

大阪市立大学工学部 学 生 員 〇島田 直樹
 大阪市立大学工学部 正 会 員 松浦 幹佳
 大阪市立大学工学部 フェロー 園田恵一郎

1. はじめに：現在、有限要素法による構造解析は、そのほとんどが変位法により行われているが、時々刻々と剛性が変化していく非線形問題を一定の変位関数を用いて処理しようとする、計算時間、精度上に困難性が生じてくる。非線形問題におけるこうした問題点を解消し、非線形挙動を、精度良く、実用的に追跡するためには、基本的には、応力法をベースにした手法の展開を計るべきであるとの発想の下に、本研究では、ハイブリッド法¹⁾による骨組構造の材料非線形挙動を含む解析手法を示し、3 径間ラーメン橋の地震応答解析例に関し既存の解析ソフトとの比較検討を行った。

2. 本解析手法：骨組部材(m)に対するハイブリッド型ポテンシャルは以下のように表せる。

$$\pi^{(m)} = -\frac{1}{2} S_m^T \tilde{C}_0 S_m - S_m^T \tilde{C}_1 q_{0m} + S_m^T G_m^T u_m + q_{0m}^T Q_m^T u_m \quad (1)$$

$$\text{ここに、} \tilde{C}_0 = \int_0^l H_m^T C_s H_m dx, \quad \tilde{C}_1 = \int_0^l H_m^T C_s H_{mq} dx$$

上式において、 C_s ：部材断面の柔性行列、 S_m ：材端力、 q_{0m} ：材端力の荷重項、

u_m ：節点変位、 H_m ：材端力と釣合う断面力分布、 H_{mq} ：荷重と釣合う断面力分布である。

式(1)の停留条件を用いれば、要素剛性行列が得られる。すなわち、

$$\delta \pi^{(m)} = \frac{\partial \pi^{(m)}}{\partial S_m} \delta S_m + \frac{\partial \pi^{(m)}}{\partial u_m} \delta u_m = 0 \quad (2)$$

以降の手順は通常の変位法と同じである。

本研究の解析モデルは図-1 に示す 3 径間ラーメン橋である。他の解析ソフトで行ったモデルを再現した 17 節点モデルと、節点数を減らした 6 節点モデルを考えた。鉄筋、およびコンクリートの応力-ひずみ関係は道路橋示方書²⁾によった。M- ϕ 関係は図-2 のようにひび割れ発生点、鉄筋降伏点、コンクリート終局点を直線で結んだ骨格曲線を定義し、最大点指向型のトリリニアモデル（武田モデル）を履歴モデルとした。動的解析には中央差分法による陽解法を用いて時刻歴応答解析を行い、減衰評価は Rayleigh 減衰とした。使用した地震波は、兵庫県南部地震における JR 鷹取駅での観測データの東西水平方向成分（最大加速度-672.639gal）を抽出したものである。なお、この観測地震波形は道路橋示方書耐震設計編のタイプ II（内陸直下型）の地震動に該当し地盤は II 種地盤になっている（図-3 参照）。

