

日本道路公団 正員 後藤祐司・猪熊康夫
日本電子計算(株) 正員 洞毛 隆・松田 宏

1. はじめに

限界状態設計法の施行を前提として、非線形挙動に関する諸研究が数多くみられる。筆者らは PC・RC 構造物を対象とする一般的な非線形解析法の確立を目標に解析プログラムを開発し、載荷実験との比較解析と解析法の改良を繰返して良好な結果を得た。本稿では解析プログラムの概要を紹介し、解析例を示す。

また、PC 不静定構造の非線形解析におけるプレストレス 2 次応力の扱い方を決定するため、2 スパン PC 梁モデルの計算結果から推定した局部剛性低下に伴うプレストレス 2 次応力の変化について報告する。

2. コンクリート構造物の非線形解析プログラムの概要

この解析プログラムは PC または RC の任意骨組構造を対象として、上載・地震・温度荷重や強性変形に対して弾性域からコンクリートの曲げ圧壊に至る迄詳細に逐次計算するものであり、次の内容の構成である。

- (1) 任意の断面形、鉄筋・PC 鋼材の量と位置を認識して初期断面性能の計算
- (2) 材料の非線形性を考慮した軸力・モーメント・曲率関係 (N-M- ϕ 曲線) の計算
- (3) 変位法による線材骨組の構造計算

材料の $\sigma-\epsilon$ 曲線は、コンクリートは Hognestad 型か供試体試験の近似式を選択し、鉄筋はバイリニア、PC 鋼材は 5 本の折線で近似した。N-M- ϕ 曲線は断面を細分割して、ひずみの適合条件と力のつり合い条件からひび割れ発生・鉄筋降伏・PC 鋼材の勾配変化点について計算し、マルチリニアで近似した。

部材曲げ剛性は部材を小区間の要素に分割し、要素に N-M- ϕ 曲線の勾配で与える。この方法では 1 断面の剛性低下でも要素全域が低下するため、結果的に剛性の過小評価となる。本解析プログラムではひび割れ発生後の有効剛性を与える Branson の提案式を次式のように変形して、有効剛性に対する修正 N-M- ϕ 曲線も利用可能とした。

$$(EI)_{\text{eff}} = \left(\frac{M_{\text{cr}} - M_{\text{dc}}}{M - M_{\text{dc}}} \right)^m (EI)_g + \left\{ 1.0 - \left(\frac{M_{\text{cr}} - M_{\text{dc}}}{M - M_{\text{dc}}} \right)^m \right\} (EI)_{\text{cr}} \quad (m = 3 \text{ または } 4)$$

Mdc ; de-compression モーメント (EI)eff; 有効剛性
Mcr ; ひび割れモーメント (EI)g ; 全断面有効時の剛性
M ; 作用曲げモーメント (EI)cr ; ひび割れ後の剛性

また、作用軸力が増加する部材では指定の変化量毎に N-M- ϕ 曲線を再計算して構造計算をすゝめる。

3. 局部剛性低下に伴うプレストレス 2 次応力の変化について

PC 不静定構造の PC 部材が局部剛性低下を起すとき、プレストレス 2 次応力の変化を非線形解析に採り込む方法が問題となった。非線形域でのプレストレス 2 次応力の変化については実験的にも明らかではない。

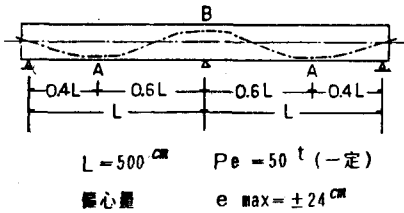
そこで、2 スパンの連続梁をモデルにして PC 鋼材を直線と曲線配置した場合の 2 次モーメントの変化を以下の方法で調査した。スパンを 50 等分し、各要素の剛性を低下させてその位置の 2 次モーメントをモーメントの方法で算出した。両モデル共、剛性低下する位置の最終状態は $M_{pII} = -M_p$ となるように 2 次モーメントは変化している。ここで、 M_p はプレストレスによる偏心モーメントで剛性低下による変化は考慮せず一定値と仮定、 M_{pII} はプレストレスによる不静定 2 次モーメントで剛性低下位置の値である。

この結果は 1 微小要素のみ剛性低下する最極端の理想的な状態である。2 箇所以上の要素が同時に剛性低下する場合には 2 次応力の変化量は緩和される。

図-1 に PC 鋼材を曲線配置したモデルの計算結果を示す。縦軸は 2 次モーメント、横軸は剛性低下係数 α で初期剛性に対する低下を表わす。すなわち、 $(EI) = (EI)_0 / \alpha$ 、 $(EI)_0$ は初期剛性である。

