

定着用膨張材を用いた新しい制振ブレース接合法について

その 1 予備試験

玉井宏章*・安武敦子*・原田哲夫*・一ノ瀬直人**

New Joint Method for Hysteretic Damping Brace and Frame Using Highly Expansive Material Part 1 : Preliminary Test

by

Hiroyuki TAMAI*, Atsuko YASUTAKE*, Tetsuo HARADA* and Naoto ICHINOSE**

It is very important to hold the High strength PC rods/strands when they are to be used as prestressing tendon or in tension tests. One of author have developed an effective anchoring method using Highly Expansive Material (HEM) in which the expansive pressure can be attained up to more than 50 N/mm² and the pressure is transmitted in a manner similar to that of the fluid pressure. The Joint between Hysteretic Damper and building Frame are required the high joint strength due to a Seismic Damping System's Design Requirements. It is desirable to develop an effective joint method. In this paper, we presents the new Joint system between Hysteretic Damping Brace and building Frame using the HEM. We performed the pulsating cyclic tension test under long-term loading and monotonic loading test on the Joint using HEM. The availability of the joint system are discussed through those test results.

Key words : Joint, Hysteretic Damping Brace, Highly Expansive Material, PC Strand

1. はじめに

ダンパーが容易かつ着実に取り付けられる鉄骨架構が制振架構によく用いられ、特に構面对角にガセットプレート設けてダンパーを連結する形式が典型的である。この制振ブレース用の接合部は大地震時においても主架構の変位を抑えて塑性化を防ぐ制振構造の要であるため通常の耐震構造のそれと設計条件は異なる¹⁾。

Mahin²⁾らは、制振ブレースを取付けた実大架構の破壊実験を行って、層間変形角 1/60 ラジアンでガセットプレート先端から破断し、制振ブレースと架構との接合部の問題を提起した。吉敦³⁾らは Mahin²⁾らのガセットプレートの破断は、梁柱の変形が高い剛性のガセットプレート溶接部に応力集中を引き起こすことであることを指摘した。

制振ブレースの接合部は、大地震応答中ではもとより、

ダンパーの耐力上昇時にも弾性挙動することを期待しているため、接合部係数は、耐震ブレースの最大 1.90 に比べ最大 2.90 と非常に大きく⁴⁾高力ボルト摩擦接合するとその本数は多くなり所要接合部長さは長くなり施工上の問題となる。土木分野では、接合に関して定着用膨張材を用いた方法が研究されている。

原田ら^{5),6)}は、CFRP より線や PC 鋼棒より線等を膨張材の高い膨張圧を利用して応力集中を極力さけ、軸方向力は高いが局所的な支圧や軸直交方向せん断力に対して弱い材を効率よく接合する方法、HEM 定着法 (Highly Expansive Material) を提案し、設計法を示している。

笠井ら⁷⁾は、応力の集中する制振ブレースの梁柱ガセット接合部について、新たな載荷法を用いた実験により、それらの設計資料を体系的に蓄積しつつある。

平成 28 年 6 月 28 日受理

* システム科学部門 (Division of System Science)

