

論文 PC鋼棒を筋かい材として既存RC架構に取り付ける耐震補強構法

平松 晃*1・山川 哲雄*2・飯干 福馬*3・高田 祥仁*3

要旨：既存のRC架構を耐震補強する構法としてPC鋼棒を筋かい材として取り付ける方法を紹介します。この方法で補強した門型模型架構を供試体とする繰り返し加力実験の結果を示し、この構法が靱性を低下させることなく水平耐力を増加させ得るものであって、有効な耐震補強方法となる可能性があることを述べる。この構法の特徴は、手に入り易い材料を用い、施工の手間が少ないことを目指している点にある。

キーワード：水平耐力、履歴曲線、柱部材角、曲げ降伏、ピロティ建築物、摩擦接合

1. はじめに

中・低層RC造ピロティ建築物の耐震性能を向上させるためには、第一層の保有耐力を増大させることが有効である。沖縄のRC造ピロティ集合住宅を検討した文献¹⁾などによれば、第一層の保有耐力はベースシア係数 C_b で0.5以上となることが望ましいと考えられる。他方、我が国には、未だに C_b が0.4に満たないRC造ピロティ建築物が多数現存しており、これら強度不足の建築物に対しては耐震効果が高いことと同時に日常活動への支障が少なく工期の短い工法が望まれている。本報告は、これらの事情を考慮して考案した耐震補強構法の概要を紹介し、RC門型フレームを供試体とする繰り返し加力実験の結果を示し、これが有効な耐震補強の方法となり得ることを述べるものである。

2. 実験用供試体

実大の約1/3のスケールをもつRC門型フレーム(図-1)を用意し、コンクリート打設後4週以上経過した後にPC鋼棒をX字型の斜め筋かいとなるように取り付けて供試体とした。門型フレームは、梁を柱に比べて強剛なものとし、柱の曲げ降伏が先行する設計とした。柱の構造因子と材料特性をそれぞれ表-1と表-2に示す。

表-1 柱の構造因子

柱軸圧縮応力比	0.18
せん断スパン比	2.25
せん断補強筋比(%)	0.63
柱引張り鉄筋比(%)	0.54
柱断面(mm x mm)	200x200
柱主筋 SD295	8-D10
柱帯筋 SD295	D6
帯筋間隔(mm)	50

表-2 材料特性

呼び強度 (N/mm ²)	16
シリンダー圧縮強度 (N/mm ²)	20.4
柱主筋降伏点 (N/mm ²)	32.7
柱主筋強度 (N/mm ²)	49.5
柱帯筋降伏点 (N/mm ²)	40.4
柱帯筋強度 (N/mm ²)	50.1

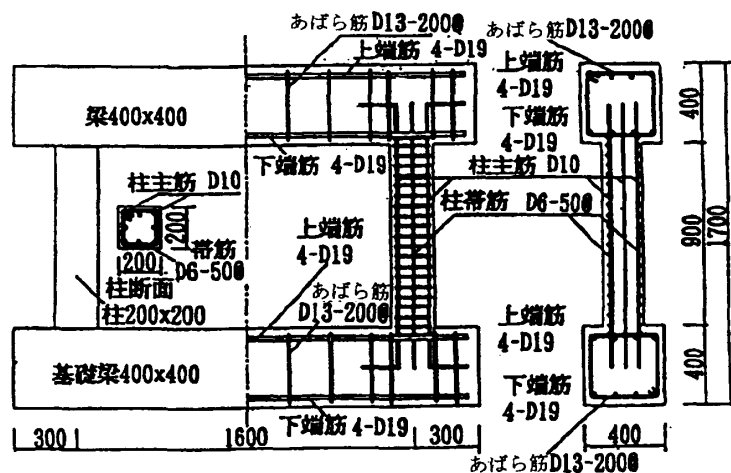


図-1 供試体概

*1 近畿大学教授 九州工学部建築学科 工博 (正会員)

*2 琉球大学教授 工学部環境建設工学科 工博 (正会員)

*3 高周波熱錬(株) 製品事業部開発企画部 (正会員)

筋かい用のPC鋼棒（C種1号，耐力 $1240\text{N}/\text{cm}^2$ ）は，フレームに組み込むために鋼棒の全長にわたってネジ切り加工（M10x1.25）を施すこととした。筋かい用のPC鋼棒の張力と伸びの関係を図-2に示す。

