

報告

[2141] コンクリート柱部材の6自由度加力装置

正会員 村山八洲雄 (鹿島技術研究所)

正会員○新保 弘 (鹿島技術研究所)

1. まえがき

コンクリート部材に複合部材力が作用するときの部材耐力や変形挙動を実験的に調べることで、6自由度加力装置を考案し製作したので、装置の概要と検証実験結果について報告する。

一般に柱部材に作用する部材力としては、曲げ、せん断、軸力、ねじりがあり、曲げとせん断にはそれぞれ2方向の成分があることを考慮すると、6種類の部材力が存在する。構造物を構成する部材は、これらの部材力の幾つかが同時に作用するいわゆる複合荷重下の状態にあり、特に外荷重が地震力のように変動荷重の場合には、交番部材力が作用することになる。

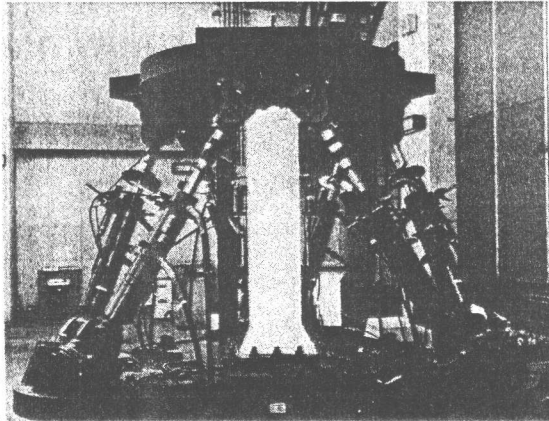


写真-1 6自由度加力装置外観

複合荷重下のコンクリート部材の耐力については耐力の相関曲面も幾つか提案されるなどかなり明らかになっているが、まだ検討の余地も残されている。

また、複合荷重下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るとはいえない。

そこで、複合荷重下の部材耐力および荷重と変形の関係を実験的に調べる装置として、6自由度加力装置を製作した。本試験装置を用いることにより、柱試験体に任意の部材力を同時に加力することができる。

2. 加力の原理

本装置は、写真-1に示すように、剛性の大きい加力ブロックと反力ブロック、およびこれらに立体トラス状に組み立てた6本の両働ジャッキによって構成されている。立体トラスの組み方には種々の形式が想定されるが、本装置では、図-1に示すように、平面的には6本を正三角形に組み合わせるとともに、加力ブロック上で接合する一対のジャッキがこれらを含む鉛直面でやはり正三角形を構成するようにした。こうすることによって、柱試験体の柱頭部に作用する複合荷重を各ジャッキの軸力でコントロールするアルゴリズムを簡単に行うことができる。また、対象構造物として、橋脚のように柱頭部よりも柱脚部の曲げモーメントが大きくなる部材に対して使い勝手が良いものとなっている。