** 工学科研究科 (Graduate School of Engineering)

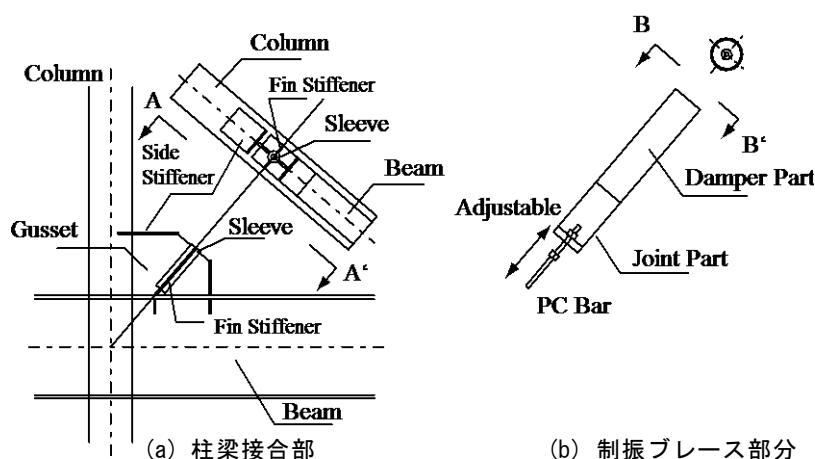


図1 新しい制振ブレース接合法の概要

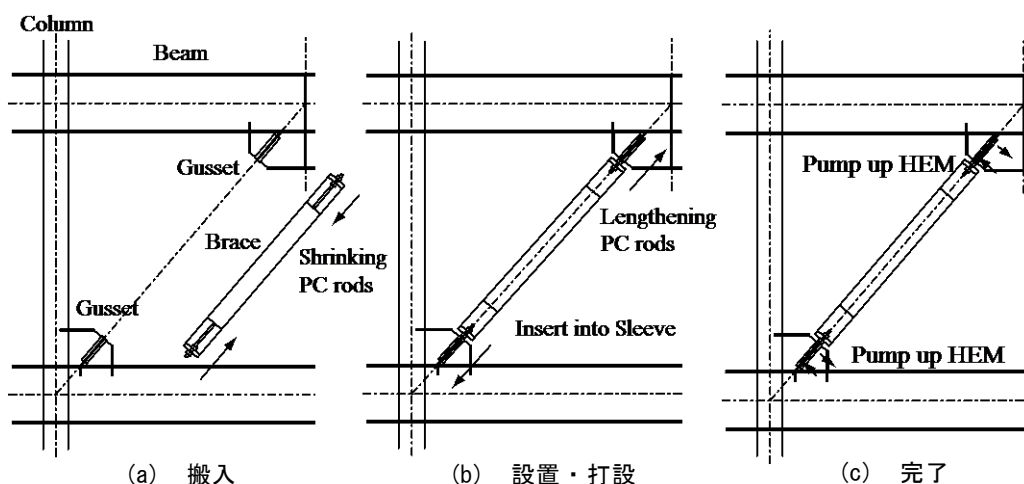


図2 制振ブレース接合の施工スキーム

制振ブレースでは、大きなダンパー力を短い接合長さで接合し、その部分では応力集中など起こさない力学的特徴とボルト孔位置のあけ直しなどなく、迅速かつ静音である施工性に優れた接合法が望まれている。

本研究は、制振ブレースを高強度の PC 鋼棒と定着用膨張材を用いて架構に接合する新しい工法を提案する。また、代表的な本接合部を模擬した試験体について引張片振り繰り返し載荷実験を行って実現可能性を検討したので報告する。

2. 接合法の概要

接合法の概要を図 1 に示す。制振ブレースのエネルギー吸収材は鋼材履歴ダンパー及び粘弾性ダンパーとし、ブレース端部は伸縮可能な高強度 PC 鋼棒(複数本も含む)からなるものとする。取り付ける梁柱隅角部には、サイドスチフナが取り付けられたガセットプレートがあり、フィンスチフナの取り付けられた鋼管スリーブがガセットプレートに溶接されている。

図 2 に制振ブレース接合の施工スキームを示す。ブ

レースを所定位置に設置し、高強度 PC 鋼棒を伸ばし、重ね長さを確認する。膨張材スラリーが漏れないように蓋をした後、膨張材を下方から上下の鋼管スリーブに圧入し、確認穴からスラリーが射出されることにより充填を確認する。水和反応熱による硬化不全を起こさないようフィンスチフナの温度確認をしながら所要の養生期間まで静置する。以上で接合工程は終了する。

膨張材による定着力は標準(膨張圧 50MPa)で 30N/mm²のせん断耐力が確保できるので、短い定着長さで大きな引張接合耐力が期待できる。また、摩擦ボルト接合のように中板・添板のボルト孔のくい違いで生じる施工しにくさは全くなく、接合部のブレース軸方向のくい違いは容易に修正・吸収できるという施工上のメリットがある。更にはガタが生じないことで高い接合剛性が期待できる。