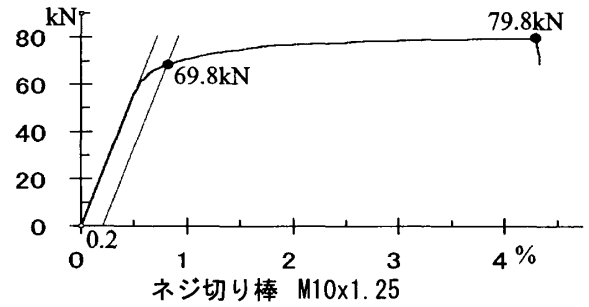


図-2 筋かい用PC鋼棒の張力-伸び曲線

3. 実験概要

供試体には定鉛直荷重 W と繰り返し水平荷重 P を加えた。実験装置の概要を図-3に示す。鉛直荷重は，両柱頭部それぞれに常時 140kN （軸圧比 0.18 ）づつ加えるよう制御した。他方，水平荷重は柱部材角 R の振幅が 0.5% ， 1.0% ， 1.5% ， 2.0% ， 2.5% ， 3.0% ， 3.5% ， 4.0% ， 5.0% となるそれぞれのレベルで3サイクルづつの繰り返しとなるよう制御した。梁の水平変位速度は $10\text{ mm}/\text{sec}$ 程度とした。

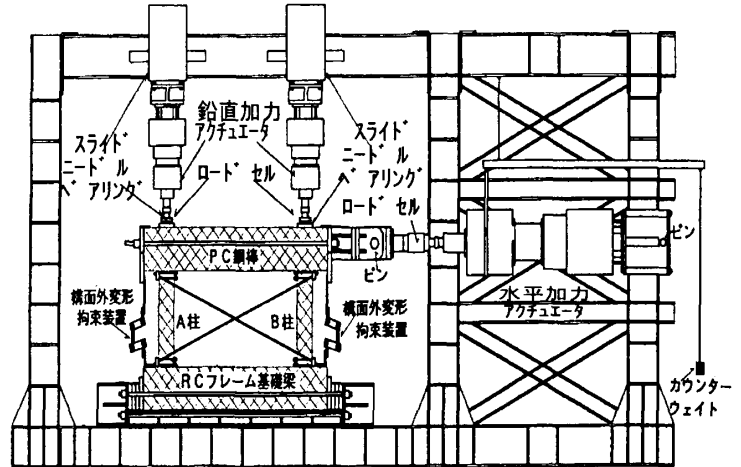


図-3 加力装置

4. 筋かい材の取り付け方法

筋かい材は，2本1組として合計4本のPCネジ切り鋼棒を図-4に示すようにX字型の斜め筋かいとなるようにRCフレームに組み込んだ。具体的には，図-5に示すとおり2本の鋼棒を柱を挟むように配置し，専用の固定金具と補助固定金具を利用してRC柱に固定金具を圧着させる方法である。固定金具は，S45C（降伏点 $384\text{N}/\text{cm}^2$ 、引張強さ $743\text{N}/\text{cm}^2$ ）の鋼材による $38\text{ mm} \times 75\text{ mm}$ の矩形断面とし，端部にPCネジ切り鋼棒を通すための抜け穴を筋かいの材軸に合わせた方向に落とし穴状に開けており，落とし穴の底部が凹面状となるように加工した。そして，PCネジ切り鋼棒にねじ込むナットは，落とし穴の底部の凹面に合わせた形状の球面ナットとした。