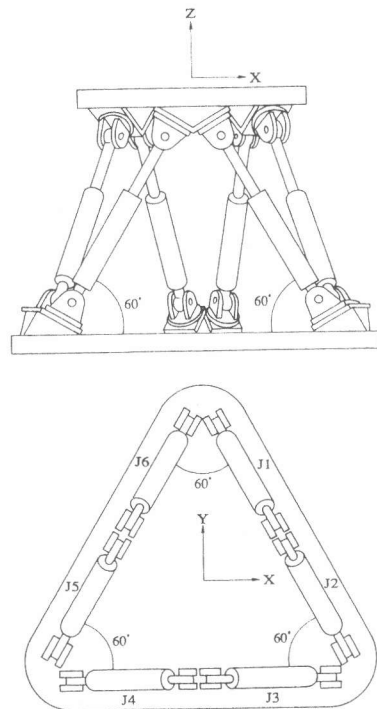


図-1 ジャッキの組合せ

以下に、試験体柱頭部での部材力と各ジャッキに与えるべき軸力との関係式を示す。

$$[P_s] = [T] \cdot [F_j]$$

$[P_s] = [F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z]$: 試験体柱頭部での部材力

$[F_j] = [J_1, J_2, J_3, J_4, J_5, J_6]$: 各ジャッキの軸力

$$[T] = \begin{pmatrix} \cos\theta_{11}\cos\theta_{12} & \cos\theta_{11}\sin\theta_{12} & \sin\theta_{11} & P_{y1}\cdot\sin\theta_{11} & -P_{x1}\cdot\sin\theta_{11} & R\cdot\cos\theta_{11} \\ \cos\theta_{21}\cos\theta_{22} & \cos\theta_{21}\sin\theta_{22} & \sin\theta_{21} & P_{y2}\cdot\sin\theta_{21} & -P_{x2}\cdot\sin\theta_{21} & -R\cdot\cos\theta_{21} \\ \cos\theta_{31}\cos\theta_{32} & \cos\theta_{31}\sin\theta_{32} & \sin\theta_{31} & P_{y3}\cdot\sin\theta_{31} & -P_{x3}\cdot\sin\theta_{31} & R\cdot\cos\theta_{31} \\ \cos\theta_{41}\cos\theta_{42} & \cos\theta_{41}\sin\theta_{42} & \sin\theta_{41} & P_{y4}\cdot\sin\theta_{41} & -P_{x4}\cdot\sin\theta_{41} & -R\cdot\cos\theta_{41} \\ \cos\theta_{51}\cos\theta_{52} & \cos\theta_{51}\sin\theta_{52} & \sin\theta_{51} & P_{y5}\cdot\sin\theta_{51} & -P_{x5}\cdot\sin\theta_{51} & R\cdot\cos\theta_{51} \\ \cos\theta_{61}\cos\theta_{62} & \cos\theta_{61}\sin\theta_{62} & \sin\theta_{61} & P_{y6}\cdot\sin\theta_{61} & -P_{x6}\cdot\sin\theta_{61} & -R\cdot\cos\theta_{61} \end{pmatrix}$$

ここに、 θ_{i1} : i ジャッキの水平方向角

P_{x_i} : i ジャッキの上板取付位置の x 座標

θ_{i2} : i ジャッキの仰角

P_{y_i} : i ジャッキの上板取付位置の y 座標

R : 上板のジャッキ取付位置の半径

ここで、荷重変換マトリクス $[T]$ 中のジャッキの方向を示す θ は、試験体の変形に伴い上部加力ブロックの変位・回転に応じて変化するものであるが、ここでは変形量の影響は微小と考えて θ は一定値とした。大変形の場合は測定値をフィードバックして荷重変換マトリクスを修正する必要があるが、影響程度については後述する。

3. 加力システム

加力装置の構成を図-2に示す。加力ブロックと反力ブロックは十分な剛性を持つように厚さ100mmの鋼板を用い、ジャッキと加力ブロックの接合部には全方向に回転可能なユニバーサルジョイントを使用している。

ジャッキの制御は、各ジャッキに取り付けたロードセルによる荷重値をコンピュータでモニタし、目標とする軸力と比較して、相違がある場合は対応する油圧系統の電磁弁をON/OFF制御し、所定の軸力を得るようにした。

一つの目標とする柱頭部部材力を達成する過程は、目標部材力に対応するジャッキ軸力を微小ステップに分解し、ステップの軸力を各ジャッキが順次満足するようにして、最終目標値に近づける方法によった。この制御アルゴリズムを図-3に示す。

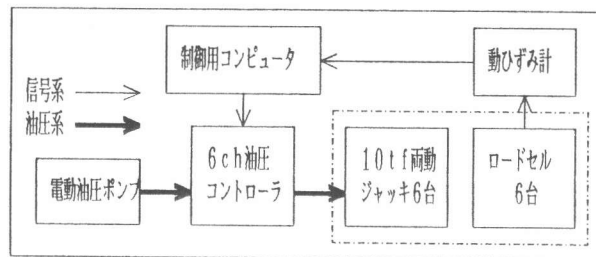


図-2 加力装置の構成

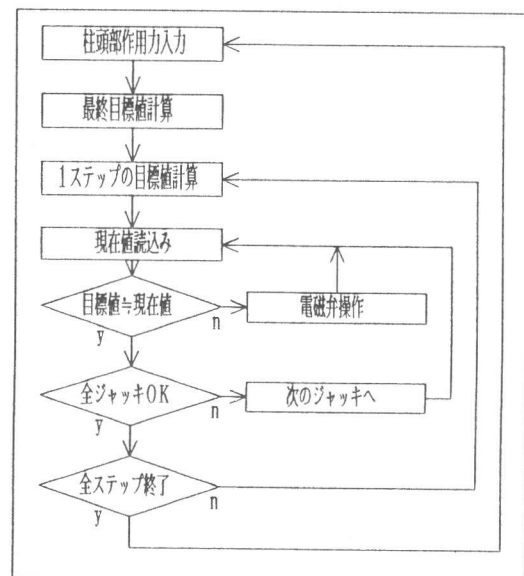


図-3 制御アルゴリズム

4. 検証実験

(1) 実験概要

H鋼（断面 $300 \times 300 \times 10 \times 15$ 、長さ $1,236\text{mm}$ ）を試験体として用いて、本装置の加力精度の検証実験を行った。ひずみゲージは各測点毎に3軸ゲージを使用した。試験体の形状およびひずみゲージの貼付け位置を図-4に示す。