このように新しい接合法は、接合部係数が大きく高い接合精度を必要とする制振ブレース接合法として有効かつ有用と考えられる。

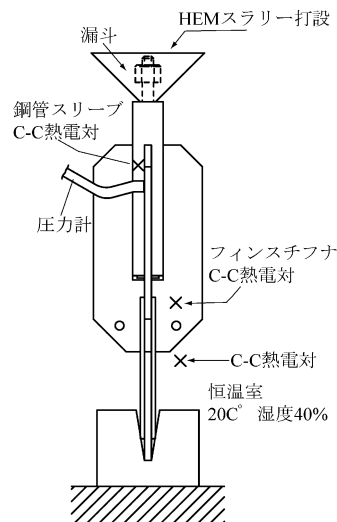
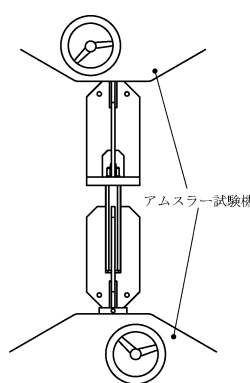


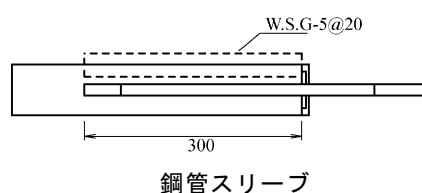
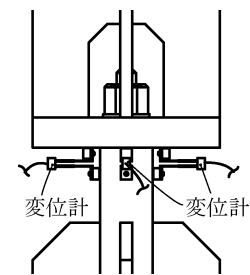
図5 接合工程施工実験の概要と計測計画



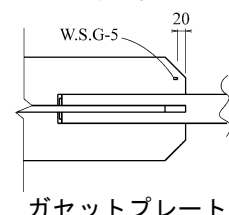
(a) 加力状況



(b) 口元相対変位計測治具



(c) 歪ゲージ貼付位置



ガセットプレート

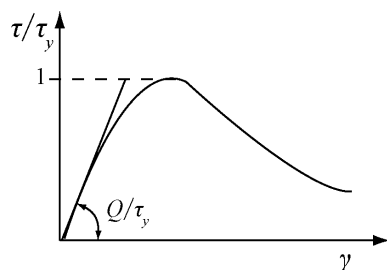


図7 $\tau / \tau_y - \gamma$ 関係

てる．制振ブレース部を上，梁柱接合部を下にして，2000kN アムスラー試験機のくさび式チャックに取り付ける(図(a)参照)．

引張荷重 N はアムスラー試験機の荷重計より，変位は鋼管スリーブ端とアンカープレートとの相対変位 δ を，クリップ型変位計(UB-2，東京測器)で(図(h)参照)，歪は検長 2mm の箔歪ゲージを用いて，鋼管スリーブには図(c)の位置に 20mm ピッチで鋼管軸方向垂直ひずみ ε_i を，ガセットプレートには先端から 20mm 位置のブレース軸方向垂直ひずみ ε_q を計測した．

鋼管軸方向垂直ひずみ ε_i を用いて，鋼管内壁近傍の膨張材のせん断応力 τ_i を求める．

$$\begin{aligned}\tau_i &= -\frac{1}{2\pi r_l} \cdot \frac{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_{i-1}}{x_{i+1} - x_{i-1}} E_s \cdot A_s \\ \tau_0 &\doteq -\frac{1}{2\pi r_l} \cdot \frac{-\varepsilon_2 + 4\varepsilon_1 - 3\varepsilon_0}{x_2 - x_0} E_s \cdot A_s \\ \tau_N &\doteq -\frac{1}{2\pi r_l} \cdot \frac{3\varepsilon_N - 4\varepsilon_{N-1} + \varepsilon_{N-2}}{x_N - x_{N-2}} E_s \cdot A_s\end{aligned}\quad (1, a \sim c)$$

図6 引張片振り繰り返し载荷試験の概要と計測計画

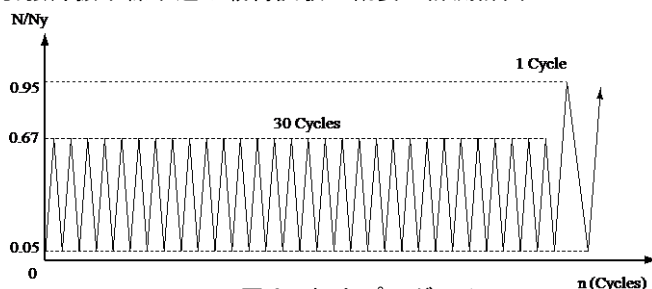


図8 加力プログラム

ここに，

- $E_s \cdot A_s$: 鋼管スリーブの軸剛性
- r_l : 鋼管スリーブの内半径
- x_i : i 番目の歪ゲージ中央の鋼管軸座標値
- ε_i : i 番目の歪ゲージの指示値
- $N+1$: 歪ゲージ貼付枚数