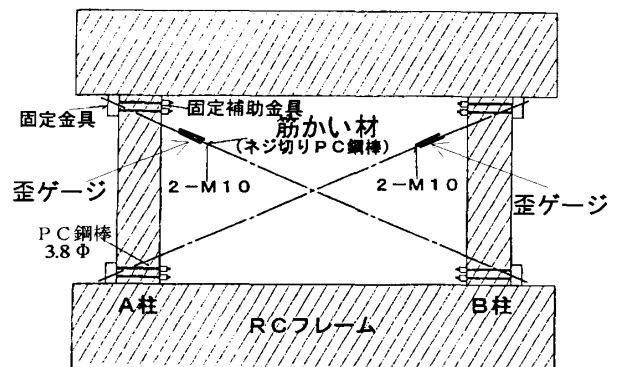


図-4 筋かい材の取り付け方法

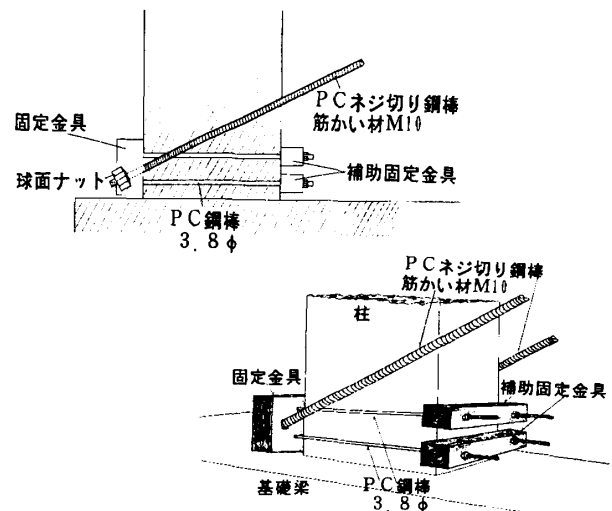


図-5 筋かい材取り付けの詳細（柱脚部の例）

固定金具と補助固定金具は径 3.8ϕ のPC鋼棒（UB33BM，引張強さ $1252\text{N}/\text{cm}^2$ ）4本で繋ぎ，柱を締め付けるように歪みが $2500 \pm 100\mu$ となるプレストレスを与えた。すなわち，このプレストレスによって得られる摩擦力で固定金具をRC柱に摩擦接合する方法である。この

とき、筋かい材に圧縮力が加わることのないように固定金具の抜け穴を通したPC鋼棒筋かい材の端部は、固定金具の片面だけにナット(球面ナット)を取り付ける方法とした。

固定金具や補助固定金具が接するRC柱の表面は、ベニヤ板製の型枠を外したままの状態とし、特別な処理はしなかった。

ここで採用している取り付け方法では、筋かいの張力が大きくなると固定金具を滑らせる作用も大きくなるが、同時に張力の増加に応じて摩擦抵抗力も大きくなることから、張力が大きくなっても固定金具が滑ることはないと考えられ、この点が本工法の特徴である。ちなみに、摩擦係数は、見村の試験報告書²⁾より判断して0.5程度は期待できると考えている。

なお、筋かい用PCネジ切り鋼棒は全体を2分し、それらの間にPC丸鋼をネジ式カップラーで取り付け歪みゲージを貼り簡易のロード

セルとした。

5. 実験結果

筋かい用PC鋼棒を取り付けてない門型フレームと筋かい用PC鋼棒を取り付けたフレームそれぞれの実験終了後の状況を写真-1から写真-4に示す。写真-2と写真-4は、それぞれA柱(左柱)脚部の外側の状況である(写真-1と写真-3の左下にある三角印は視点である)。

筋かいの無い門型フレーム(写真-1, 写真-2)の場合は、柱部材角Rが約1%となった時点で引張り鉄筋が降伏してフレーム全体も降伏し、その後の変位振幅の増大や水平荷重の繰り返しにより柱端部での曲げ破壊やせん断破壊さらに柱主筋の座屈が進行し、かぶりコンクリートが剥離・落下して鉄筋の一部は露出することになった。