加力は単純化して、X軸方向のせん断力 (F_x)、Y軸方向のせん断力 (F_y)、軸力 (F_z)、X軸回りの一様曲げモーメント (M_x)、Y軸回りの一様曲げモーメント (M_y) およびねじりモーメント (M_z) を別々に試験体柱頭部に与えた。その際得られたひずみの測定値を応力度に換算し、更に試験体の断面定数を用いて柱頭部部材力を求め、これと各ジャッキの軸力から換算した柱頭部部材力とを比較した。

(2) 加力精度

各加力ケースで得られた応力度分布の測定結果の例を図-5に、また、加えた部材力と応力度から求めた部材力の比較を表-2に示す。なお、応力度から部材力への換算は次のように行った。

①軸力：全測点の軸応力度の平均値と断面積の積。

②曲げモーメント：強軸方向は外側測点の軸応力度（最外縁応力度）の平均値と断面係数との積。弱軸方向は外側測点の軸応力度の平均値から外挿した最外縁応力度と断面係数との積。

③せん断力：腹板中央のせん断応力度に $2/3$ 倍した値と腹材断面積との積。ただし、弱軸方向のせん断加力に対しては、フランジの非中央部でのせん断応力度を放物線理論で補正して部材力を計算。

④ねじりモーメント：フランジの面内曲げ応力度（外側測点）から求めたねじりモーメントとサンブナンのせん断応力度（ウェブ中央の測点）から求めたねじりモーメントの和。

本加力装置は、表-1に示されるように、弱軸方向のせん断の場合を除けば $1 \sim 4\%$ の誤差となっている。応力度から部材力への計算誤差を勘案すると実用上十分の精度で加力できたといえる。弱軸方向のせん断の場合は約 20% と計算されたが、これは、最大応力度の発生する板

