

CFT 柱と RC 梁からなるハイブリッド架構の実験的研究

Experimental Study of Hybrid Structures Composed of CFT-Column and RC Beams

田野 健治 KENJI TANO
 江頭 寛 HIROSHI EGASHIRA
 小坂 英之 HIDEYUKI KOSAKA
 山中 久幸 HISAYUKI YAMANAKA

本報告は、架構の剛性を確保するために梁を RC 造とし、柱断面の縮小を図るために柱をコンクリート充填鋼管（CFT）構造とした混合構造に関するものである。この新しい混合構造の実現性を検討することを目的として十字型架構実験を行った。その結果、梁端部の損傷は少なく、また、柱梁接合部内にナットを設けることで履歴性状の改善が可能であることが分かった。

キーワード：コンクリート充填鋼管柱、鉄筋コンクリート梁、混合構造、ナット、履歴性状

This report describes the new Hybrid Structures that are composed of CFT (Concrete Filled steel Tube) columns to reduce the section area and the R/C beams to improve rigidity. To verify the feasibility of this new structure, a series of loading tests were executed on the frames. The results confirmed that damage in the column connection part of the beams was minor, and hysteresis properties were improved by installing nuts to the main reinforcing bars within the beam-column joint.

Key Words: Concrete Filled Steel Tube Column, RC Beam, Hybrid Structure, Nut, Hysteresis Properties

1. はじめに

近年、建築物はより高層化かつ大スパン化の傾向にあり、建物重量を支持する柱断面は、以前にも増して大きなものとなっている。しかし、柱断面の増大は、意匠計画上の制約となることが多く、可能なかぎり小さな断面とすることが求められている。

柱断面を小さく抑え、かつ、高軸力の支持が可能な構造方式の一つとして、コンクリート充填鋼管構造（以下：CFT造）^{1),2)}がある。しかし、CFT造は一般的に梁を鉄骨造とすること、柱梁接合部にダイアフラムを設ける必要があることなどから、コストが増加する傾向にある。また、鉄骨梁を用いた架構は、鉄筋コンクリート造（以下：RC造）の梁を用いた場合に比べて剛性が低く、風揺れなどの居住性の面で性能が劣る。

このような観点から、コストを低減しつつ架構の剛性を高めて居住性を確保するために梁を RC 造とし、柱断面の縮小を図るために柱を CFT 造とした混合構造の開発を行うこととした。

本構造で想定される技術的課題は、①CFT柱断面が RC 柱断面に比べて小さくなることから、柱梁接合部内

の梁主筋の付着劣化に伴う履歴性状の悪化を改善する必要があること、② RC 梁のせん断力を CFT 柱に伝達する際にコンクリートと鉄骨間の摩擦力が十分に期待できないことから、明確なせん断伝達機構を設ける必要があることである。

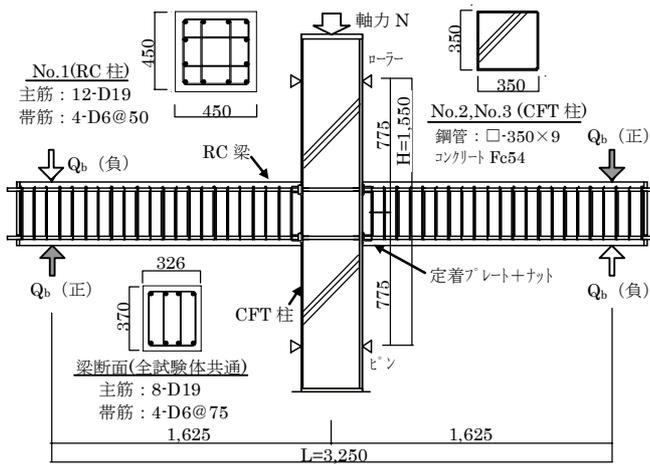
本報告では、この新たな混合構造の実現性を検討することを目的として、まず本構造の基本性状を把握するために行った十字形架構実験の結果を報告する。