他方、筋かいを取り付けた供試体(写真-

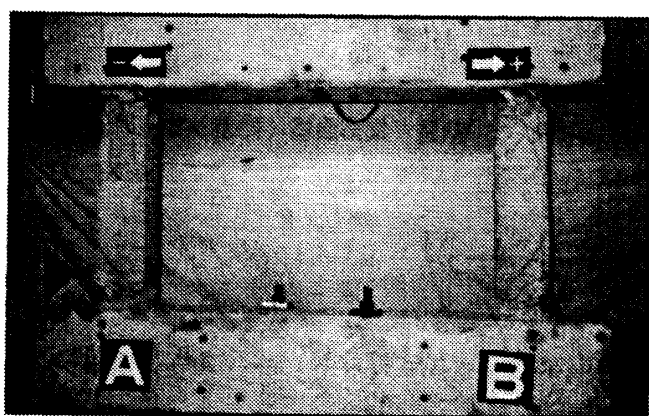


写真-1 実験終了後（門型フレーム）

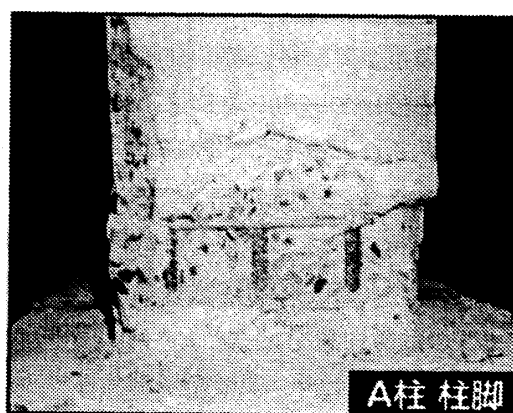


写真-2 A柱の柱脚部（門型フレーム）

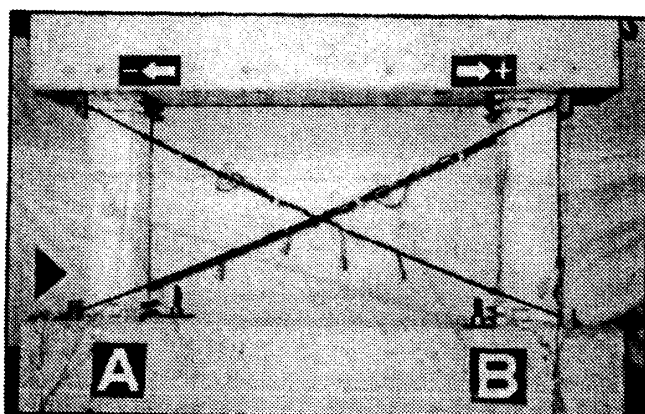


写真-3 実験終了後（筋かい付きフレーム）

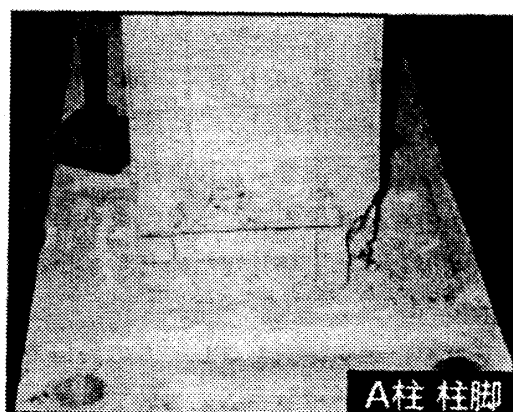


写真-4 A柱の柱脚部（筋かい付きフレーム）

3, 写真-4) の場合は, 水平载荷直後のRが0.2%~0.3%となる辺りから引張り側の柱の脚部で引張り鉄筋が降伏していた。これは, 筋かい張力の柱軸方向成分が柱脚部主筋の張力に付加することによるものと考えられ, この部分の降伏曲げモーメントが筋かいの無いフレームの柱に比べて小さくなることを示唆するものである。しかし, 筋かいを取り付けたフレームの場合はせん断破壊がみられず, 筋かいの無いフレームに比べて破壊の進行は遅れていた。それでもRが4%を越えた辺りになると固定金具と接触する柱の表面では, 支圧応力が柱面の中央部より大きくなる隅角部で表面コンクリートの一部に剥離する現象が見られ, さらに変形が進むと, 固定金具の取り付け位置から僅かに離れた表面のコンクリートの圧壊や剥離が目立つようになった。総じて筋かい付きの場合は, 筋かいの無い場合に比べて柱の損傷が小さく, 曲げ降伏後に曲げ圧縮破壊が進行するタイプであり, 鉄筋が露出することはなかった。これは, 固定金具と補助固定金具が柱頭部や柱脚部を細いPC鋼棒で締め付けていることによる拘束効果によるものであろう。そして, 固定金具や補助固定金具が滑る現象は一切見られなかった。

両供試体の荷重-変形曲線をそれぞれ図-6と図-7に示す。筋かい材の無い門型フレーム(図-6)の履歴曲線を見るとR=1.5%で最大水平力を示した後, 変形の増加に伴って水平力が低下してゆく様子が見られるが, この水平力低下の約50%は, 鉛直荷重によるP-Δ効果によるものである。他方筋かいを取り付けたフレーム(図-7)の場合は, 最大水平力を示した後も柱部材角Rが5%に達するまで水平力の低下は僅かである。これはR=1.6%辺りで筋かい材は降伏するが, その後も筋かい材の張力が少しずつ上昇したためと考えられる。

