

論文

[2188] 6自由度加力装置を用いた RC 柱部材実験

新保 弘*¹・村山 八洲雄*²・須田 久美子*³・一宮 利通*⁴

1. まえがき

一般に、構造部材に作用する部材力としては2方向の曲げモーメント、2方向のせん断力、軸力、ねじりモーメントがあり、実構造物ではそのいくつかが同時に作用する複合荷重状態にあると考えられる。しかし、複合荷重下のRC部材の部材力と変形の関係については十分に明らかになっていない。

そこで、その挙動を実験的に調べるため、あらゆる荷重組み合わせを加力できる6自由度加力装置を開発した(写真-1)。その基本的な考え方と弾性試験体による検証実験の結果は既報[1]で述べている。しかし、RC試験体は弾塑性の部材であり、実際の構造実験では荷重ピーク以降の領域まで検討することが多く、本装置のように多数のジャッキを用いて加力する装置では実験精度上の困難を伴う場合も少なくない。

今回、本装置を用いて組み合わせ荷重による交番加力実験を、RC柱試験体の荷重ピーク以降も含め精度よく行うことができたので、本装置による加力の方法について報告し、また実験結果を複合荷重下のRC柱部材の変形性能の観点から述べる。

2. 装置の概要

本装置は、上下2個の剛性の大きい加力ブロックと、その間に配置したロードセルを取り付けた6本の10tf串型両働油圧ジャッキから構成されている。この6本のジャッキの軸力を独立に制御することにより、装置中央にセットした試験体に加力ブロックを通じてあらゆる組み合わせの部材力を加えることができる。なお、今回の柱部材実験では6本のジャッキへの負荷を減らすため、試験体断面の図心を通る軸力導入用ストランドを介して50tfの専用ジャッキにより軸力を導入した。

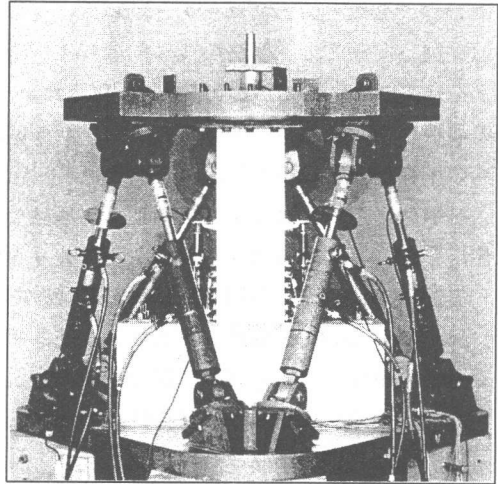


写真-1 6自由度加力装置の外観

3. 実験概要

3.1 試験体

斜張橋のタワーや高橋脚等を想定し、通常の橋脚や建築の柱部材に比べてせん断スパン比(a/d)が大きい柱部材の基部を対象とする実験を行った。

- * 1 鹿島建設(株)技術研究所 第一研究部第一研究室研究員、工修(正会員)
- * 2 鹿島建設(株)技術研究所 第一研究部第一研究室主管研究員(正会員)
- * 3 鹿島建設(株)技術研究所 第一研究部第一研究室研究員(正会員)
- * 4 鹿島建設(株)技術研究所 第一研究部第一研究室研究員、工修(正会員)