2. 実験概要

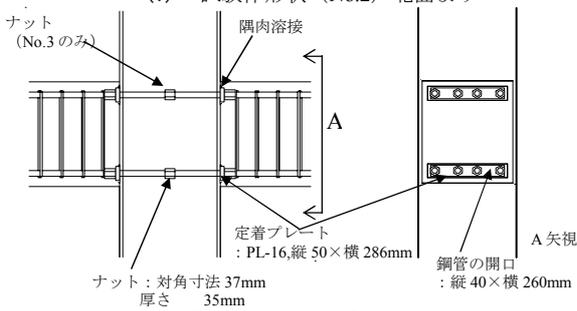
(1) 試験体

図-1に試験体図を示す。試験体は約 1/2 縮尺の 3 体であり、No.1は柱、梁ともに RC 造の試験体、No.2,3は梁をNo.1と同断面の RC 造とし、柱を CFT 造とした混合構造の試験体である。

No.2,3の梁主筋は、図-1(2)に示すように鋼管に設けた開口を貫通させ、鋼管の左右外側でプレート（以下：定着プレート）を介して、ナットで止めている。No.3は、さらに柱梁接合部内の梁主筋の中央部にもナットを設けて、付着劣化に伴う梁主筋の抜け出しの抑制効果を



(1) 試験体形状 (No.2) 北面より



(2) 柱梁接合部拡大図 (No.3)

図-1 試験体図



写真-1 加力状況写真 (南面)

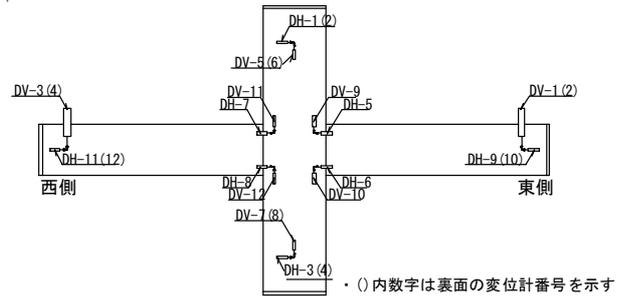


図-2 変位計測位置図 (南面)

表-1 材料試験結果

(コンクリート)					
試験体	材令日	圧縮強度 N/mm ²	割裂強度 N/mm ²	弾性係数 N/mm ²	単位容積重量 kg/m ³
No.1	48	61	3.5	3.57*10 ⁴	2,338
No.2,3	18	57	4.4	3.30*10 ⁴	2,352

(鋼材)							
試験体	部位	種類	降伏点 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	弾性係数 N/mm ²	降伏歪み μ(×10 ⁻⁵)	伸び %
No.1~3	梁・柱 主筋	D19(SD490)	530	701	2.01*10 ⁵	2,729	17.4
No.1	フープ スターラップ	D6(SHD685)	696	924	1.92*10 ⁵	5,700*	11.9
No.2,3	スターラップ	D6(SHD685)	710	915	1.90*10 ⁵	5,767*	11.8
	鋼管	t=9.0(SS400)	329	450	2.05*10 ⁵	2,091	39.9

※0.2%オフセット法

ねらっている。

また、梁せん断力を柱に伝達させる機構としては、定着プレートを鋼管に溶接し、シアキーとして機能させることとした。

表-1に使用材料の試験結果を示す。

(2) 加力および計測方法

写真-1に加力状況写真を、図-2に変位計測位置図を示す。加力方法は、上・下柱の反曲点位置をピン・ローラー支持し、梁加力位置の油圧ジャッキで载荷する方法である。柱軸力Nは定軸力とし、全試験体で共通(2,430kN)であり、軸力比はNo.1で0.2(=N/(σ_B・B・D))、σ_B:コンクリート圧縮強度 B:柱幅 D:柱せい)、No.2,3では0.35である。加力は、梁の変形角 R_b(=両側の梁加力位置の変位/スパンL)で制御する漸増繰返し载荷とした。なお、No.1とNo.2,3は実験時期が異なるため、加力回数も異なっている。