6. 筋かいの負担力とフレームの負担力

筋かいの付いたフレームについて, 筋かいに取り付けた簡易ロードセルから筋かい材の張力

Nを求め, さらにこのNから水平力を算出して筋かい材の負担水平力P_Bとした。ここでP_Bは図-8に描かれているモデルに基づいて導いた式(1)から算出したものである。

$$P_B = N \cdot \cos \alpha \cdot (h-a)/h \quad (1)$$

ここに、 $\alpha = 24.5^\circ$ $\cos \alpha = 0.91$

$h=90\text{cm}, a=4\text{cm}$

さらに実測した水平力PからこのP_Bを差し引いた結果をフレームの負担水平力P_Fであるとし, これらP_BとP_Fを柱部材角Rとの関係で描いた結果は, それぞれ図-9と図-10となった。

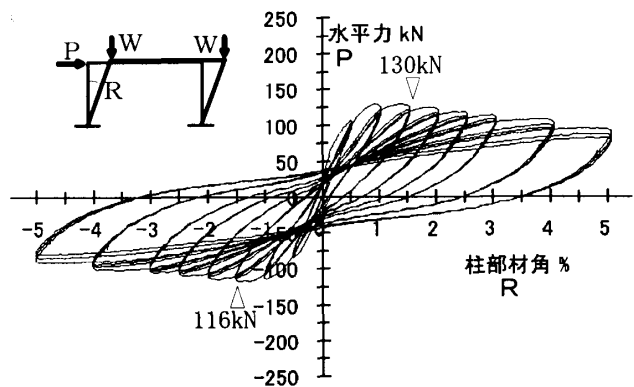


図-6 荷重-変形曲線(門型フレーム)

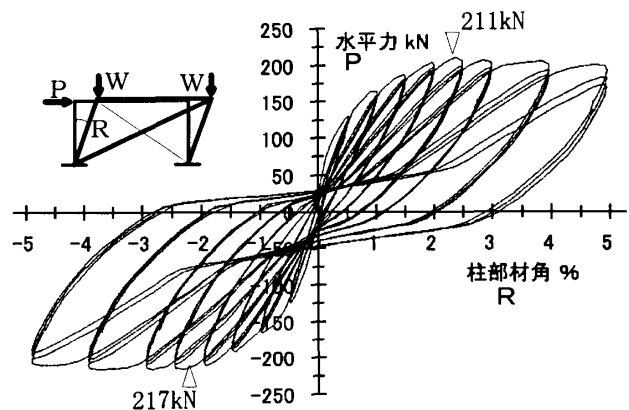
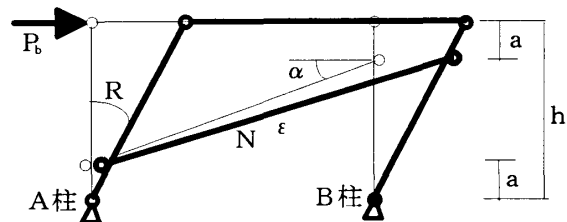


図-7 荷重-変形曲線(筋かい付きフレーム)



N: 筋かい材の軸 ε: 筋かい材の軸歪

図-8 筋かい負担力の計算モデル

他方、筋かい負担水平力の図-9における計算推定値(太線)は、図-2の張力-伸び曲線を基に式(1)と式(2)とを組み合わせ推定した筋かい材の張力Nの水平成分である。

$$R = 2 \cdot \varepsilon / \sin 2\alpha \quad (2)$$

ここに、 $\alpha = 24.5^\circ$ $\sin 2\alpha = 0.75$

式(2)は、図-8に示すモデルを基にして求めた筋かい材の伸び歪み ε と柱部材角Rとの関係である。

図-9に見るとおり計測値から求めた筋かい負担水平力 P_B と計算推定値はよく一致していることがわかる。また、図-10のフレームの負担水平力 P_F と図-6の筋かい無しの場合の履歴曲線とを比べると、最大荷重の正側と負側の平均値は、 P_F の方が15kN程小さい結果となっていた。これは、筋かいのあるフレームでは筋かいの張力を直接受ける柱脚部では固定金具の近傍の引張り側の柱主筋が水平荷重の小さい段階で引張降伏するため、部材としての降伏曲げモーメントが筋かいの無いフレームの柱に比べ低下したことによるものと考えられる。しかし全体としては図-6と図-10はよく似た曲線を描いており、筋かい材を取り付けたフレームの挙動がオープフレームと筋かい材それぞれの挙動の重ね合わせとして表し得るといえる。