高静水圧下の膨張材の平均的せん断力-せん断歪関係は次式のようにモデル化できる²⁾．

$$\frac{\tau}{\tau_y} = \frac{G}{\tau_y} \cdot \frac{\gamma}{\gamma^a - \gamma_y^a + G} \quad (2)$$

ここに，

- γ : せん断ひずみ
- G, τ_y, a : 材料係数

であり， G は平均的せん断弾性係数， τ_y は弾性限せん断応力という物理的意味を持っている．

文献2によれば， G, τ_y, a の材料定数は初期静水圧

定着用膨張材を用いた新しい制振ブレース接合法について その1 予備試験

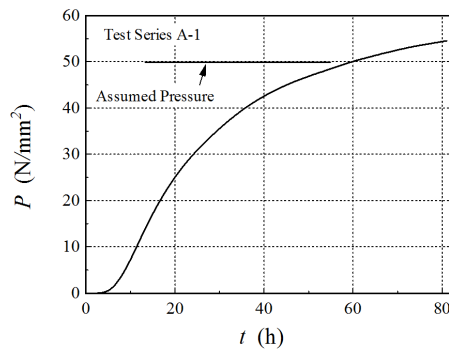


図9 膨張圧力-養生時間関係

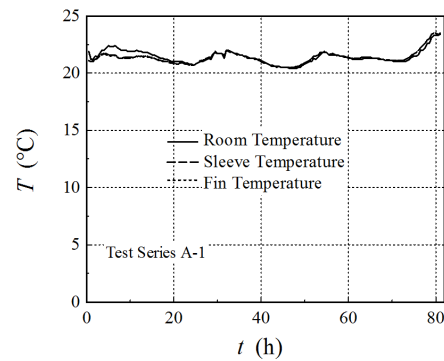


図10 温度-養生時間関係



(a) 練り混ぜ (b) 位置セット (c) 打設 (d) 恒温室養生状況 (e) 硬化完了状況

写真2 膨張材打設工程

P_0 と表面状態(PC鋼棒, 鋼管スリーブ)との関数であり, 表面状態を静摩擦係数 μ で表すことにすると, 次式のように表現できる.

$$\begin{aligned} G &= G(P_0, \mu) \\ \tau_y &= \tau_y(P_0, \mu) \\ a &= a(P_0, \mu) \end{aligned} \quad (3, a \sim c)$$

G, τ_y, a を仮定した(2)式を用いて実験結果と比較する.

加力プログラムを図8に示す. 加力は荷重制御として引張片振り繰り返し載荷を行う. 最大荷重振幅をPC鋼棒の全塑性軸力 N_y (494kN)の67%(1/1.5), 最小荷重振幅を N_y の5%とし, 30回繰り返す長期荷重繰り返し載荷試験(B-1シリーズ)と最大荷重振幅を N_y の95%, 最小荷重振幅を N_y の5%とし, 1回単調に行う短期荷重単調載荷試験(B-2シリーズ)を行った.