3. 実験結果

(1) ひび割れ状況

図-3に柱梁接合部周辺の最終ひび割れ状況を示す。No.2,3の柱梁接合部のひび割れは加力後に鋼管を除去して確認したものである。

RC造のNo.1と混合構造のNo.2,3のひび割れ状況を比較すると、梁および柱梁接合部のコンクリートの損傷状況は大きく異なっていることが分かる。

梁に注目すると、RC造のNo.1は、加力の繰返しとともに、梁材軸方向の柱際より梁せい程度の区間(以下:梁ヒンジゾーン)での損傷が顕著に観察された。これに対して、混合構造のNo.2,3では、梁ヒンジゾーンでのコンクリートの損傷は比較的軽微であった。これは、後述するように、梁の曲げ引張域では鋼管とRC梁の境界位置に変形が集中し、ひび割れが分散しないことによるものと思われる。

一方、柱梁接合部についても、No.1では接合部の隅角部においてコンクリートの欠損、ひび割れが見られるものの、No.2,3ではほとんど損傷は認められない。

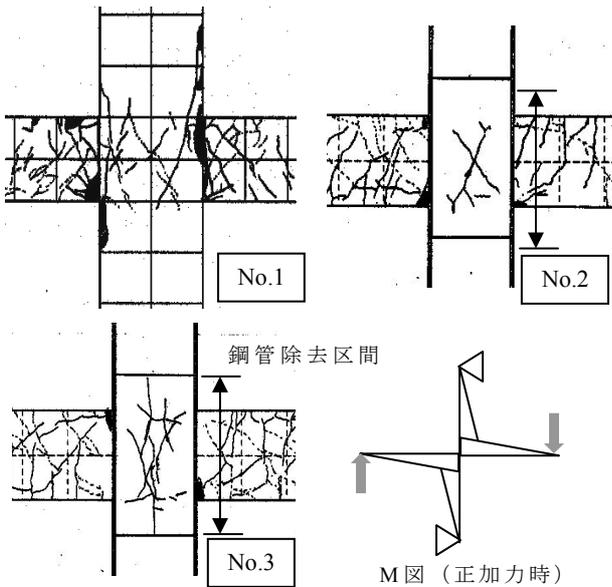


図-3 接合部周辺の最終ひびわれ状況

以上より、No.2,3では梁の曲げ圧縮域とこれに相対する柱梁接合部のコンクリートの損傷が軽微であることから、梁の曲げ耐力が低下せず、後述するように大変形においても荷重は低下しなかったものと思われる。

柱梁接合部内のナットの有無でのひび割れ状況を比較すると、ナットのあるNo.3ではナットのないNo.2には見られない縦ひび割れが発生している。このひび割れは、柱梁接合部内の梁主筋の付着劣化が進行するにつれて現れるナットの支圧抵抗に起因するものと推測され、接合部内の応力状態がナットの有無により異なることを示している。

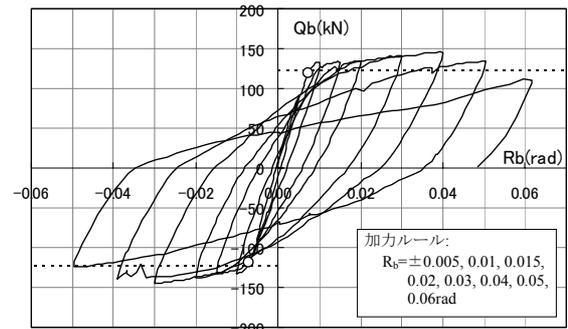
(2) 荷重-変形角関係と等価粘性減衰定数 (heq)

図-4に梁せん断力 Qb と変形角 Rb の関係を示す。

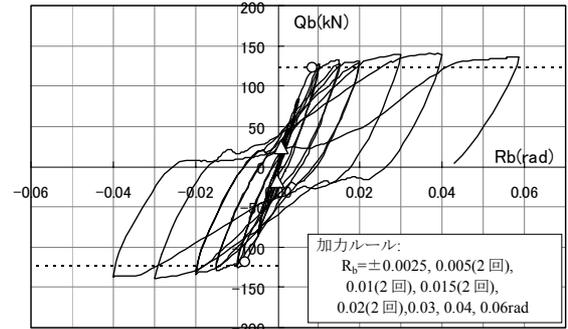
RC造のNo.1の荷重-変形角関係は、全体をとおして安定した紡錘形の履歴形状を示しているが、変形角 Rb が 0.04rad以降では、徐々に荷重が低下している。これは、梁ヒンジゾーンでのコンクリートの圧壊によるものである。