7. 固定金具の検討

固定金具の力学特性を確かめるためにフレームに取り付けたものと同じ仕様の固定金具を用いて曲げ実験を行った。この実験は、図-11に示すような中央一点加力とし、加力点真下の引張り縁の歪を計測した。図-12は荷重と歪の関係の一例である。この図からもわかるように、比例限度P点は、歪が $\varepsilon_p = 1900 \mu$ 、荷重が120kNであった。

他方、筋かい付きフレームに装着した固定金具の歪を図-13に示す位置で計測したところ、A柱脚部やB柱頭部の歪が図-14のように得られていた。図-14によれば、固定金具は比例限を超えることが無かったことになる。なお、

図-14では歪が200 μ 以下とはならないことが示されているが、これは、筋かい材の張力が0となった時点でも補助固定金具と固定金具とを連結している細いPC鋼棒(3.8 ϕ)に与えた初

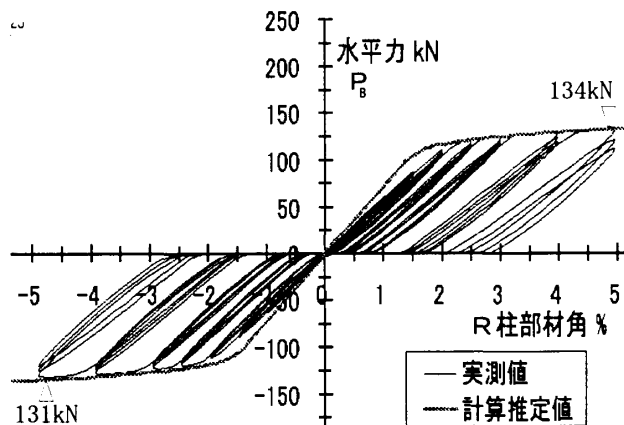


図-9 筋かい負担水平力

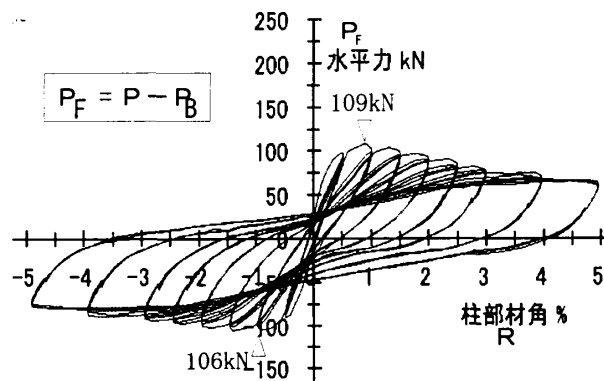


図-10 フレームの負担水平力

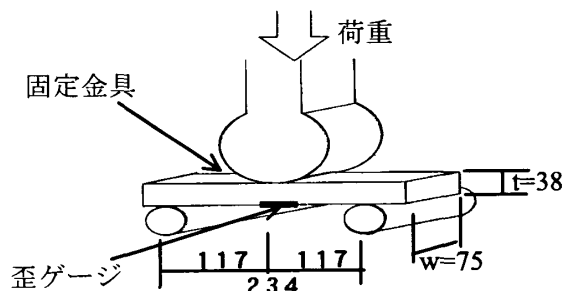


図-11 曲げ実験

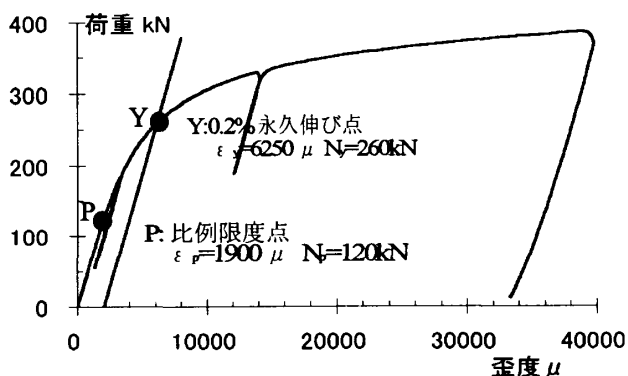


図-12 固定金具の荷重-歪度関係

期歪の 2500μ が効いているためである。次に図-14のA柱脚部の歪をこの固定金具に接続している筋かい材の張力の水平成分との関係で示すと図-15のようになる。図-15より固定金具は歪の伸展に伴って徐々に剛性(見掛けの剛性)が低下しており、歪が $1400 \mu \sim 1500 \mu$ となる時点では初期剛性の約 $50\% \sim 60\%$ となっていることがわかる。これは固定金具近傍のRC柱が破壊の進展に応じて剛性が低下したことによるものと考えられる。