4. 試験結果と考察

4.1 施工試験(A-1シリーズ)の結果

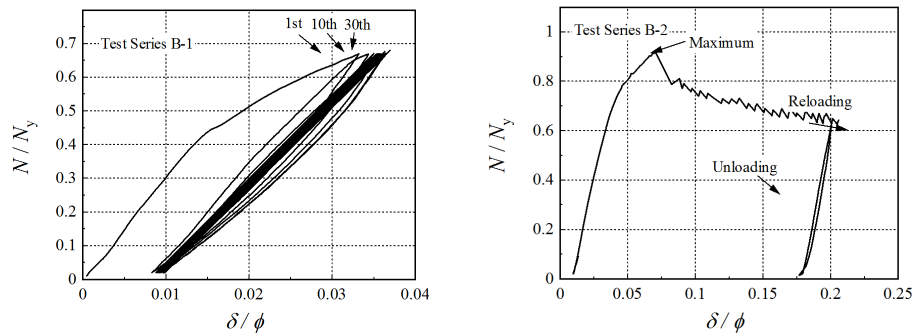
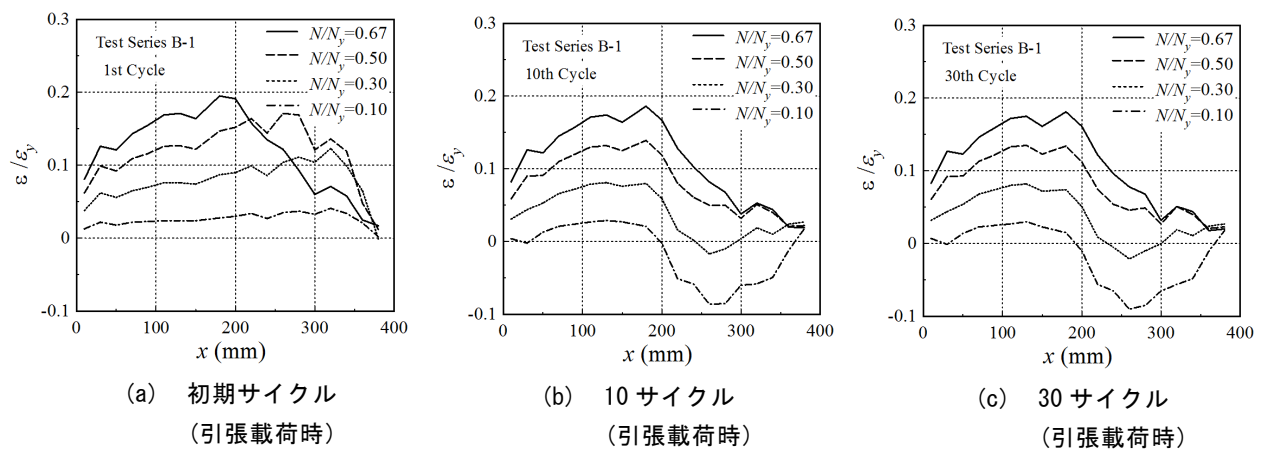
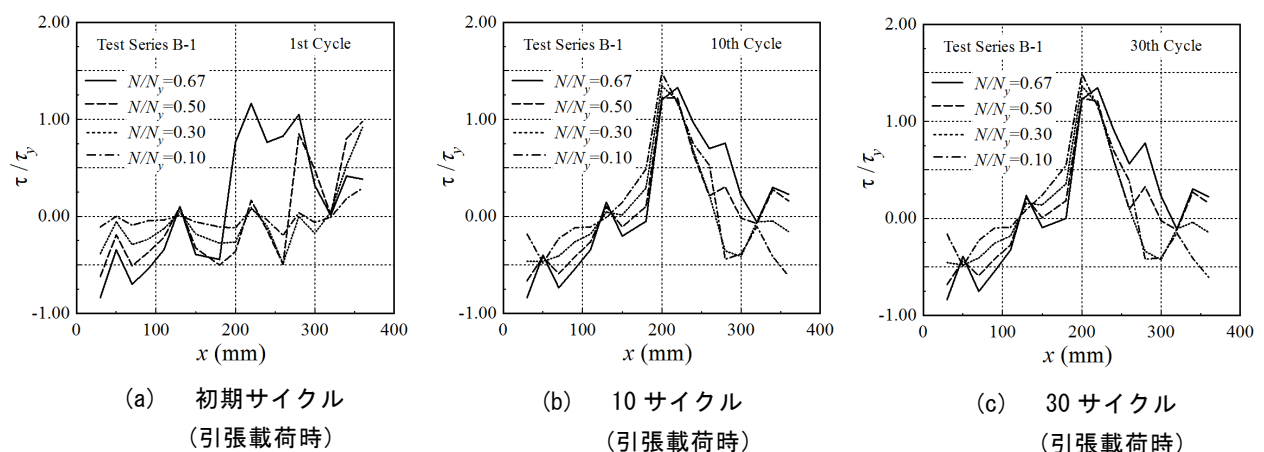
施工実験の結果(A-1シリーズ)を図9, 10及び写真2に示す. 図9は, 鋼管スリーブ内部の圧力 P と養生時間 t の関係を, 図10は, 雰囲気温度, 鋼管スリーブ表面温度 T_s , フィンスチフナ表面温度 T_f と養生時間 t との関係を示す. 写真1には, 制振ブレース接合施工における膨張材の打設工程での状態を示す.