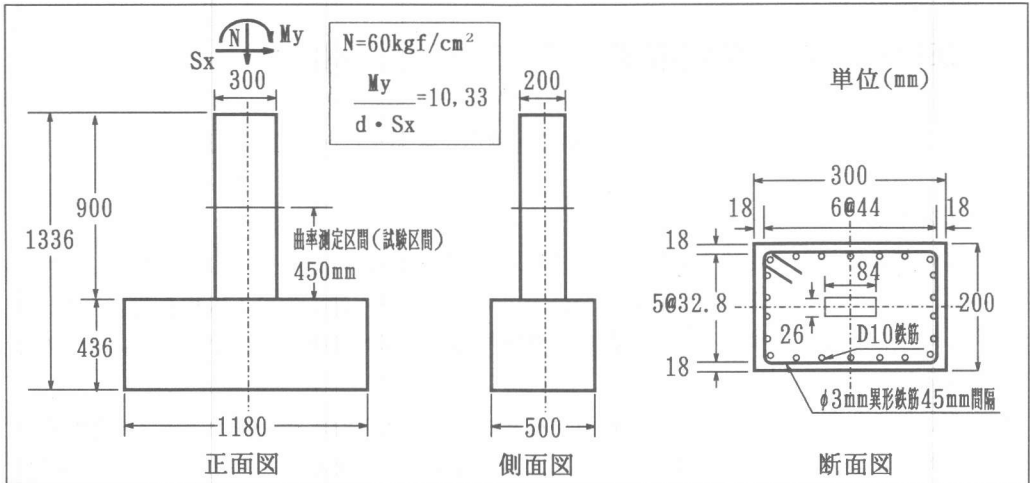


図-1試験体の外形寸法と断面形状

試験体の外形と断面寸法を図-1に示す。試験区間の断面は20cm×30cmで、軸方向鉄筋にはSD295-D10を周囲に22本($p_g=2.6\%$)、帯鉄筋にはSD345相当のφ3mm異形鉄筋を45mm間隔($p_w=0.16\%$)で配置した。また、試験区間以外での破壊を防ぐため、柱頭部から1d(d :柱の断面せい=30cm)の区間では帯筋量を2倍にし、さらに上加力ブロックと試験体の一体性を保つため、フックを付けた短い軸方向鉄筋を主鉄筋の間に配置した。断面中央には軸力導入用ストランドを通すため、厚さ0.3mm銅板で製作したシースによる孔が空いている。その面積は全断面積の約3.6%であるが、断面図心近傍であることから断面耐力への影響は非常に小さい。

試験体に用いたコンクリートには、早強セメントと最大径10mmの粗骨材を使用した。実験時のコンクリート圧縮強度と鉄筋強度を表-1に示す。

実験は形状・配筋が同じ試験体を4体製作し、以下の組み合わせ荷重を加えた。

No.1:a/d=33の1軸曲げ。実質的には純曲げと見なせるが、破壊位置を限定するためにわずかにせん断力を与えた。ただし、加力途中で本装置の二軸曲げの加力性能の検討も行った。

No.2:a/d=33の1軸曲げと基部曲げモーメントの1/10のねじりモーメント。

No.3:a/d=10の1軸曲げせん断。

No.4:でa/d=10の1軸曲げせん断と基部曲げモーメントの1/10のねじりモーメント。

また、全ての実験で軸力を応力度で60kgf/cm²与えている。

3.2加力と制御の方法

加力は、曲げモーメント(My)とせん断力(Sx)を断面の強軸方向に、ねじりモーメント(Mt)は上向きZ軸回りに、繰り返し数1回の漸増交番加力とした。制御は部材降伏荷重程度までは荷重制御で±1, ±2, ±3, ±4, ±6, ±8, ±10tf・m、その後は10tf・m時の基部から1.5dまでの区間の平均曲率曲率を計測し、その整数倍の曲率で制御した。通常の柱の曲げせん断実験では部材降伏時の柱頭部の変位量を基準に変位制御を行うことが多いが、本実験は部分模型実験であるためこれを実測することはできない。しかし、

- ①ひびわれを有する部分の弾性変形は拡張プランソンの方法等で精度よくもとめられる。
- ②一般に斜張橋のタワーや橋脚など、実際の柱部材に大きな曲げとせん断力が生じるときのM/(S

表-1 材料特性

コンクリート	
試験体	圧縮強度
No.1	428
No.2	426
No.3	438
No.4	422

鉄筋		
材料名	φ3mm	D10
降伏強度	3791	3590
引張強度	4895	5340
単位(kgf/cm ²)		

・d)の値は10よりも小さいため、これに相当する独立1本柱の柱頭部の変位量への寄与は、ひびわれを有する弾性範囲の変形よりも基部の塑性ヒンジ部分の変形によるものの方が大きい。

③通常、多くの実験で $P_u \leq 1.2P_{ym}$ (P_{ym} :部材の塑性変形が大きく進む時の荷重)となっており、図-2に示すように、 $a/d \leq 10$ とした場合、 P_u が作用したときに部材が降伏する範囲は基部から1.7d以下である。従って、塑性ヒンジは基部から1.7dの間に発生するため、基部から1.5d区間で曲率を計測すれば、塑性ヒンジによる変形をほぼカバーできると考えられる。

これらの理由から、本実験では基部1.5d区間の平均曲率を基準として変位制御することとした。ただし、 $a/d > 10$ の場合にはこの考え方は必ずしも適用できない。なお、試験体の計算上の純曲げによる降伏荷重は約8.8tf・m、終局耐力は10.9tf・mであった。