図-15からわかるもう一つの特徴は、筋かい材の軸力が負になることが無いという点である。このことは、PC鋼棒筋かいを固定金具に取り付ける部分を設計する際、筋かい材が圧縮側となったときにPC鋼棒に圧縮力が加わらないように工夫したが、この工夫が有効であったことを示すものである。

8. まとめ

以上述べてきたことをまとめて次に示す。

1. 補強を施したフレームの挙動は、オープンフレームと引っ張り筋かいの合成として概要を捉えることができる。
2. フレーム自身の耐力は筋かいを取り付けることにより若干低下する。
3. 補強を施したフレームの方が柱の損傷が少ない。
4. 補強を施したフレームは、柱部材角 5% の時点まで耐力低下がほとんどなく、安定した履歴曲線を描いていた。
5. 固定金具とRC柱との間にすべりは一切生じなかった。
6. 固定金具の応力や歪は、比例限度以下に収まっていた。
7. PC鋼棒筋かい材に座屈は見られなかった。

今回の実験では、筋かいを取り付けることにより保有耐力を 1.8 倍とすることができていた。この点を含め上記の各項目を考慮すると、ここで採用したPC鋼棒を取り付ける方法は有効な耐震補強工法となる可能性が大いにあるということができよう。

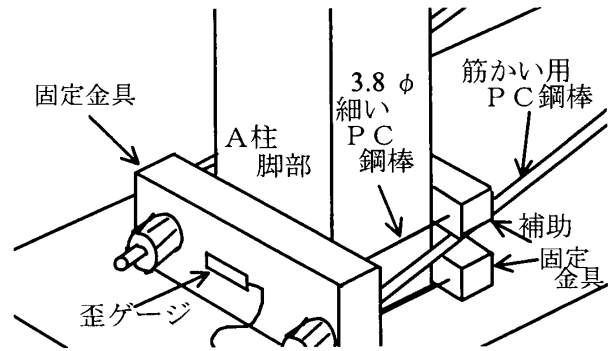


図-13 固定金具の歪計測位置

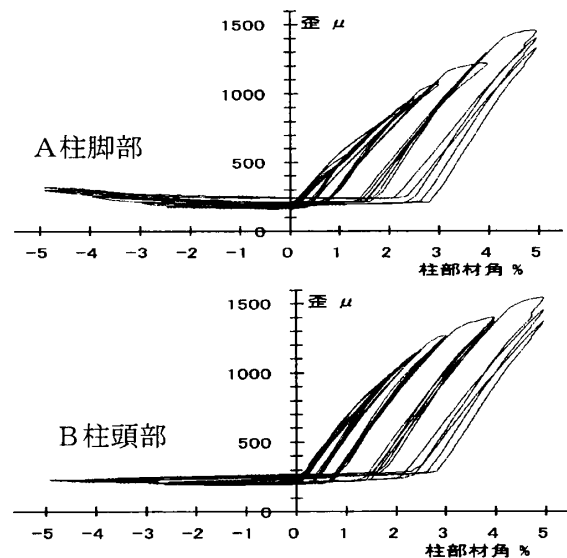


図-14 固定金具の歪

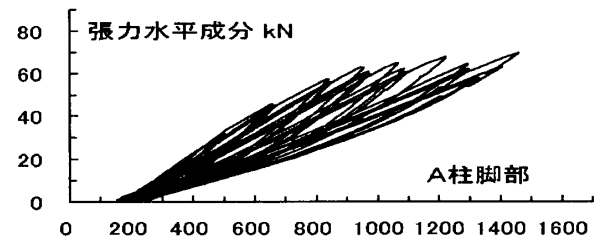


図-15 固定金具の歪の推移

参考文献

- 1) 山川哲雄ほか：沖縄のRC造ピロティ集合住宅の耐震性能に関する調査研究，日本建築学会構造系論文集，第549号，pp.113-119，2001，11
- 2) 見村博明：PC圧着ブラケット支保工の耐荷力試験報告書，東京電気大学理工学部見村研究室，pp.1-21，1989，6