これらの図表より, 以下のことがわかる.

- 1) 打設後24時間程度で所定の設計圧力50N/mm²が確保できる.
- 2) $\phi 26$ のPC鋼棒で, 弾性限軸力500kNクラスの制振ブレース接合部における接合工程で, 膨張圧に悪影響を与える水和反応熱による温度上昇はほとんど表れない.

4.2 載荷試験(B-1, B-2シリーズ)の結果

載荷試験(B-1, B-2シリーズ)の結果を図11~16, 写真2に示す. 図11には(a)B-1, (b)B-2シリーズについてPC鋼棒の全塑性軸力 N_y で無次元化した軸力 N/N_y と, PC鋼棒径 ϕ で無次元化した口元相対伸び δ/ϕ の関係を, 図12にはB-1シリーズについて(a)初期サイクル, (b)10サイクル目, (c)30サイクル目の引張載荷時における鋼管スリーブの歪分布 ϵ_s を, 鋼管の降伏歪 ϵ_{sy} で無次元化して示す. 図13はB-1シリーズについて(1,a~c)式で求めた, 弾性限せん断応力で無次元化した膨張材のせん断応力の分布を図12と同様に(a)初期サイクル, (b)10サイクル目, (c)30サイクル目の引張載荷時に分けて示す. 図14にはB-2シリーズについて(a)無次元化した鋼管スリーブ歪分布 ϵ_s/ϵ_{sy} と(b)無次元化した膨張材のせん断応力分布 τ/τ_y を示す. 図15にはB-1シリーズの30サイクル目の最大荷重時

(a) 長期荷重繰り返し載荷時
(B-1 シリーズ)(b) 短期荷重単調載荷時
(B-2 シリーズ)図 11 無次元化軸力 N/N_y - 無次元化口元相対伸び δ/ϕ 関係(a) 初期サイクル
(引張載荷時)(b) 10 サイクル
(引張載荷時)(c) 30 サイクル
(引張載荷時)図 12 鋼管スリーブのひずみ ($\varepsilon_s/\varepsilon_y$) 分布 (長期荷重繰り返し載荷試験 B-1 シリーズ)(a) 初期サイクル
(引張載荷時)(b) 10 サイクル
(引張載荷時)(c) 30 サイクル
(引張載荷時)図 13 膨張材の平均せん断応力 (τ/τ_y) 分布 (長期荷重繰り返し載荷試験 B-1 シリーズ)

定着用膨張材を用いた新しい制振ブレース接合法について
その1 予備試験

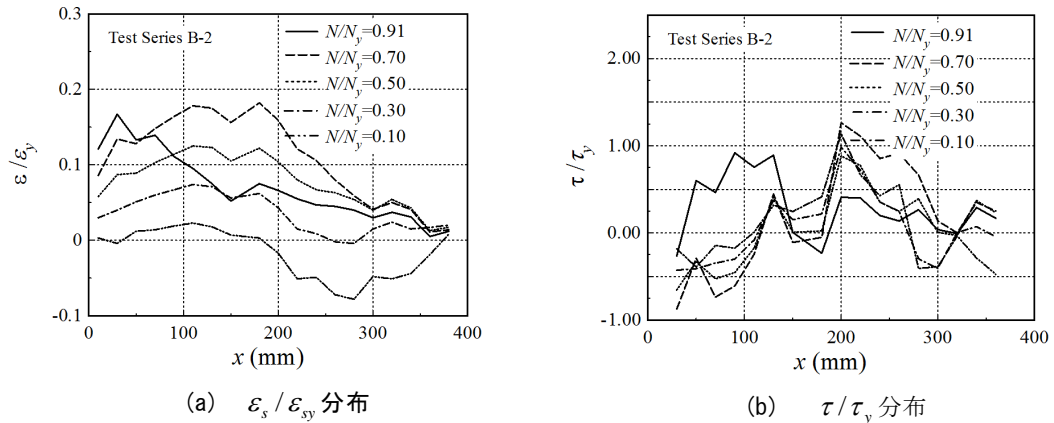


図 14 鋼管スリーブのひずみ分布 ($\varepsilon_s / \varepsilon_{sy}$) と膨張材の平均せん断応力分布 (τ / τ_y)
(短期荷重単調載荷試験 B-2 シリーズ)

