

## I-133

## 引張ボルト継手を持つ柱のサブストラクチャー・ハイブリッド実験解析

武蔵工業大学 正会員 皆川 勝  
 武蔵工業大学 学生会員 広橋 渉  
 宇部興産(株) 伊東英二  
 (研究当時武蔵工業大学学生)

**1. はじめに** 本研究では、数学的にモデル化することが困難な復元力特性を有する部分構造の実復元力特性を、オンラインで計算機内に取り込みながら、全体構造系の応答解析をする、サブストラクチャー・ハイブリッド実験システムを開発することを目的とした。開発したシステムでは、構造系をせん断型多自由度系にモデル化し、復元力が数値モデルで適切に表わし得ない部分構造系の実復元力特性を実測し、これを用いて全体系の応答を数値計算により求めるものである。また、一応用例として、基部に引張ボルト継手を有する柱に実地震波が作用する場合の動的応答を求めた。

## 2. サブストラクチャー・ハイブリッド実験システムの概要

サブストラクチャー・ハイブリッド実験システムの構成を図-1に示す。全体図は、解析部と実験部に分かれこれをオンラインで結んでいる。

例えば、3層ラーメンのような場合には図中に示すような3自由度系にモデル化することが可能である。第1層の復元力特性が強い非線形性を示し、数値モデルによって表現し得ない場合、応答変位 $X_1$

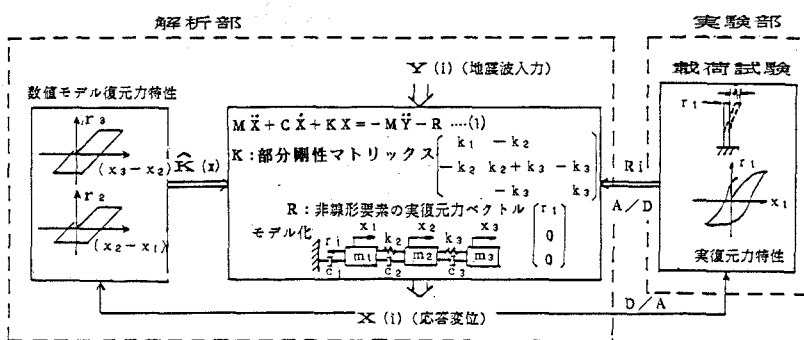


図-1 システムの概要

に対応する実復元力 $r_1$ が載荷試験により直接測定され、これがA/D変換器を介して計算機内にオンラインで取り込まれて実復元力ベクトル $R$ が構成される。一方、残る部分構造の復元力と変位の関係は数値モデルで表現し、剛性行列 $K$ が作成される。これらを用いて、式(1)を解くことにより、次ステップの応答変位を求めることができる<sup>1)</sup>。なお、本研究では簡単のために、数値モデルにより表される部分構造系の復元力-変位関係が線形な問題を対象とした。

**3. 時間積分法** 図-2に、中央差分法及びNewmarkの $\beta$ 法を時間積分法に用いる場合の基礎式を示す。対象となる振動系の自由度が多くなると系の固有値に大きな値が含まれることになり、固有値は非常に広い範囲に分布することになる。固有値の小さい部分で評価し得る挙動の解析が最も大きい固有値によって制約を受けることは好ましくない<sup>2)</sup>。したがって、構造系を多自由度系にモデル化するサブストラクチャー・ハイブリッド実験に用いる時間積分法としては、中央差分法などの条件付き安定な解法より、Newmarkの $\beta$ 法( $\beta=1/4$ )などの無条件安定な方法の方が、適応範囲は広い。時間積分にNewmarkの $\beta$ 法を用いる場合、式(2)をそのまま解こうとすれば、時刻 $t_{i+1}$ における応答を計算するのに、その時点では測定されていない同時刻 $t_{i+1}$ での実復元力ベクトル $R_{i+1}$ が必要である。これを解決する方策としては、①: 時刻 $t_i$ における実復元力 $R_i$ を用いる、②: 何らかの方法によって実復元力 $R^{(p)}_{i+1}$ を推定して用いる、③:  $R^{(p)}_{i+1}$ を推定し、更に実測された実復元力ベクトル $R_{i+1}$ との差を、次ステップで修正する、④: 初期値として $R_i$ を用い、収束計算により求める、などが考えられる。それぞれの方法に一長一短があることから、本研究で構築したシステムでは、時間積分法として中央差分法及びNewmarkの $\beta$ 法のどちらかを選択できるようにした。