混合構造のNo.2では、変形角 Rb が 0.015radまではRC造のNo.1と同様な履歴形状を示すが、それ以降は、徐々に逆S字形の履歴形状が顕著になってくる。これは、後述する(4)節の梁主筋のひずみ分布から明らかのように、梁主筋の付着劣化が進行することによるものである。しかしながら、荷重の低下は大変形時においても見られなかった。

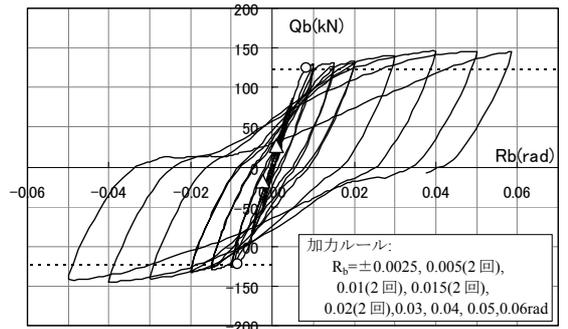
柱梁接合部内にもナットを設けたNo.3では、変形角 Rb が 0.03radまではRC造のNo.1とほぼ同様であり、大変形時の荷重低下もみられず、No.2に比べて履歴形状は



(1) No. 1 (RC 試験体)



(2) No. 2 (混合構造試験体)



(3) No. 3 (混合構造試験体: 中央ナットあり)

(凡例)

- △ : 曲げひび割
- : 曲げ降伏
- : 梁曲げ降伏 (計算値)

図-4 荷重-変形角関係

良好となっている。

図-5に荷重-変形角関係から求めた等価粘性減衰定数 heq と変形角 Rb の関係を示す。図中には式(1)による計算値を併記した。

$$heq = \frac{1}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right) \quad (1)$$