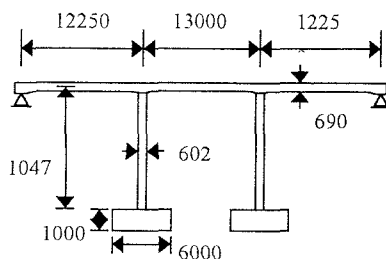


図-1 解析モデル

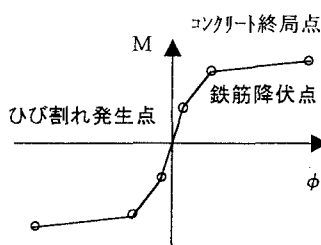


図-2 曲げモーメント-曲率関係

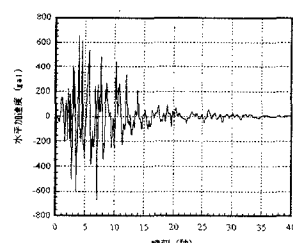


図-3 入力地震波形

3. 解析結果：既往ソフトは、変位法を用いているため、材料非線形挙動が予測される柱の上下端に、ヒンジ領域の小さい要素を設定している。本解析ソフトでは、部材の中に材料非線形を処理する要素を組み込んでいる。このような、解析法による節点モデルの若干の差異はあるが、質点系、Rayleigh 減衰、モーメント-曲率関係の骨格曲線が同一になるようにモデル化した。まず、固有値解析であるが、17 節点モデルで他解析ソフトとほぼ等しい値となった。また、動的応答解析の際の追跡時間刻み Δt を変位法よりも粗く採ることができることも確かめられている。次に、残留変位および最大、最小変位は既往のソフト間においてもばらつきが見られる。本解析ソフトによる結果は他の解析ソフトに比べ、若干大きい結果であった。これは、履歴特性が武田モデルという非常にトリッキーなモデルであるため、非線形領域での追跡時間ステップの差、および履歴の追跡処理の差によるものと思われる。また、一般に、骨組構造では無視される慣性モーメントを本解析ソフトでは考慮しているのもあると思われる。当然、各ソフトの解析上の条件（入力データ、プログラム上の固定値）が異なることや、プログラムの組み方によっても若干の差異を与える結果となっていると思われる。

次に、17 節点モデルよりも節点数を減らして 1 部材長を長くとしたモデルである 6 節点モデルによる解析結果であるが、17 節点モデルと比較しても残留変位および最大、最小変位とも若干の差はあるがよく似た値を得ている。これにより、本解析手法の特徴である、解析モデルの節点数を最小にすることができ、材料非線形の時刻歴応答を陽解法で追跡する場合の追跡ステップをより長くとることができるという利点を良く表現できていると思われる。

4. 結論

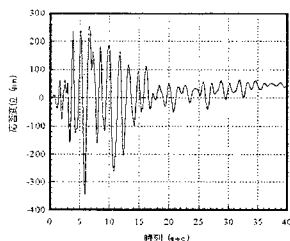
骨組構造という限られた範囲内の議論ではあるが、動的な非線形応答解析で追跡ステップ、精度において良好な結果が得られたのではないかと考える。すなわち、本解析手法は、1) 解析モデルの節点数を最小にすることができる。2) 剛体部分も容易に処理することができる。3) 材料非線形の時刻歴応答を陽解法で追跡する場合の追跡ステップをより長くとることができる。などの利点を有している、ということを示した。

表-1 他ソフトとの比較

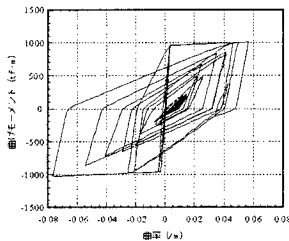
	固有振動数(Hz)			変位(cm)		残留変位
	1次	2次	3次			
本解析結果	1.35	6.46	7.57	Max.	25.36	-4.64
				Min.	-34.65	
A 社	1.29	5.98	7.23	Max.	28.50	3.10
				Min.	-22.00	
B 社	1.29	6.00	7.26	Max.	22.00	-3.50
				Min.	-28.00	
C 社	1.37	6.30	8.10	Max.	25.60	1.00
				Min.	-24.90	
D 社	1.39	6.06	7.23	Max.	19.50	-3.00
				Min.	-23.80	

表-2 6 節点モデルの解析結果

追跡ステップ(sec)	0.0004
減衰評価	1.5 次
最大変位(cm)	26.56
最小変位(cm)	-35.12
残留変位(cm)	-3.77

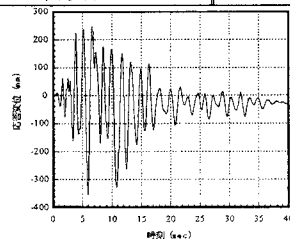


(a) 梁中央水平応答変位

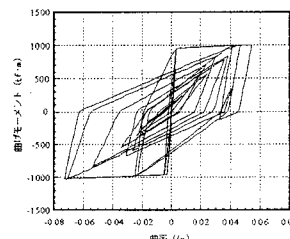


(b) 左柱上端 (M-φ)

図-6 17 節点モデル



(a) 梁中央水平応答変位



(b) 左柱上端 (M-φ)

図-7 6 節点モデル

【参考文献】1) 近藤和雄：鋼構造骨組の塑性崩壊解析，培風館，1991，2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説・V耐震設計編，1996，12