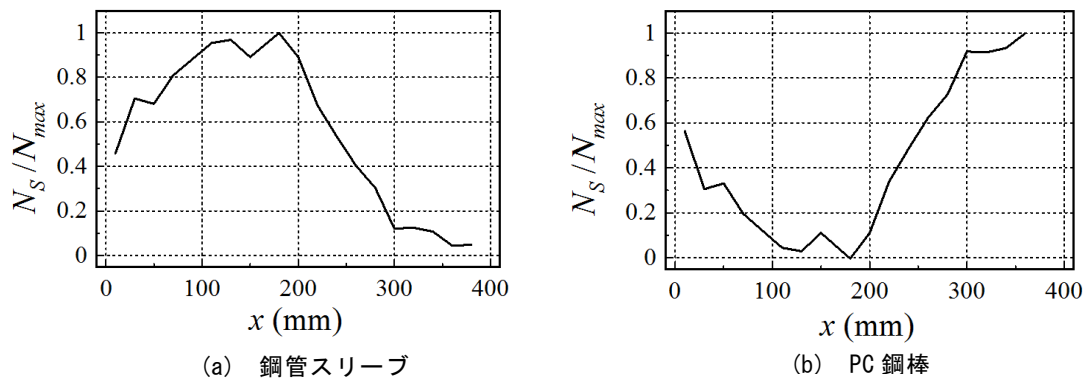
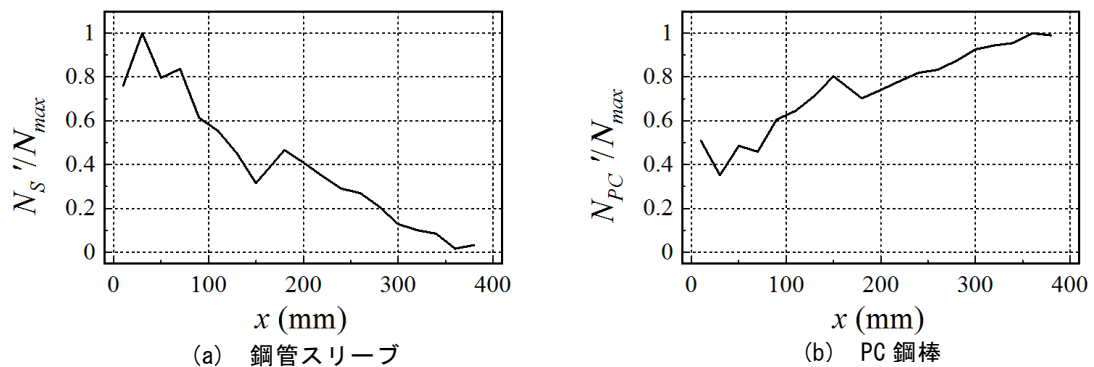
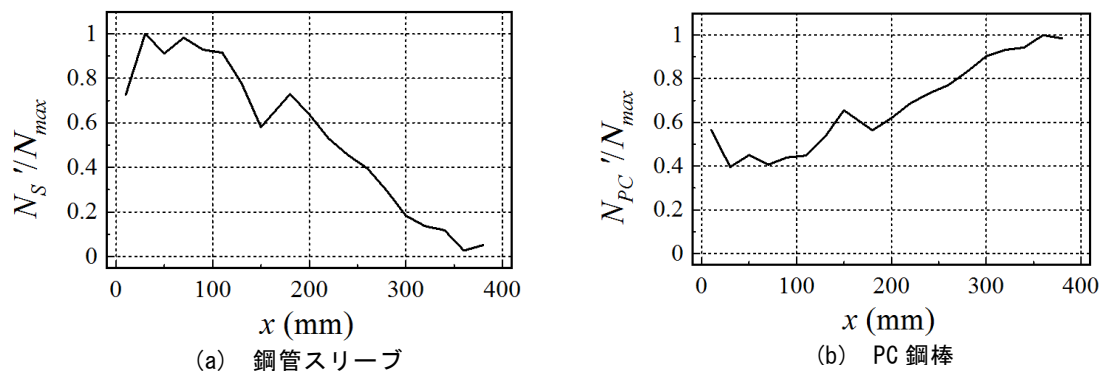