ここに、

μ : 梁主筋降伏時の変形を基点とした塑性率

式(1)は復元力特性モデルにおける徐荷時剛性を降伏時剛性の $1/\sqrt{\mu}$ とした時の定常ループにおける heq である。

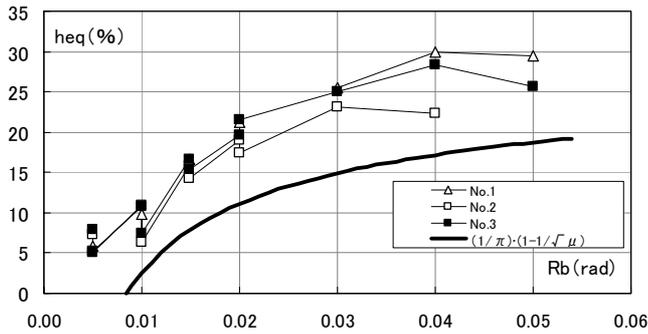


図-5 等価粘性減衰定数の比較

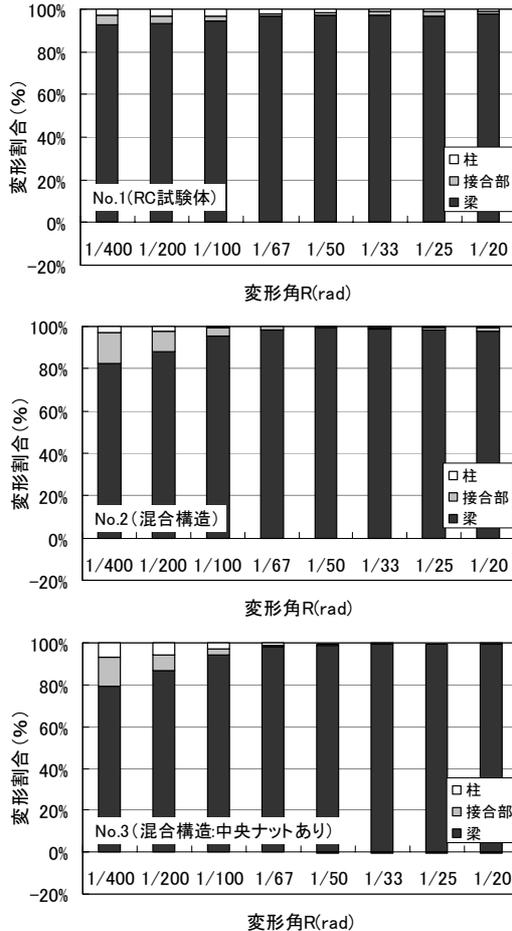


図-6 各部の変形割合

すべての試験体は、梁の変形角 R_b が 0.02rad までは、ほぼ同様な値を示すが、その後の変形では、混合構造の No.2 (中央ナットなし) は、他の 2 体の試験体と比べてやや小さな heq を示す。これは、前述した履歴形状の変化の状況と対応している。

一方、混合構造 No.3 (中央ナットあり) では、変形角 $R_b = 0.02\text{rad}$ 以降においても、RC 造の No.1 とほぼ同様の値を示している。このことは、柱断面が小さく、柱梁接合部内の梁主筋の付着劣化が進行しやすい本混合構造においても、接合部内にナットを設けることにより梁主筋の抜け出しが抑制され、履歴性状を改善させることが可

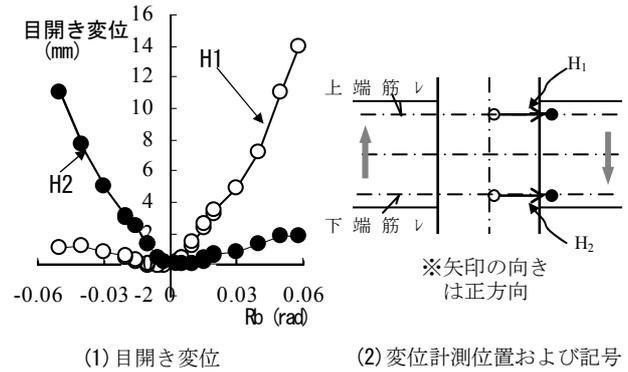


図-7 梁危険断面位置での目開き変位の推移

能であることを示している。

(3) 各部の変形割合

図-6に柱、梁および柱梁接合部の変形割合を示す。ここで、梁の変形割合には梁主筋の接合部および梁からの抜け出しによる変形が含まれている。

変形角 R_b が $1/400 \sim 1/67\text{rad}$ の範囲では、RC 造の No.1では、混合構造の No.2,3 と比べて梁の変形割合が大きい ($R_b = 1/400$ 時の梁変形割合: No.1=93%, No.2,3=約80%)。これは、RC 造の No.1は柱断面が大きく、梁剛性に対する柱および接合部の剛性 (剛性比) が、混合構造の No.2,3 と比べて大きいことによる。