A、B各点の単独剛性低下に比べ、2点同時低下の場合には2次モーメントの変化は少ない。

実構造物では剛性低下は集中せず、拡がりをもつこと、終局状態でも α =数10~100程度にしかならないことなどから実質上の2次応力変化は少ないといえよう。しかし、剛性低下位置によって増減するため、終局耐力への影響は生じる。



4. 構造解析例

参考文献に既報のPC斜π橋載荷試験との比較解析に前述のようなプレストレス2次応力の変化を考慮して解析した。前解析では2次応力をスパン中央の剛性低下に比例して減少させたが、本解析では剛性低下に伴い逐次再計算している。

図-2のように、スパン中央の荷重・たわみ曲線は本解析でも実測値に良く近似している。

主要結果を表に示す。耐力に多少差が生じているが、弾性解の2次モーメント初期値でも5.7tm(偏心モーメントの約1/4)と少なく、2次モーメントの変化による耐力減少といえる程の差ではない。2次モーメントはスパン中央のひび割れ発生から支点上のひび割れまでは6.4tmに増加するが、支点上のひび割れ後は5.9tmに減少している。

5. 解析モデル化について

パラメータケーススタディから、構造耐力・変形量を良い精度で得るためには大きな曲げが発生する近傍では要素分割長を断面高の1/3以下とする必要があることが判明した。また、耐力を正確に知るためには材料の σ - ϵ 曲線を正確にモデル化することは当然必要である。

6. むすび

- (1) ここに紹介した非線形解析プログラムを他の破壊載荷実験との比較解析に用いた場合も耐力・変形性状とも良い近似結果を得ている。したがって、この解析プログラムはコンクリート構造の非線形挙動解析に十分適用できるものであり、応力再分配を考慮した耐力を調査する場合に有用である。
- (2) 非線形域におけるプレストレス2次応力の変化を簡単なモデル計算から推定した。それによると、部材の局部剛性低下に伴って2次応力は変化し、構造物の終局耐力に影響するものと考えられる。なお、プレストレス2次応力の変化を定性的に確認し、耐力への影響を調査する目的で2スパンの大型連続梁を用いてプレストレス導入から載荷による曲げ破壊までの実験を計画している。

参考文献 後藤・洞毛 「PCπ型ラーメン橋の限界載荷試験結果とその非線形解析」

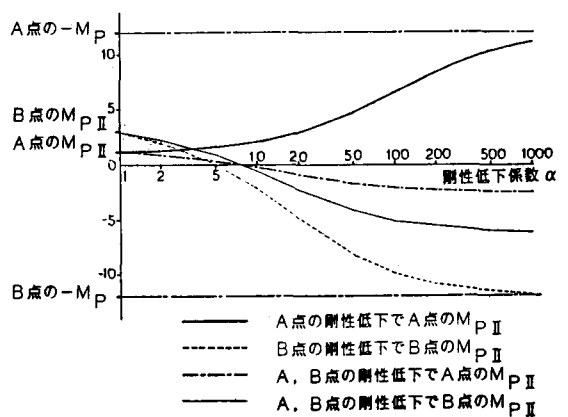


図-1 剛性低下に伴う2次モーメントの変化

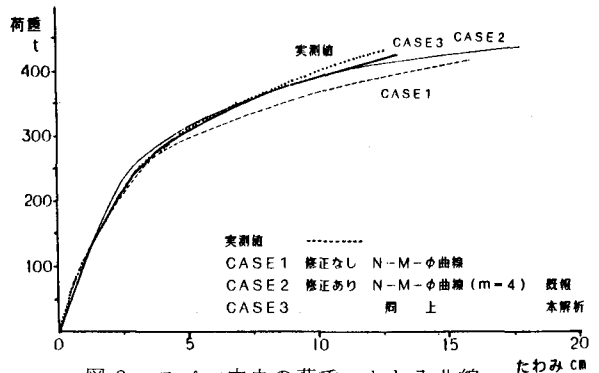


図-2 スパン中央の荷重・たわみ曲線

	実測値	CASE 1	CASE 2	CASE 3
スパン中央のひび割れ	80	146	150	146
柱支点上のひび割れ	220	250	260	255
スパン中央	$\epsilon u = 0.0027$	434	-	-
の破壊	$\epsilon u = 0.0035$	-	416	440
			425	

解析では $\epsilon u = 0.0035 \sim 0.0050$ とした。(単位: t)

表 主要結果の比較