

サブストラクチャー・ハイブリッド実験装置の開発とコンクリート構造部材への適用

京都大学工学部 正員 山田 善一 家村 浩和 中西 伸二

京都大学大学院 学生員 William Tanzo 建設省 正員 ○遠藤 和重

1. はじめに 本研究では、まず複合応力下における構造部材の復元力特性を精度よく評価するため、部材端に軸力、せん断力、曲げモーメントを同時かつ独立に載荷できるシステムを新たに開発した。次に静的繰返し実験およびコンクリート構造物の3自由度サブストラクチャー・ハイブリッド実験を実施し、従来の解析解との比較を行なった。その結果、静的繰返し実験ではファイバーモデルを用いた理論解析解が、サブストラクチャー・ハイブリッド実験ではシュミレーション解が、実験値とよく一致することが認められた。

2. サブストラクチャー実験装置の載荷システム この載荷システムは3台のアクチュエーターの平面内での変位関係を精度良く計算、制御することにより、部材端に水平変位、鉛直変位、および回転変位を作用させることができる。また、3台のアクチュエーターの加力を検出し、システムの力学的釣合より部材端の軸力、せん断力、曲げモーメントを求めることができる。本実験の載荷システムをFig.1に示す。1号機のアクチュエーターは水平に、1、2号機のアクチュエーターは鉛直に図中の中央にある載荷フレームに接続されている。それぞれのアクチュエーターは、両端がシーベルヘッドおよびシーベルベースを介して載荷システム内に接続されており、シーベルヘッドおよびシーベルベースは、ヒンジとして働き、両者とも水平面内で ± 30 度、鉛直面内で ± 5 度の回転が可能である。マイクロコンピュータのCPU内では、供試体下端中心部におけるX方向、Y方向、および回転の所定の変位を与えるために、3台のアクチュエーターが動くべき変位の信号が送られるようになっている。軸力、せん断力、曲げモーメントは次式より算定される。

$$P_X = -(F_1 \sin \gamma_1 + F_2 \sin \gamma_2 + F_3 \sin \gamma_3 + w_B)$$

$$F_Y = -(F_1 \cos \gamma_1 + F_2 \cos \gamma_2 + F_3 \cos \gamma_3)$$

$$M_Z = -[(F_1 \sin \gamma_1) | X_1 - \delta_X | + (F_1 \cos \gamma_1) | Y_1 - \delta_Y | + (F_2 \sin \gamma_2) | X_2 - \delta_X | + (F_2 \cos \gamma_2) | Y_2 - \delta_Y | + (F_3 \sin \gamma_3) | X_3 - \delta_X | + (F_3 \cos \gamma_3) | Y_3 - \delta_Y | + w_B | X_B - \delta_X |]$$

F_1, F_2, F_3 : アクチュエーターの加力

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$: シーベルヘッド、シーベルベース間の勾配

δ_X, δ_Y : 部材端の変位

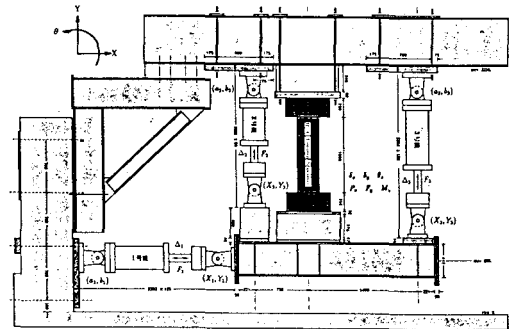
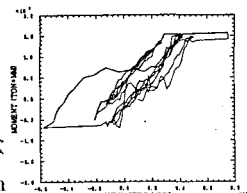
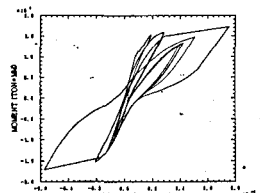


Fig.1 Loading System

3. RC柱模型の静的繰返し載荷実験

RC柱の弾塑性域での挙動を明らかにするため正負交番載荷試験を行なった。載荷方法は軸力を 12 ± 1 tonの一定軸力とし、供試体下端の曲げモーメントを $1000 \text{ ton} \times \text{mm} \pm 100 \text{ ton} \times \text{mm}$ に保ちながら、 X_{delta} を $\pm 5, \pm 10, \pm 15, \pm 20, \pm 25 \text{ mm}$

をそれぞれ2回ずつ行なう載荷経路とした。また、得られたデータより供試体下端より95cmの位置の断面のM- ϕ 関係 (Fig.2) を求め、ファイバーモデルを用いた理論解析解 (Fig.3) との比較を行なった。正側の曲げモーメントはよく一致しているが、負の曲げモーメントが作用するときには、負のせん断力が大きいため、負の曲率の値が大きくなり、せん断力の影響を考慮しない理論解析解の負の曲げモーメントは実験値より大きくなった。

Fig.2 M- ϕ (experimental)Fig.3 M- ϕ (analytical)

Yosikazu YAMADA, Hirokazu IEMURA, Shinji Nakanishi, William Tanzo, Kazushige Endo