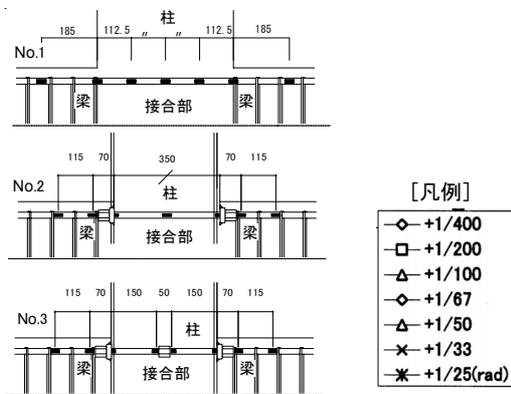
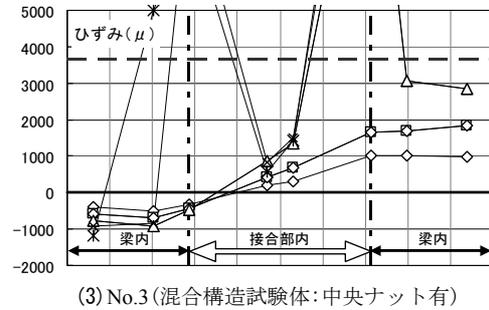
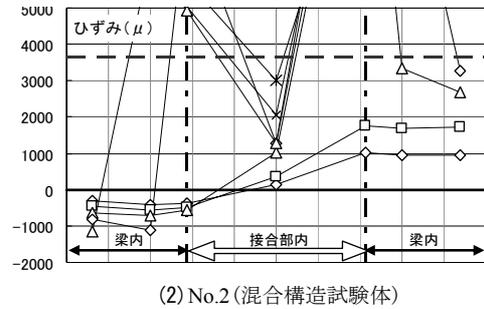
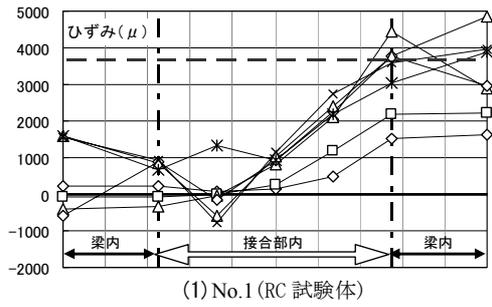
変形角 R_b が $1/50 \sim 1/20\text{rad}$ の範囲では、RC 造の No.1では、柱および接合部の変形割合はわずかに残るものの、混合構造の No.2,3 のほとんどの変形割合は梁変形が占めるようになる。これは、ひび割れ状況でも述べたように、No.2,3では、鋼管と RC 梁の境界位置に変形が集中して (接合部および梁からの抜け出し変位が大きい)、梁変形が増大することによるものである。このことは、図-7に示す混合構造 No.3の梁端の目開き変位の推移からもうかがえる。目開き変位は変形角 $R_b = 0.02\text{rad}$ 時で約 4mm であり、 0.03rad 以降ではさらに増加の割合が大きくなっている。

(4) 梁主筋のひずみ分布と梁危険断面のひずみの推移

図-8に接合部近傍における正載荷時の梁主筋のひずみ分布を示す。なお、図の右側が引張り域内の主筋、図の左側が圧縮域内の主筋を示している。

梁危険断面近傍のひずみについては、RC 造の No.1では局所的に集中することなく分布しているのに対して、混合構造の No.2,3では、梁危険断面位置にひずみが集中している。この現象は、一体成形の RC 造と分割成形の混合構造のそれぞれの特徴を良く表している。

次に、接合部中央付近の主筋のひずみについて、混合構造の No.2,3 を比較する。接合部中央にナットのない



(ゲージ位置図)

図-8 梁主筋のひずみ分布

No.2では変計角 R_b の増加とともにひずみも大きくなっているが、ナットのあるNo.3では変形角 $R_b=0.01\text{rad}$ 以降、ひずみは進展していない。No.2の現象は接合部内の梁主筋の付着劣化が進行していることを示しており、No.3の現象はナットの支圧抵抗の効果が現れていることを示している。

図-9は梁危険断面位置に着目して主筋のひずみの推移を示したものである。RC造のNo.1の梁端のひずみは、 $R_b=0.01\text{rad}$ 近傍で最大値(約 $8,000\mu$)を示し、その後は徐々に小さくなる傾向を示す。これは、図-8に示したよ

