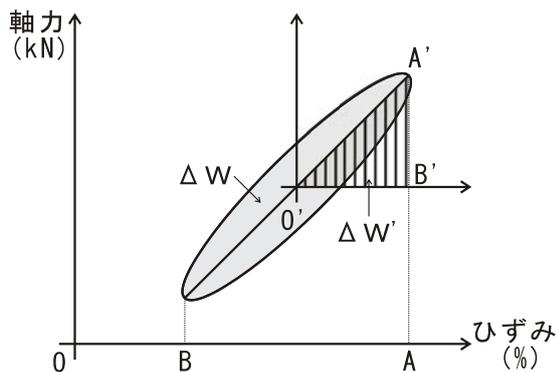


図-7 履歴ループ

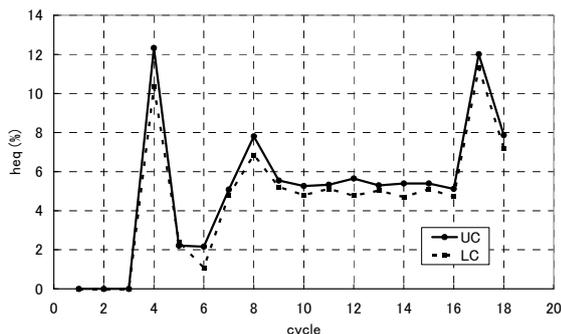


図-8 等価粘性減衰定数

試験体のエネルギー消費能力が UC 試験体よりもわずかに劣っている。

4. 数値解析

4.1 より線のモデル化

実験で用いた低強度鋼材は、低降伏点鋼素線と軟鋼素線で降伏強度及び混合より線の挙動にほとんど差がなくなったことから、解析では、軟鋼素線を用いた混合より線 (UC 試験体) のみを対象とした。混合より線は、低強度素線は表-1 に示す軸力及びひずみを降伏点とする完全弾塑性、超高強度鋼素線を弾性として、両者を重ね合わせてモデル化した。履歴特性を図-5 (b) に点線で示す。復元力特性は実験結果とよく一致しており、混合より線の挙動を模擬できている。

4.2 対象建築構造物

補強対象構造物を図-9 に示す。これは文献5) に示されている4スパン17層RCフレームの構造物の1構面を取り出し、図-9 に示すように、初期導入力を導入した混合より線を中央2スパンに6本ずつ計12本を各層に組み込んだものである。

4.3 解析手順

動的弾塑性解析プログラム (TDAP3⁶⁾) を用いて HACHINOHE-NS 波、JMA KOBE-NS 波による時刻歴応答解析を行った。

本解析では、まず混合より線に初期導入力を作用させ、次に動的解析を行った。また、混合より線は軸力

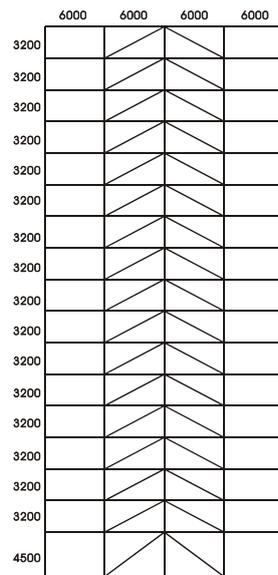


図-9 解析モデル (単位: mm)

が負になった場合は圧縮力を負担せずにとわむと考えられるため、ブレース下部に指向性並進バネ要素 (引張域では剛性がほぼ無限、圧縮域では剛性はほぼ0となる要素) を設置した。

減衰は初期剛性比例型とし、減衰定数を5%とした。時間増分は0.01秒とし、数値積分には Newmark β 法 ($\beta=0.25$) を用いた。また、解析継続時間は20秒とした。

表-3 にフレームのみの場合、及びフレーム+混合より線6本の場合における、固有振動数と固有周期 (1次~3次) を示す。

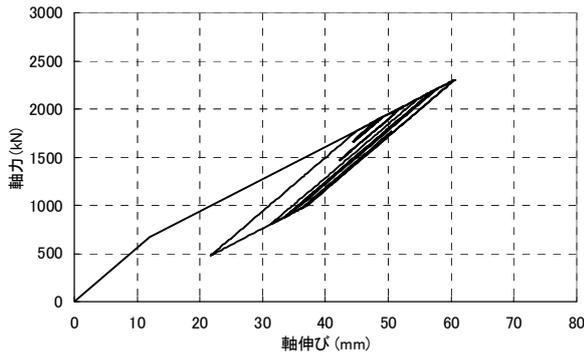
表-3 固有振動数・固有周期

| モード | フレームのみ | | フレーム+混合より線6本 | |
|-----|-----------|---------|--------------|---------|
| | 固有振動数(Hz) | 固有周期(s) | 固有振動数(Hz) | 固有周期(s) |
| 1次 | 0.88 | 1.14 | 0.91 | 1.10 |
| 2次 | 2.69 | 0.37 | 2.79 | 0.36 |
| 3次 | 4.81 | 0.21 | 4.98 | 0.20 |