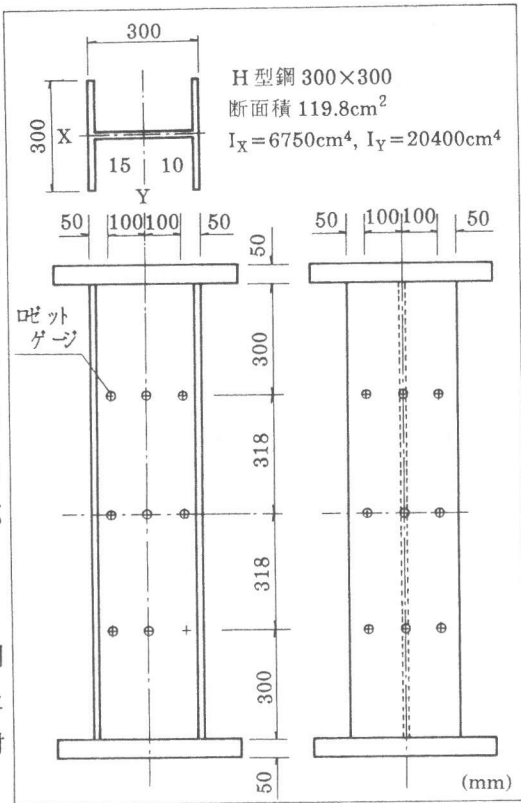


図-4 試験体の形状とゲージ位置

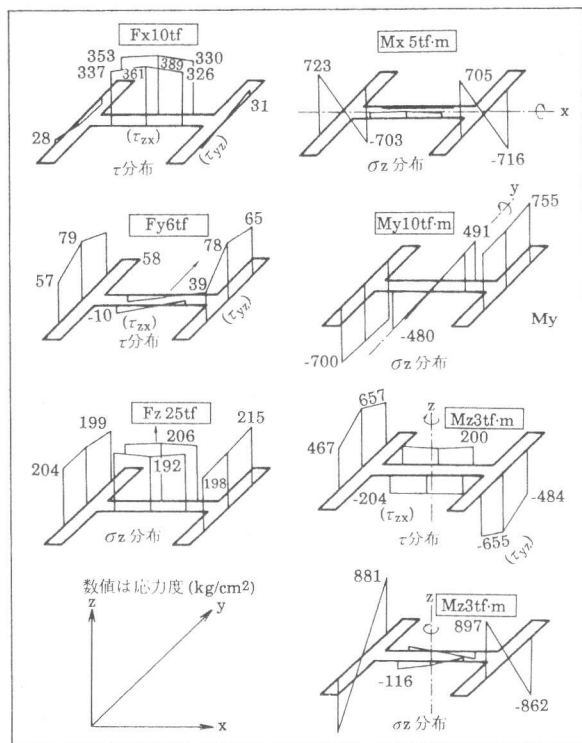


図-5 部材力ごとの応力度分布

材の接合部を避け、応力度の小さい測点を採用したことの影響と推定される。

表-1 作用部材力の検討

	F_x (tf)	F_y (tf)	F_z (tf)	M_x (tf·m)	M_y (tf·m)	M_z (tf·m)
ジャッキ合力による部材力	9.99	5.94	24.95	4.94	9.97	2.93
応力度より逆算した部材力	10.12	4.81	24.26	4.80	9.70	2.82
誤差 (%)	1%	19%	4%	3%	3%	4%

(3) 加力装置の安定性

所定の柱頭部部材力を得るため、これを20~50ステップに分割して漸増的に加力した場合、目標部材力を得るのに要した時間は3~5分程度であった。ジャッキ軸力が単調増加、単調減少の場合は非常に安定して加力できた。ただし、交番荷重の場合は収束に至る安定性が劣る場合もあった。安定性を高めるには作動油の流速を上げすぎないことが重要である。

5. 大変形に対する検討

大変形の場合は、前述のように加力ブロックと反力ブロックの相対変位を測定して各ジャッキの方向角を計算し、荷重変換マトリクス [T] を修正して使用すれば、ほぼ上述と同程度の誤差で柱頭部部材力を得ることが可能と推定される。今回の実験では加力を試験体の弾性ひずみ内で行ったので、これを確認することはできなかったが、ある程度の目安を得るため、下記の6種類についてジャッキの角度補正を行わない場合の誤差をそれぞれ計算で調べた。

表-2 大変形の部材力への影響

目標値	変位・傾	作用力
$F_x=10\text{tf}$	$d_x=100\text{mm}$	$F_x=9.84\text{tf}$
$F_y=10\text{tf}$	$d_y=100\text{mm}$	$F_y=9.85\text{tf}$
$F_z=10\text{tf}$	$d_z=100\text{mm}$	$F_z=10.23\text{tf}$
$M_x=10\text{tf}\cdot\text{m}$	$\theta_x=9.3\text{deg}$	$M_x=9.44\text{tf}\cdot\text{m}$
$M_y=10\text{tf}\cdot\text{m}$	$\theta_y=9.3\text{deg}$	$M_y=9.68\text{tf}\cdot\text{m}$
$M_z=10\text{tf}\cdot\text{m}$	$\theta_z=9.3\text{deg}$	$M_z=9.96\text{tf}\cdot\text{m}$

①軸力：柱頭部が10cm伸びた場合。

②曲げモーメント：柱頭部のジャッキ支点が10cm移動するように加力ブロックが回転した場合。

③せん断力：柱頭部が水平に10cm移動した場合。

④ねじりモーメント：柱頭部のジャッキ支点が円周方向に10cm移動した場合。

計算結果によると、表-2に示すように、この程度の大きさの試験体の場合、着目する柱頭部部材力は2~6%の誤差範囲で加力が可能であると考えられる。

なお、試験体の種類によっては加力ブロックの重量によるP-Δ効果が無視できない大きさで現れる場合もあると考えられる。そのような場合は、計算上これを考慮した加力を行うか、加力ブロックの重量を別途保持するような装置を設けて対処することが想定される。

6. まとめ

本装置を用いることにより、柱試験体への6自由度複合加力が行える見通しが得られた。この装置の原理を応用すれば、箱型部材や壁部材への複合加力も可能になると考えられる。

しかし、この種の装置の使用にあたっては、試験体寸法の制限や試験体の固定方法の制約があるので、実験計画に際しては、端部の拘束条件が実験精度を支配する場合もあることに注意する必要がある。