4. 加力方法

4.1 試験体セット

加力装置のジャッキの配置を図-3に示す。試験体は、上加力ブロックを取り外した状態でセットし、その上加力ブロックを乗せてからジャッキを取り付けるといった手順で行った。そのため、ジャッキ取り付けの際にはジャッキの長さを調整する必要があった。ジャッキの長さの調整はポンプ圧を利用して行った。

ジャッキについているロードセルの荷重のリセット(ゼロ点)は試験体セット前の無負荷の状態で行い、ロードセルは加力時のジャッキ軸力のみを計測するものとした。そのため、上加力ブロックの重量は試験体への作用軸力から差し引いて加力した。

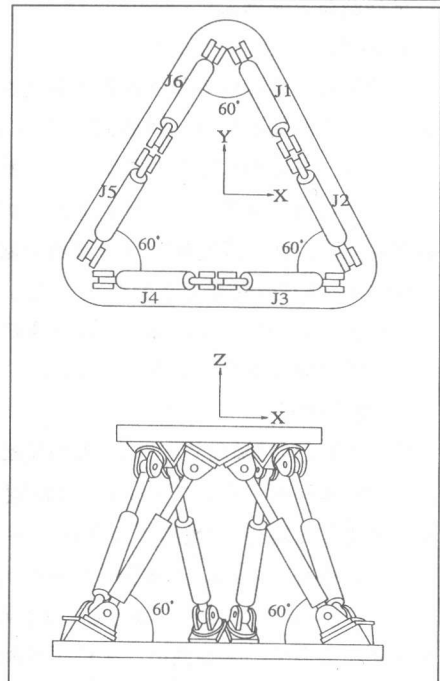
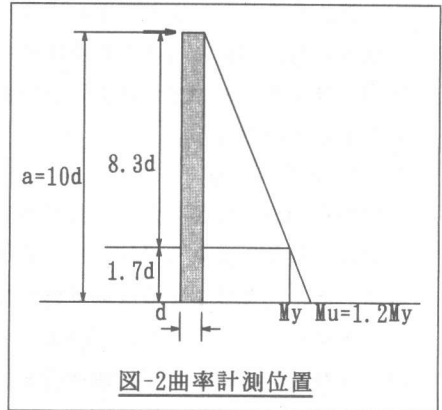
4.2 加力ステップ

加力は、目標とする作用部材力に相当する荷重状態を、ジャッキ1本(容量±10tf)あたりの軸力で50kgf以下の加力ステップに分解し、各ステップごとに所定の荷重状態(部材力)を満足させ、6本のジャッキ軸力の比が崩れないように制御した。一例を挙げると、曲げモーメントが0tf・mの状態からY軸回りに純曲げ4tf・mを加力する場合、ジャッキ一本の軸力の変化量の絶対値が一番大きいものは2.26tfになる。これを50kgf刻みのステップに分解するとステップ数は46になり、モーメントは約0.09tf・m刻みで加力されることになる。

加力を安定させ、加力時間を短縮させるため、6本のジャッキは同時に制御した。

4.3 部材降伏と荷重ピーク後の制御

試験体が降伏して部材の剛性が低下し始めると、モーメント-曲率曲線(M- ϕ 曲線)の勾配が小さくなり荷重制御が困難になる。この場合は変位(曲率)を逐次モニターしながら、目標変位で



加力を停止することにより所定の変位を与える変位制御が可能であった。特に荷重ピーク後、 $M-\phi$ 曲線の勾配が負になると荷重制御は非常に難しくなるが、その時の作用部材力よりもジャッキ軸力の制御誤差範囲分だけ大きい目標荷重を設定する方法でジャッキ軸力の比を崩さずに変形を進めることができた。

4.4 保持後の再載荷

目標荷重(変位)に達したところで油流を止めてひび割れ観察等を行うが、その間にわずかに変形が進行することによりジャッキ軸力が減少してジャッキ軸力の比が崩れ、作用部材力が変化する可能性がある。このままの状態でも再び載荷もしくは除荷を開始すると軸力比が崩れた状態を保ちながら載荷してしまうため、このような場合は、再載荷開始時点の作用部材力に近い、所定の荷重組み合わせの状態をまず目標荷重として与え、ジャッキ軸力の比を所定の状態に回復させてから再び載荷を開始した。

