

(64) PC架構の終局状態における不静定応力の検討

(株)ピー・エス	正会員	○戸潤 隆
大阪大学	同	大野義照
安井建築設計事務所	同	森高英夫
(株)ピー・エス	同	林 三雄

1. はじめに

本研究は、(社)建築研究振興協会に設けられた共同研究「PC構造設計・施工指針作成」¹⁾(以下、PC共同研究と略記)の研究調整委員会(委員長：岡本伸)のものと構造性能評価WG(主査：渡邊史夫)で行われたものである。

PC架構におけるプレストレスによる部材の軸方向変形と曲げ変形に伴う架構の不静定2次応力および常時荷重による不静定応力は、一般に弾性剛性に基づく線形解析で求められている。また、求められた各弾性応力を対象に部材の許容応力度設計および荷重係数を乗じた終局強度設計が行われている。この設計法は、常時荷重下においてPC架構およびそれを構成する各PC部材を安定した弾性状態を維持させる上で極めて有効な手法と言える。

一方、架構の終局状態を想定した地震荷重時に対する設計においても、建物高さが31m以下の低層構造物では、常時荷重時と同様、地震荷重(一定の水平せん断力)による部材の弾性応力に常時荷重下で弾性計算により求められた各不静定応力をそのまま加算し、一定の荷重係数を乗じて終局強度設計が行われてきた。また、PC部材特有のクリープ変形およびコンクリートの乾燥収縮による架構の変形拘束に伴う各不静定応力についても、日本建築学会刊行のプレストレストコンクリート設計施工規程などを参考にして各係数を適宜設定(例えば、クリープ係数は2.0、乾燥収縮量を 2×10^{-4} 等)して線形解析による応力計算が行われてきた。

しかし、PC共同研究で扱う建物規模は、高さが31mを超え60m以下の中高層建物である。このため、地震力を想定した架構の終局強度設計において、低層構造物で行われてきた弾性剛性に基づく線形解析で得られた各応力を全て加算して架構および部材の終局強度設計を行うことは、架構の耐震性能を的確に検証する上で事実上困難と考えられる。従って、本PC共同研究で提案される設計指針では、建物の耐震性能の検証に非線形の漸増載荷解析を取り入れ、各漸増荷重段階毎に材端の曲げ剛性を評価して剛性マトリクスを組み替え、地震荷重による応力の再配分が行える解析法とした。

このため、PC架構およびそれを構成する各部材の耐震性能の検討は、部材の非線形剛性に基づく漸増載荷解析によることを前提に、架構の終局状態における不静定応力の挙動を検討することにした。架構の不静定応力の発生メカニズムは、各部材に作用する応力による自由変形を部材端で拘束することにより生じるものである。このため、不静定応力は、材端における部材の拘束条件が剛なほど大きく、一般に部材およびその接合条件が弾性状態に在るものとして計算される。ここで、地震荷重による架構の終局状態を想定した場合、部材の曲げ応力に対する非線形形状は、一般に端材端剛塑性バネモデルで表現されるように、曲げひび割れ後の変形の増加に伴い部材端における回転剛性が著しく低下する。

一方、部材の弾性剛性に伴う自由変形を拘束する材端の拘束回転変形は、接合されている各部材間の剛性バランスの変化に伴い相対的に幾らか変化するが、その変形量は完全な剛接合条件の値を上回ることはない。即ち、拘束部材間の剛性バランスの変化に伴う一定幅の変形拘束を見込めば、不静定応力による初期の拘束回転変形量は概ね一定幅と考えることもできる。

そこで、架構の非線形解析に用いられる部材の復元力特性モデルから地震荷重を想定した架構の終局状態における不静定応力の挙動を検討することにした。

2. 部材の解析モデル

架構における不静定応力の発生メカニズムは、各部材に作用する応力に伴う部材の自由変形を、その材端で拘束することにより生じる。このため、不静定応力は材端における拘束条件が剛なほど大きく、一般に部材および材端の接合条件が完全な弾性状態に在るものとして求められる。

ここで、地震荷重時における架構の終局状態を部材の復元力特性モデルから推定した場合、部材の曲げ応力に対する

非線形性状は、一般に端材端剛塑性バネモデルで表現される様に、曲げひび割れ後は変形の増加に伴い材端の回転剛性が著しく低下する。一方、部材の弾性状態において、その自由変形を材端で拘束する回転変形は、剛接合されている各部材の剛性バランスの変化に伴い微妙に変化する。しかし、その拘束変形の変化量は完全剛接合の条件を上回らず、各部材間の剛性バランスの変化に伴う拘束変形を一定量見込めば、不静定応力の元になった初期の拘束変形を概ね一定と見ることが出来る。コンクリート部材の非線形性状は、一般にコンクリートのひび割れおよび引張鋼材の降伏を折れ点とするトリリニア型が用いられる。