図 15 軸力分担比率 (30 サイクル目, 長期荷重繰り返し載荷試験 最大荷重時 B-1 シリーズ)



(A) 最大荷重時



(B) $\delta=2\text{mm}$ 時

図 16 軸力分担比率 (長期荷重繰り返し載荷試験 B-2 シリーズ)



写真2 載荷後(B-2 シリーズ)の試験体状況

における鋼管スリーブ分担軸力 N_s 及び PC 鋼棒の分担軸力 N_{PC} の分布を最大軸力 N_{max} で無次元化して示す。図 16 には B-2 シリーズについて図 15 と同様の関係を(A)最大荷重時、(B)口元変位 δ が 2mm 時について示す。写真 2 には B-2 シリーズ試験後の PC 鋼棒の状態を示す。

以上の図、写真より以下のことがわかる。

- 1) 図 11, 図 12 より長期荷重繰り返し載荷では、初期サイクルでは口元付近で鋼管スリーブに歪が残留するものの、それ以降は同じ歪分布形を維持する。それに伴って軸力-口元相対関係も弾性的挙動を示す。
- 2) 図 13 より長期荷重繰り返し載荷では、口元から 150mm の位置での膨張材せん断応力が大きくなり、それより遠い位置ではせん断力は漸減する傾向にある。
- 3) 図 13, 図 15 より弾性的な挙動をする荷重範囲内であれば PC 鋼棒の軸力は約 280mm で鋼管スリーブに完全に伝達できる、480kN クラスの制振ブレースの真の定着長さは 300mm 程度あればよい。
- 4) 図 11, 図 14 より、短期荷重単調載荷時では本接合部は最大荷重の 90% 付近まで荷重を良好に伝達できる。
- 5) 図 11, 図 16 より、短期荷重単調載荷時において最大荷重を超えても脆性的な引き抜けは生じず、摩擦ダンパーのように N_y の 85% の荷重を維持する。その際、膨張材のせん断応力の最大負担位置は口元より奥の部位で生じる。また PC 鋼棒の軸力が鋼管スリーブに完全に伝達される長さは、長期荷重時と大きく変化しない。
- 6) 写真 2 より、引き抜け後の PC 鋼棒の表面に大きなきずは見られない。

5. まとめ

膨張材を用いた新しい制振ブレース接合法を提案し接合施工試験及び接合部の引張片振り繰返し載荷試験を行って実現可能性を検討した。φ26 の PC 鋼棒の少

ない試験結果らの知見であるが、得られた知見は以下のように要約できる。

- 1) PC 鋼棒の全塑性軸力を基準として長期荷重下の引張片振り繰返し載荷時に本接合部は弾性挙動する。
- 2) 必要接合長さは 300mm 以下と比較的短い。
- 3) 単調引張載荷時において最大荷重以後、急激で脆性的な引き抜け現象は生じない。

謝辞

本研究における試験体は、株式会社大島造船所、生田泰清氏から提供いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本建築学会，鋼構造制振構造設計指針，丸善，pp.41-57,2014.11.
- 2) Mahin, S., et al.: Seismic Performance of Buckling Restrained Braced Frame Systems, 13th WCEE, DVD, 2004.8.
- 3) 吉敷祥一，植草雅浩，和田章，ガセットプレートの存在が周辺部材の力学挙動に及ぼす影響，ダンパーを組み込んだ靱性骨組の総合的な耐震性能向上その2，日本建築学会構造系論文集，663号，pp.2027-2036,2008.11.
- 4) 日本建築学会，鋼構造接合部設計指針，丸善，pp.259-290,2012.3.
- 5) 原田哲夫，永藤政敏，石川喬士，久野俊文，HEMを用いた鉄筋継手に関する実験的研究，コンクリート工学会年次論文集，Vol.23, No.3, pp871-876,2001.11.
- 6) 原田哲夫，生田泰清，佐々木謙二，大畑裕志，徳山ミヨーキン，定着用膨張材によるCFRPより線とPC鋼より線の定着機構に関する研究，土木学会論文集，E2（材料・コンクリート構造）Vol.78, No.4, 2014.4.
- 7) 笠井和彦，松田頼征，元結正次郎，吉敷祥一，制振架構接合部に対し新たな載荷法を用いた基礎的実験研究，日本建築学会構造系論文集，708号，pp.309,2015.2.