4.5 除荷

除荷時は、試験体の弾性変形が解放される方向へ自然に変形が戻るため、目標荷重を0に設定することでジャッキ荷重は安定して減少し、載荷時よりもスムーズに加力ステップを進めることができた。比較的時間がかかる塑性域からの除荷の場合でも、最大曲率から約5分程度で除荷を完了できた。ただしジャッキ荷重が小さくなると、逆向きの油圧をかけて強制的に軸力を抜く必要があった。

4.6 加力精度

図-4にNo.1のX軸回りとY軸回りの基部曲げモーメント加力履歴を示す。これより、Y軸回りの一軸曲げを加力した場合、X軸回りの曲げモーメントはほとんど発生していないことがわかる(a)。またNo.1加力中に、 $1\phi y=20\times 10^{-6}/\text{mm}$ として $3\phi y$ のサイクルを終えた時点で、本装置の二軸曲げの加力性能を検討するため、X軸・Y軸回りに $\pm 5\text{tf}\cdot\text{m}$ づつ曲げモーメントを加力してみたが、この場合も精度よく加力が行えたことがわかる(b)。

図-5にNo.2のY軸回りの基部曲げモーメントとねじりモーメント加力履歴を、図-6にNo.3のY軸回りの基部曲げモーメントとX軸方向のせん断力の加力履歴を示す。どちらも所定の部材力 $M_t=M_y/10$, $M_y/(d\cdot S_x)=10$ を精度良く加力できたことが分かる。

4.7 加力時間

加力時間は、荷重の組み合わせ方にかかわらず、軸力載荷用ジャッキと曲げ載荷用ジャッキを併用した一般に行われている柱の曲げせん断実験と同程度であった。0 $\text{tf}\cdot\text{m}$ から目標荷重状態までの載荷時間

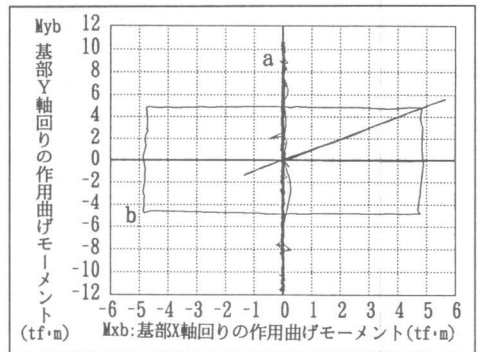


図-4 作用曲げモーメントの履歴(No.1)

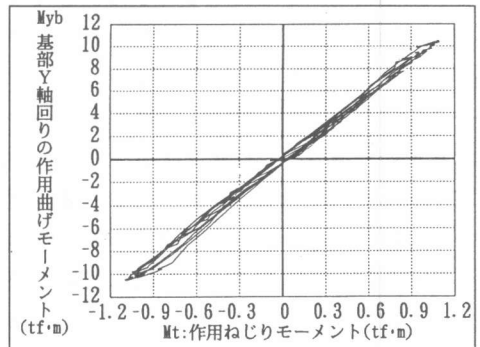


図-5 曲げモーメントとねじりの履歴(No.2)

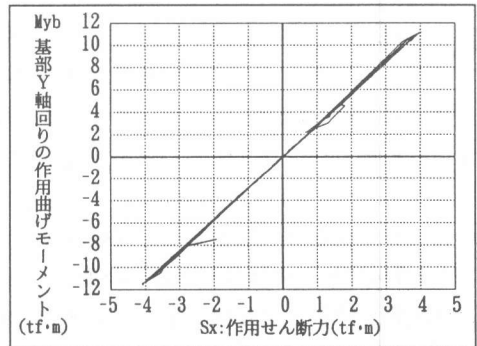


図-6 曲げモーメントとせん断力の履歴(No.3)

(1サイクルの荷重側1/4)は試験体の弾性域では約10分程度、荷重ピークを超えてからは約20分程度であり、1サイクルの加力にかかった時間は、ひび割れ観察等の時間を除いて、弾性域で約30分程度、荷重ピーク後では約50分程度であった。