図1に、解析モデルから見た単一部材における各変形レベルの不静定応力の挙動を示す。

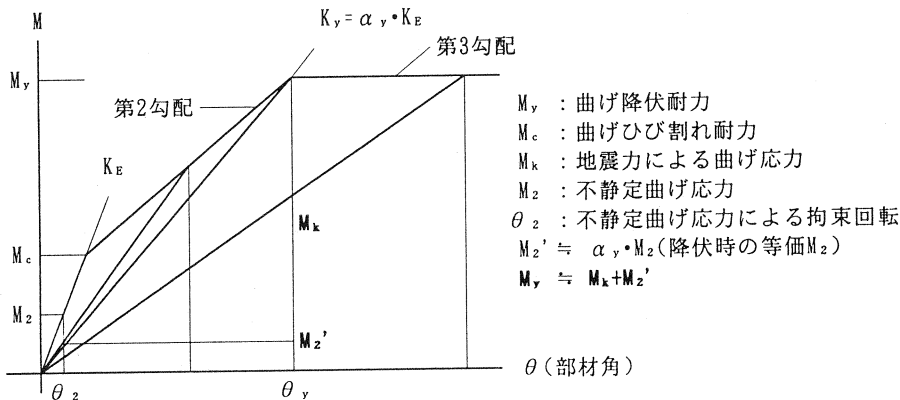


図.1 部材の解析モデル

2.1 解析モデルにおける不静定応力の挙動

部材の不静定応力は、荷重による部材の自由変形を部材端で架構を構成する他の部材と剛接合されることにより回転変形の拘束を受けて生じるものである。このため、地震荷重を想定した架構の終局状態では、予め部材端に生じていた不静定応力 M_2 に地震荷重による応力 M_k が加算されることになる。また、部材の回転変形挙動から見ると、予め拘束されていた材端の回転角に地震荷重による部材の回転角が加算されることになる。このため、図1より次の事柄を述べることができる。

- a) 初期に拘束された部材の不静定応力による回転角の変化は小さく、概ね一定幅と考えることができる。
- b) 部材の変形が初期剛性の範囲で挙動する場合、不静定応力と地震荷重による応力が完全に加算される。
- c) 部材に曲げひび割れが生じて未だ曲げ降伏耐力に達しない範囲の応力増では、部材の初期剛性と等価剛性(原点と第2勾配線上の点を結ぶ線)から、残存する不静定応力と地震荷重による応力を概ね分けすることができる。また、不静定応力の値は初期剛性に対する低下した等価剛性の比に近い値となる。
- d) 部材の変形或いは作用する応力が降伏点に達した時点における不静定応力は、概ね初期の不静定応力に降伏剛性低下率を乗じた値となり、部材が負担する地震時の応力を次のように推定することができる。

$$M_k \approx M_y - \alpha_y \cdot M_2$$

ここに、 M_y :曲げ降伏耐力

M_k :地震力による曲げ応力

M_2 :不静定曲げ応力

α_y :降伏剛性低下率、を示す。

e) 部材の変形が降伏変形を超える場合は、概ね初期剛性に対する原点と第3勾配線上の変形点を結ぶ等価剛性の比で不静定応力が低下する。このため、部材の変形が進めば進む程、等価剛性が低下して初期に与えられた不静定応力が低下することになる。従って、架構の終局時における不静定応力は場合によっては無視することもできるが、完全に消え去るものではない。

また、部材の変形が降伏変形角を超えた場合は、初期に与えられた不静定応力の低下と部材が負担できる地震応力の割合を、次式により推定することができる。

$$M_k \approx M_y - (\alpha_y / \mu) \cdot M_2$$

ここに、 M_y : 曲げ降伏耐力

M_k : 地震力による曲げ応力

M_2 : 不静定曲げ応力

α_y : 降伏剛性低下率

μ : 部材塑性率(θ / θ_y)

θ : 部材の回転角

θ_y : 部材の降伏回転角、を表す。

2.2 不静定応力の挙動

部材の解析モデルから推定できる不静定応力の挙動は、地震荷重による応力と同一方向の不静定応力が加算される部材では、例えば部材が曲げ降伏に達したとしても部材の負担できる地震荷重による応力は、その降伏耐力を下回ることになる。また、地震荷重と逆方向の不静定応力が作用している部材では、降伏耐力以上の地震荷重による応力を負担できることになる。