**4. 解析対象** 解析対象とした構造物は、図-3(a)に示す基部に引張ボルト接合を有する柱である。最下層の実復元力特性を測定するために、図-3(b)に示す支間中央に接合部を有する単純梁を作成し、そのス

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\left\{ \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} M + \frac{1}{2\beta \cdot \Delta t} C + K \right\} X_{i+1} = -MY_{i+1} + Ma_i + Cb_i - R_{i+1}$ <div style="text-align: right; margin-right: 50px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">実復元力項</div> </div> $a_i = \left( \frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{X}_i + \frac{1}{\beta \cdot \Delta t} \dot{X}_i + \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} X_i$ $b_i = \Delta t \left( \frac{1}{4\beta} - 1 \right) \ddot{X}_i + \left( \frac{1}{2\beta} - 1 \right) \dot{X}_i + \frac{1}{2\beta \cdot \Delta t} X_i$ $\ddot{X}_{i+1} = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} [X_{i+1} - X_i] - \frac{1}{\beta \cdot \Delta t} \dot{X}_i - \left( \frac{1}{2\beta} - 1 \right) \ddot{X}_i$ $\dot{X}_{i+1} = \frac{1}{2\beta \cdot \Delta t} [X_{i+1} - X_i] + \left( 1 - \frac{1}{2\beta} \right) \dot{X}_i + \Delta t \left( 1 - \frac{1}{4\beta} \right) \ddot{X}_i$ <p style="text-align: center;">(a) Newmarkのβ法・・・式(2)</p> | $\left\{ \frac{1}{(\Delta t)^2} M + \frac{1}{2 \cdot \Delta t} C \right\} X_{i+1} = -MY_i - \{ K - \frac{2}{(\Delta t)^2} M \} X_i - \left\{ \frac{1}{(\Delta t)^2} M - \frac{1}{2 \cdot \Delta t} C \right\} X_{i-1} - R_i$ <div style="text-align: right; margin-right: 50px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">実復元力項</div> </div> <p style="text-align: center;">ただし <math>\Delta t \leq 2/\omega_{\max}</math><br/> <math>(\omega_{\max} : \text{最大固有円振動数})</math></p> $\ddot{X}_i = \frac{X_{i+1} - 2X_i + X_{i-1}}{(\Delta t)^2}$ $\dot{X}_i = \frac{X_{i+1} - X_{i-1}}{2 \cdot \Delta t}$ <p style="text-align: center;">(b) 中央差分法・・・式(3)</p> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

図-2 時間積分法

パン中央での変位と反力の関係を測定した。試験体、載荷方法、測定方法に関する詳細は文献[3]を参照されたい。入力地震波は日本海中部地震において測定された実地震波の一例を、最大加速度200galで用いた。初期剛性は載荷試験により測定した。減衰はレーレー減衰とし、係数 $a_0$ および $a_1$ は次式により求めた。

$$C = a_0 M + a_1 K, \quad a_0 = \frac{2\omega_1\omega_2(\zeta_1\omega_2 - \zeta_2\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}, \quad a_1 = \frac{2(\zeta_2\omega_2 - \zeta_1\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}$$

$\omega_1, \omega_2$ は1次, 2次の固有円振動数,  $\zeta_1, \zeta_2$ は1次, 2次のモード減衰定数を示す。時間刻み $\Delta t$ は0.02secであり、中央差分法を用いて時間積分する際に解が発散しない条件 $\Delta t \leq 2/\omega_{\max}$ を満たしている。

### 5. 解析結果及び考察

図-4及び図-5に、中央差分法及びNewmarkのβ法( $\beta=1/4$ )を用いた実験解析結果を、時刻歴で示す。本応用例で用いた試験体が有する引張ボルト継手は、接触面が離開することによって剛性が低下するという特性を持っている。しかし、そのような非線形性を示すものの大きな塑性変形を伴わないため、最終的には、荷重をうける前の状態にもどる<sup>3)</sup>。したがって、図-6に示す継手部の非線形性を無視した数値計算による結果と比較しても、一時的に最大応答変位は大きくなるが、全体的には、大きな差は見られない。また、Newmarkのβ法の場合には、実復元力ベクトル $R_{i+1}$ のかわりに1ステップ前の $R_i$ を用いたが本解析例では、変位振幅が約10%程中央差分法による値より大きくなった。

参考文献：1) Iemura, H., Yamada, Y. and Tanzo, W. : Testing R/C specimens by a substructure-based hybrid earthquake loading system, Proc. of 9th World Conference on Earthquake Engineering, pp.35-41, Tokyo-Kyoto, Japan, August 2-9, 1988.

2) 吉田裕：有限要素法運動方程式の時間積分法，日本鋼構造協会，構造工学における有限要素法の理論と応用，pp.27-35，1986年6月。

3) 皆川勝・西脇威夫・増田陳紀・黒田充紀：ハイブリッド実験システムによる引張ボルト継手の解析，土木学会第44回年次講演会講演概要集，I部門，pp.478-479，1989年10月。

[謝辞] 本概要は、武蔵工業大学・西脇威夫教授ならびに同・増田陳紀助教授のご助言のもとに、当時卒業生であった広橋ならびに伊東両君の協力を得て、主として皆川が進めた研究の成果であることを付記する。また、実験にあたっては同・構造実験棟・仲宗根茂技士補のご協力を得た。

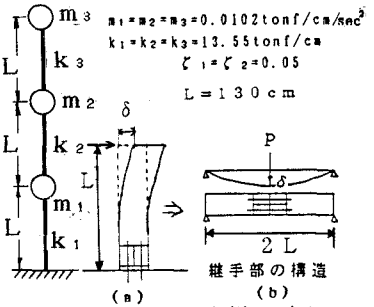


図-3 解析対象と実測モデル

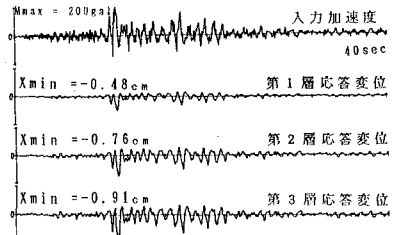


図-4 入力加速度および中央差分法を用いて得られた応答変位

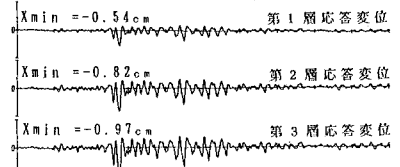


図-5 Newmarkのβ法を用いて得られた応答変位

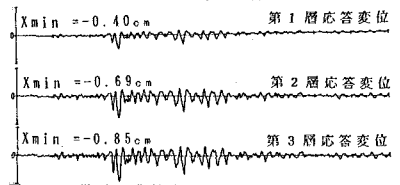


図-6 継手の非線形性を無視した際の応答変位