5. 実験結果と考察

各試験体のM- ϕ 関係を図-7~10に、ひびわれ状況を図-11に示す。

(1)a/d=33の場合:No.1(純曲げ)とNo.2(純曲げ+ねじり)を比較すると、ねじりモーメントが曲げモーメントの1/10と小さくても、ひびわれパターンは著しく異なっていることが分かる。また、曲率靱性率(ここでは計算上の曲げ降伏荷重時と、再び降伏荷重まで耐力が低下した時の基部1.5dの平均曲率の比とした。)を計算すると、No.1が7であるのに対してNo.2は5.5と、ねじりが加わることによって靱性率が2割低下した。また、No.1では加力面基部の幅全域でほぼ均等にコンクリートが圧壊したのに対し、No.2は隅角部でより広い範囲に圧壊していた。

(2)a/d=10の場合:No.3(曲げせん断)とNo.4(曲げせん断+ねじり)を比較すると、ねじりが曲げに付加されることにより曲率靱性率は7から4と、約4割低下していた。

(3)a/dの影響:No.1(純曲げ)とNo.3(曲げせん断)を比較すると、曲率靱性率はいずれも約7であった。しかし、降伏時の曲率はNo.3の方が小さいため、曲げモーメントと曲率でみたエネルギー吸収能力はNo.3の方が小さい。a/dの小さい方がエネルギー吸収が小さいのはせん断力が作用しているためと推定されるが、曲率測定区間をモーメント勾配にかかわらず1.5dとした影響も含まれると考えられる。なお、全体の変形量に占める弾性変形の割合は終局時より降伏時の方が大きいため、これら基部1.5dの曲率靱性率は通常の一本柱柱頭部の変位靱性率に比べて大きめの値が算出されていると考えられる。

以上のように、部材耐力上、作用曲げモーメントの1/10という比較的小さなねじりモーメントが曲げモーメントと同時に作用した場合や、またa/d=10という斜張橋主塔部材等におけるのと同じ程度のせん

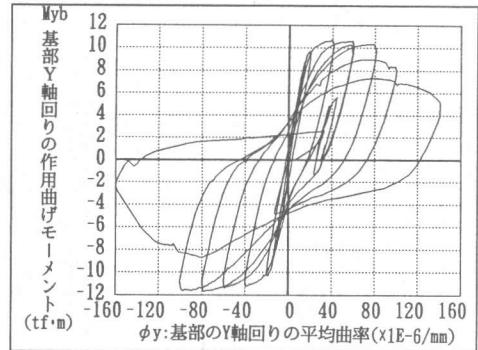


図-7 モーメント曲率関係(No.1)

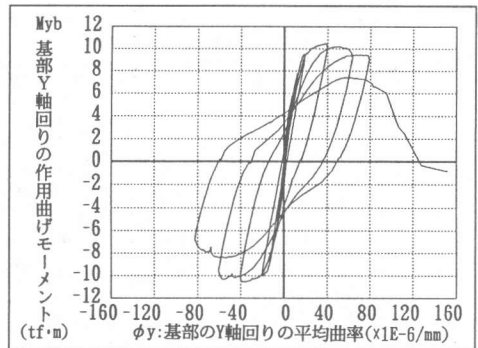


図-8 モーメント曲率関係(No.2)

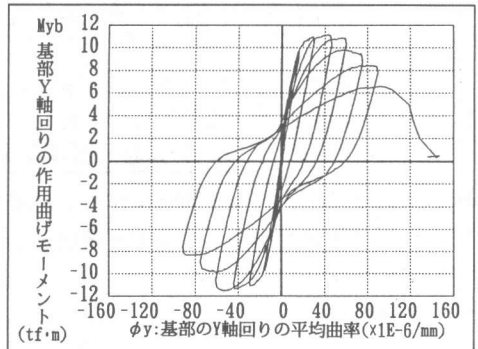


図-9 モーメント曲率関係(No.3)

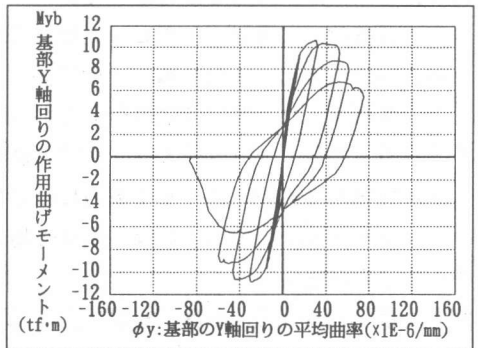


図-10 モーメント曲率関係(No.4)