一方、架構の地震荷重に対する非線形解析として一般に用いられる荷重増分法或いは変形増分解析においては、材端に初期応力或いは初期変形として与えられた不静定応力を部材の回転剛性の低下に伴い漸減させることはできない。

何故ならば、荷重増分法では、不静定応力を各部材の荷重-変形関係を表す復元力特性カーブ上に初期荷重或いは初期変形として与え、その点から地震荷重による応力を増分法で漸増させるためである。

従って、増分解析で初期値として不静定応力を与える場合は、地震荷重時における架構およびそれを構成する各部材の変形レベルを推定し、その時点における部材の等価回転剛性に見合った不静定応力を与えねばならないことになる。

言い換えれば、想定する地震動レベルと地震荷重時における非線形漸増荷重解析の結果に対する設計クライテリアから初期値として与える等価な不静定応力を決めることができることを意味する。

2.3 漸増荷重解析による検討結果例

不静定応力を初期荷重した場合と省略した場合の解析結果の比較については、部材の曲げ終局耐力に対する不静定応力の比が小さい場合、架構の終局状態を想定することから初期値として弾性応力或いは等価剛性から推定した等価な不静定応力を与えたとしても建物全体の変形挙動および保有水平耐力等の構造性能に与える影響は小さく、僅かに部材の塑性率と降伏ヒンジの発生順序に影響を与える程度であることが報告²⁾されている。

このため、各部材に十分な変形性能が付与されている場合は、部材の曲げ終局耐力に対する不静定応力の比率にもよるが、不静定応力を無視したとしても建物の変形挙動および保有水平耐力等の構造性能に与える影響は小さいと云える。

2.4 等価な初期不静定応力

解析モデルから見た初期値として与える等価な不静定応力は、概ね次ぎの通りとなる。

a) 各部材に降伏ヒンジが発生しない変形レベル或いは降伏ヒンジの発生を許さないような設計においては、弾性の不静定応力をそのまま初期値として載荷するのが望ましい。

b) 架構の完全な終局状態を考慮する設計においては、初期値として載荷する等価な不静定応力は概ね弾性の不静定応力に各部材の降伏剛性低下率を乗じて推定することができる。

c) 部材の終局耐力に対する不静定応力の比率が小さい場合、架構の終局時において不静定応力が架構の構造性能に与える影響は小さい。

例えば、架構の終局状態において、部材の降伏曲げ耐力に対する不静定応力の割合が30%程度と仮定すると、部材降伏時における不静定応力の残存量 M_{2c} は、一般的PC部材の降伏剛性低下率($\alpha_y=0.3$ 程度)を仮定すると次式の通りとなる。

$$M_{2c} \approx \mu \cdot \alpha_y \cdot M_y = 0.3 \times 0.3 M_y = 0.09 M_y$$

これは、不静定応力の値が当該部材の終局耐力の30%程度であれば、その部材が終局状態に至った時点における等価な不静定応力は終局耐力の概ね10%以下となり、部材に十分なじん性が確保されていれば、不静定応力を無視しても架構の終局状態における構造性能に与える影響が小さいことを意味する。

3. まとめ

架構の終局状態における不静定応力の挙動を推定するために既報では、簡単な架構モデルを計画して弾性の不静定応力を初期応力として載荷したケースと省略ケースについて、非線形漸増載荷解析による検討を行ってきた。また、部材の非線形性状を表す復元力特性モデルから部材の回転変形の進行に伴う等価な不静定応力の推定を試みた。

これらの検討結果から架構の終局状態における不静定応力の挙動について、次の事柄をまとめることができた。

a) 架構構成する各部材に十分な変形能力が付与されている場合、初期値としての不静定応力を考慮の有無が架構全体の変形性状および保有耐力に与える影響は小さい。

b) 架構の終局時における構造性能を確認するための非線形漸増載荷解析に際して等価な不静定応力を初期値として与える場合、概ね弾性の不静定応力に各部材の降伏剛性低下率を乗じた応力とすることができる。

c) 部材の終局耐力に対する不静定応力の比率が30%を下回る場合、不静定応力が架構の構造性能に与える影響は小さく、概ね省略することができる。

参考文献

[1] 建設省建築研究所,(社)建築業協会,(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会,(社)日本建設業経営協会,(社)日本建築構造技術者協会,住宅・都市整備公団,(財)日本建築センター,"PC共同研究「PC構造設計・施工指針作成」",January 1996~December 1998.

[2] 戸淵,大野,森高,林,"架構の終局状態における不静定応力の挙動",プレストレストコンクリート技術協会 第8回シンポジウム(1998年10月).