4. 3自由度サブストラクチャー実験 鉄筋コンクリート構造物を、解析を行なう部分と実験を行なう

部分に分け、前者は電算機による数値解析を、後者は準静的加力による実験を組み合わせ、構造物の地震応答を調べる方法をサブストラクチャー・ハイブリッド実験と言う。サブストラクチャー実験の原理は対象とする構造物全体を実験するのではなく、十分精度良くモデル化できない部分だけを実験し、他の部分は全て数値計算によって処理するというものである。本実験は Fig.4 に示されるような T 型ラーメン鉄筋コンクリート構造物に対して行なった。構造物の運動方程式を立てるときに用いた各部材の剛性マトリックスは弾性としている。この運動方程式において、実験では陽変位 $\bar{d}_n$ を供試体に与え、供試体部材端の復元力を求める。他の部材の復元力は CPU 内で計算され、それぞれを座標変換し構造物全体系の復元力 f を求める。そして、運動方程式は O S 法を用いて数値計算した。運動方程式および O S 法の基本アルゴリズムを次に示すとともに、実験のフローチャートを Fig.5 に示した。

$$M a_{n+1} + C v_{n+1} + K d_{n+1} + (f_{n+1} - K \bar{d}_{n+1}) = P_{n+1}$$

$$v_{n+1} = v_n + (\Delta t/2)(a_n + a_{n+1})$$

$$\bar{d}_{n+1} = d_n + \Delta t v_n + (\Delta t^2/4) a_n$$

$$d_{n+1} = \bar{d}_{n+1} + (\Delta t^2/4) a_n$$

$$a_{n+1}$$

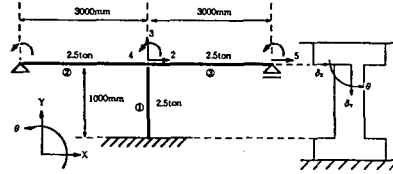


Fig.4 Structural Model

ここで、 a_{n+1} 、 v_{n+1} 、 d_{n+1} 、 $\bar{d}_{n+1}$ はそれぞれ $n+1$ ステップでの加速度、

速度、変位、陽部分の変位を表す。実験における減衰定数は 5 % とし、入力地振動は El Centro 地震 (1940) の N S 成分を用いた。オンライン実験中、試験体の軸力だけを一定に保つために軸力の変動が大きくなりすぎたときに、CPU 内から変動軸力制御を行なうための変位信号を送り軸力の変動を抑えた。Fig.6(a) ~ (c) にオンライン実験部分の水平、鉛直、および回転変位応答を、Fig.6(d) ~ (e) にせん断力および曲げモーメントの時刻歴を示した。図中の太い実線は実験を、細い実線はシュミレーション解を示している。水平方向の変位応答はシュミレーション解とほとんど一致した。回転変位の応答も固有周期の成分はほとんど一致している。軸方向の変位応答値はかなり小さなオーダーであるが、シュミレーション解に近いと言える。せん断力、曲げモーメントの時刻歴は、初期はシュミレーション解と一致していたが、その後、剛性の劣化のため、実験値とシュミレーション解の誤差が大きくなり、固有周期の成分も一致しなくなるという結果になってしまった。

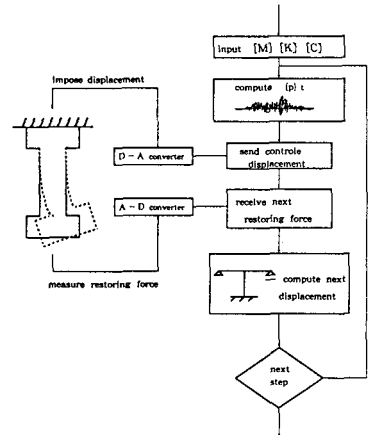


Fig.5 Flowchart of main procedure

5. あとがき 部材に加える軸力は、部材端に水平変位および回転変位を与える

ときに変動を生じてしまう。今後の実験では、このような誤差による変動軸力の制御を精度よく行えるシステムを開発するとともに、実験モデルが変動軸力を生じるような場合、変動軸力をうまく取り扱えるシステムの開発を行なわねばならない。

参考文献 中島、岡本、山崎、石井、佐藤: サブストラクチャー法を用いた仮動的実験、日本建築学会大会学術講演概要集、pp92-101、昭和 63 年 10 月

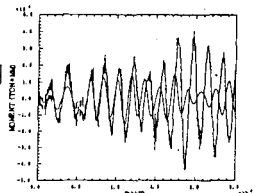


Fig.6(e) Moment

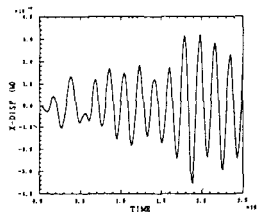


Fig.6(a) Horizontal deformation

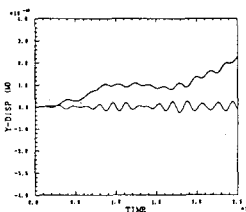


Fig.6(b) Vertical deformation

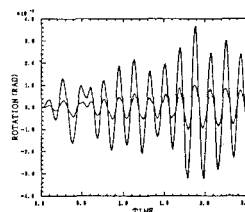


Fig.6(c) Rotation

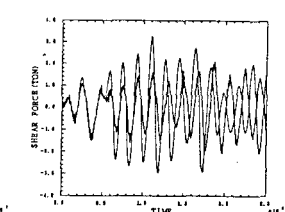


Fig.6(d) Shear Force