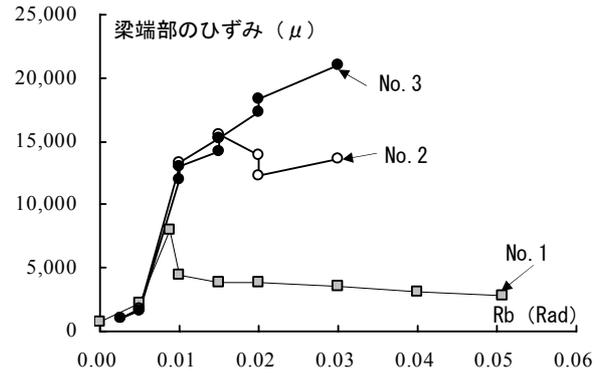


図-9 梁危険断面位置での主筋のひずみの推移

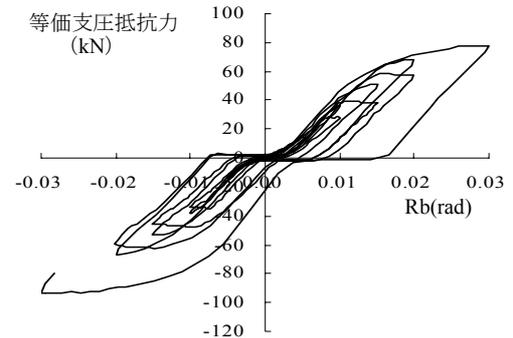


図-10 ナットの等価支圧抵抗と変形角の関係 (No.3)

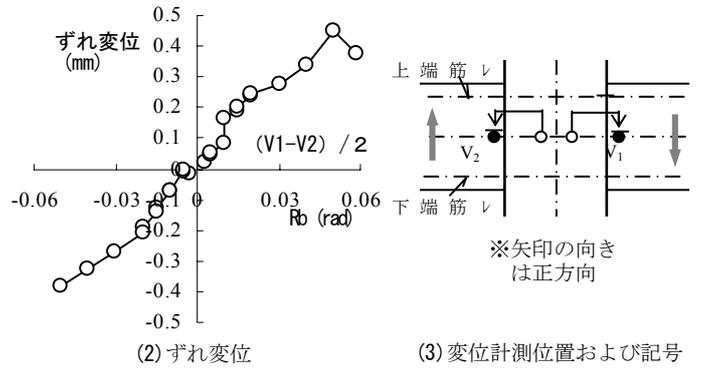


図-11 梁危険断面位置でのずれ変位

うに、ひずみが梁内の広範囲に進展していくことに対応している。混合構造のNo.2では、 $R_b=0.015\text{rad}$ 時に最大値(約 $15,000\mu$)に達し、それ以降、やや減少気味となる。中央にナットのあるNo.3では、No.2のようなひずみの減少は見られず、変形角 R_b が大きくなるのに伴って増大している。

(5) 柱梁接合部中央のナットの支圧抵抗力

これまでに混合構造 No.2,3の実験結果から、柱梁接合部にナットを設けることにより履歴性状が改善されることを示した。この効果は、梁主筋の付着劣化が進行して現れるナットの支圧抵抗によるものと考えられる。

図-10は、ナットの等価支圧抵抗力をナット両側のひずみ（未降伏）から算出し、変形角 R_b との関係で示したものである。ナットの支圧抵抗力は変形角 R_b の増大とともに大きくなり最大で 93kN となっている。これをナットの支圧面積で除すと支圧応力度は約 126N/mm^2 ($2.2\sigma_B$) となっている。

(6) 梁端部の鉛直方向ずれ変位

図-11にNo.3試験体の梁端部の鉛直方向のずれ変形を示す。ずれ変形は、変形角 R_b が大きくなると直線的に大きくなっているが、最大でも0.5mm程度 ($R_b=0.05\text{rad}$ 時)で非常に小さい。これは、鋼管に溶接した定着プレートがシアキーとして有効に機能したことを示している。

4. まとめ

コストを低減しかつ架構の剛性を高めて居住性能を確保するために梁をRC造とし、柱断面の縮小を図るために柱をCFT造とした混合構造について十字形架構を対象に実施した加力実験結果を報告した。結果をまとめると以下のとおりである。

- ①混合構造は純RC造に比べて、梁ヒンジゾーンでのコンクリートの損傷は少なく、大変形時においても荷重の低下は見られなかった。
- ②接合部内の梁主筋にナットを設けない混合構造では、接合部内の梁主筋の付着劣化により、逆S字形の履歴形状が現れるが、ナットを設けることで付着劣化に伴う梁主筋の抜け出しが改善され、純RC造と同等な履歴性状が得られることが分かった。

参考文献

- 1)日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針,1997
- 2)社団法人 新都市ハンジング協会：コンクリート充填鋼管（CFT）造技術基準・同解説の運用および計算例等,2003