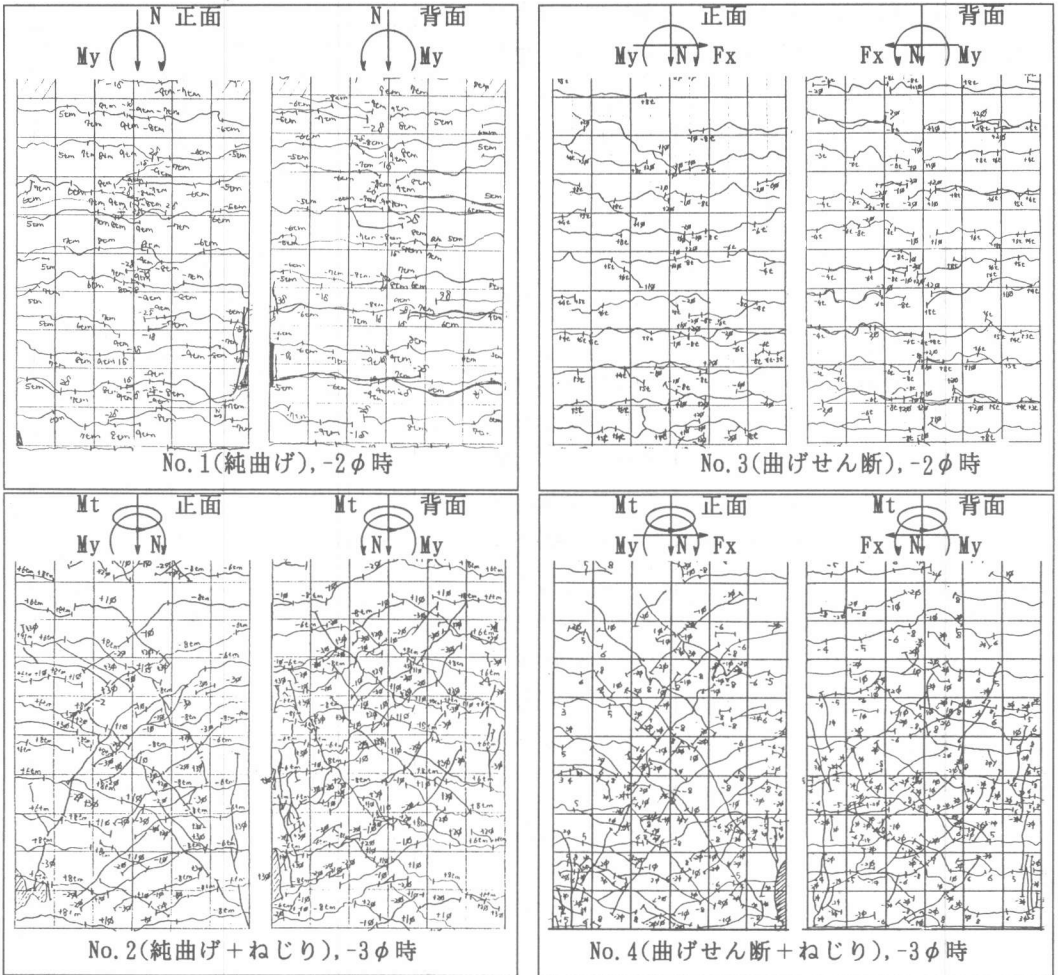


図-11 柱基部のひび割れ状況（せん断力方向と平行な面）

断力が曲げモーメントと同時に作用した場合でも、RC柱の曲げ変形性能は純曲げのみが作用する場合と比べて靱性率・エネルギー吸収ともかなり異なる可能性があることが示された。

6. 結論

新しく開発した6自由度加力装置を用いて、RC柱部材に組み合わせ荷重による交番加力実験を行った結果、以下のことが分かった。

①本装置は、RC部材の荷重ピーク後の領域を含む軸力・曲げ・せん断力・ねじりを組み合わせた加力実験に実用上十分な精度で使用することができる。

②本装置により、 $P-\delta$ 効果を別にすれば、塔部材や橋脚のような細長い部材について全体模型を作ることなく部分模型実験で検討対象部分の荷重状態を再現することができる。

③RC柱部材に軸力と曲げせん断力にねじりを加えた実験を行った結果、比較的小さなねじりモーメントやせん断力でも、曲げと同時に加えられることで部材の曲げ変形性能に無視できない影響を及ぼす可能性がある。

参考文献 1) 村山 八洲雄・新保 弘：コンクリート柱部材の6自由度加力装置、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14, No. 2, 1992. 6