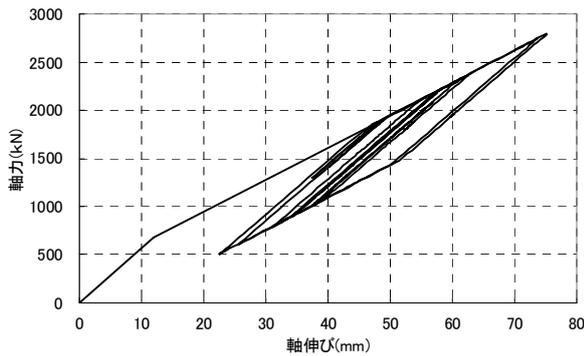
4.4 解析結果

図-10 (a), (b) に2層部分の混合より線6本分の軸力-軸伸び関係を示す。両地震時において、混合より線のエネルギー消費能力が発揮されたことが確認された。

また、図-11 (a), (b) に各層での最大層間変形角を示す。混合より線6本を組み込むことによって、HACHINOHE-NS 波に関しては2~8層において約20%、JMA KOBE-NS 波に関しては4~10層において約15%最大変形角が抑えられることが確認された。ただし、13層以上において最大層間変形角は低減できなかった。13層以上では、混合より線の軸力-軸伸び関係に

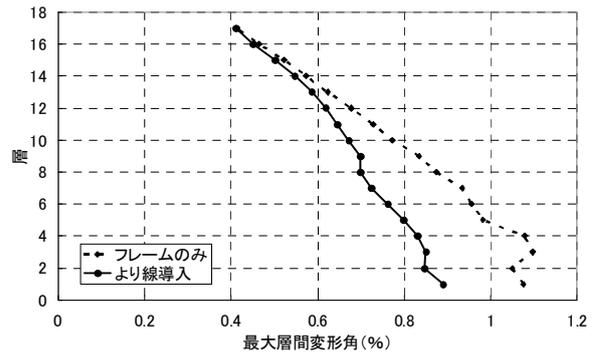


(a) HACHINOHE-NS 波

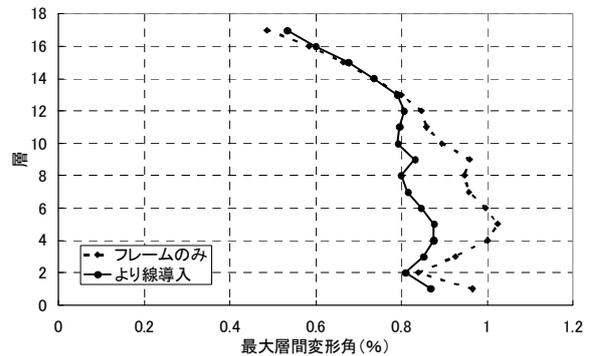


(b) JMA KOBE-NS 波

図-10 軸力-軸伸び関係



(a) HACHINOHE-NS 波



(b) JMA KOBE-NS 波

図-11 最大層間変形角

においても履歴にループが生じず、エネルギー消費は確認できなかった。

5. 結論

- (1) 混合より線単体の繰返し引張試験において、外層の高強度鋼素線が、内層及び中心の低強度鋼素線を座屈拘束することにより高いエネルギー消費能力を示すことを確認した。
- (2) 混合より線の軸方向履歴挙動を各素線の履歴特性の重ね合わせでモデル化し、RC 架構にブレースとして用いた場合に、混合より線が十分なエネルギー消費を行うことを確認した。
- (3) 混合より線をブレースとして組み込んだ RC 架構は、動的解析において、ブレースのない場合と比較して、最大層間変形角を 15~20% 程度抑制できることを確認した。

謝辞

本研究の一部は、(独)科学技術振興機構「JST イノベーションプラザ京都」育成研究費(代表者:渡邊史夫)を用いて行なわれた。住友電工スチールワイヤー(株)および(株)竹中工務店には、研究の遂行にあたり、多くの技術的助言をいただいた。また、研究全般を通

して、小田衛君(当時 M2)の多大な尽力があった。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 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
- 2) 渡邊有香子ほか: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集, JCI, Vol.27, No.2, pp. 571-576, 2005.6
- 3) 小田衛ほか: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, コンクリート工学年次論文集, JCI, Vol.29, No.3, pp. 937-942, 2007.7
- 4) 嶋津孝之, 福原安洋, 佐藤立美, 大田和彦:新しい鉄筋コンクリート構造, 森北出版株式会社, pp.220-221, 2002.11
- 5) 日本建築センター:エネルギーの釣合いに基づく耐震計算法の技術基準解説及び計算例とその解説, pp.300-307, 2006.6
- 6) アーク情報システム:TDAP3, Ver3.00 使用手引書, 2007

