

V-1 初期不整を有するRCフレーム構造の耐荷挙動に関する研究

北海道大学 正員 堺 孝司
 北海道 工藤 高宏
 北海道大学 正員 角田 与史雄
 北海道大学 正員 能町 純雄

1. まえがき

構造物の設計の目的は、考えられ得るあらゆる荷重状態に対して、構造物を構成している部材に十分な強度を持たせることである。そのためには、その構造物の系としての構造解析を行って、各構成部材の断面力を算定しなければならない。鉄筋コンクリート(RC)構造物の構造解析の方法は、大きく、弾性理論に基づく線形解析と幾何学的非線形性および材料非線形性あるいはそのどちらか一方を考慮した非線形解析とに分類することができよう。

線形解析の結果に基づいてRC曲げ部材を設計する場合の問題の一つは、柱部材を含む構造について起こる。構造系の断面力分布がたわみによって影響されない場合、剛性変化のない弾性線形解析による断面力と終局状態におけるそれとを対応させることはできるが、たわみと外力とによって付加的な断面力を惹起し、その結果として、断面の剛性、したがって断面力が逐次変化するような構造系においてはもはや弾性理論による線形解析はその意味をなさない。この付加的な効果は、一般に、二次効果と称されており、この問題の検討は重要である。この問題の対処の方法として、(1) 断面力に対するたわみの影響を剛性変化とともに考慮する方法、(2) 適当に選定された一定剛性を用いて二次弾性解析を行う方法、そして、(3) 解析は弾性理論による線形解析を行い、二次効果に関しては、別途近似的に考える方法、の3つが考えられる。

以上のようなことを背景に本研究では、初期不整を有する単純な門形フレーム構造を利用し、幾何学的非線形性および材料非線形性を考慮した非線形解析を行う。初期不整のある場合、クリープの影響を無視することができないので、ここでは、主としてクリープの影響を考慮した解析を行う。また、二次弾性解析で用いるべき等価剛性についても検討を加える。

2. 解析

a) 解析上の仮定

断面はすべて矩形横断面对称配筋とする。横断面のひずみ状態は平面保持に従う。鉄筋の応力～ひずみ曲線は、引張および圧縮のいずれに対しても同じ完全弾塑性体とする。また、コンクリートの応力～ひずみ曲線は、二次放物線と直線の組み合わせ曲線を仮定する。なお、コンクリートの引張に対する抵抗および収縮の影響は無視する。鉄筋の弾性係数 E_s は 2.06×10^5 MPa を、コンクリートの塑性ひずみおよび終局ひずみは、その強度とは無関係に、それぞれ $\epsilon_{cy} = 0.002$ および $\epsilon_{cu} = 0.0035$ を仮定する。また、コンクリートの圧縮強度および鉄筋の降伏強度は、それぞれ20 MPa および 420 MPa とした。

ある一定時間持続応力を受けるコンクリートのひずみの総量 ϵ_t は、短時ひずみ ϵ_{in} とクリープひずみ ϵ_{cr} との和で表わせるとする。クリープひずみは、Ruschの実験結果をManuelらが数式化した次式を用いる。

$$\epsilon_{cr} = F1(n) (f_c/f_c')^3 + F2(n) (f_c/f_c')^2 + F3(n) (f_c/f_c')$$

$$F1(n) = 0.0009 (0.64 \log_{10} t + 0.4)$$

$$F2(n) = 0.0008 (0.64 \log_{10} t + 0.4)$$

$$F3(n) = 0.0007 (0.64 \log_{10} t + 0.4)$$

ここで、 t は持続載荷日数を表す。

また、この式はコンクリートの載荷時材令が28日、養生は、20℃かつ湿度100%の状態で7日間、それ以後は、20℃かつ湿度50%という条件のもとで導びかれたものである。変動応力下におけるコンクリートのクリープ挙動に関する扱いは、“rate of creep”法による。

b) 解析法

ある荷重レベルまで短時荷重を作用させ、ある期間持続載荷の後、再び短時荷重を作用させる場合を考える。解析法は、短時荷重載荷時の場合は、幾何学的非線形性を考慮するためのはり要素を用いた有限要素法による二次弾性解析と、材料非線形性を考慮するための横断面解析の2つの部分からなる繰り返し計算法であり、その基本的な考えはJakobsenらによって示めされた。持続荷重載荷時の場合は、持続期間をいくつかの期間に区分し、それぞれの時間区分について解析しなければならない。Manuelらは3つの時間区分を考慮すれば十分正確な値が得られることを示した。以下、持続荷重を受ける場合の解析過程について説明する。まず、ある時間増分に対して弾性解析を行い、断面力およびひずみ分布を算定する。次に、これらの各維ひずみが、コンクリートの全ひずみ量が $\epsilon_{in} + \epsilon_{cr}$ であるという仮定を用いて得られるひずみと一致するまで、応力の微調整を行う。次に、この応力分布より断面力を算定し、これを弾性解析による弾面力と比較して、所定の精度に入っていない場合は、新しい剛性を仮定し、上記の過程を繰り返す。この手順を各時間区分ごとに行うのである。持続載荷後の短時載荷の計算では、クリープひずみ総量は、最後まで一定として扱われる。

ラーメン構造物では、初期不整がある場合には、軸力と初期不整によって付加的な断面力が生じる。さらに、クリープを考慮した場合には、クリープひずみによってその付加的な断面力は無視できないものとなるので、本研究では、主に初期不整のある場合について解析する。本研究では初期不整量として、DINの規定より、 $\tan\theta = 1/150$ を用いた。

c) 数値解析

Fig. 1は一定垂直荷重を受けている門形フレームに水平荷重を作用させた場合の水平荷重と荷重作用位置におけるたわみとの関係を示したものであり、構造的初期不整量 $\tan\theta$ を変化させて比較した。 $\tan\theta$ が大きくなると、最大荷重が低下する。また、二次効果を考慮しないと、考慮した場合の最大荷重より約25%も大きな結果となっている。従って、このようなスレンダーな柱を有する構造では、二次効

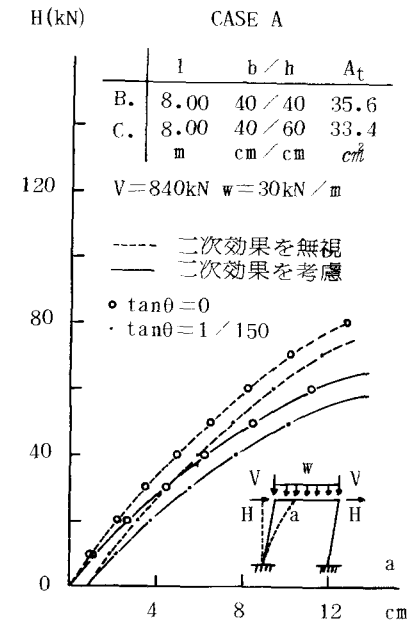


Fig.1 Load-Deflection Curve

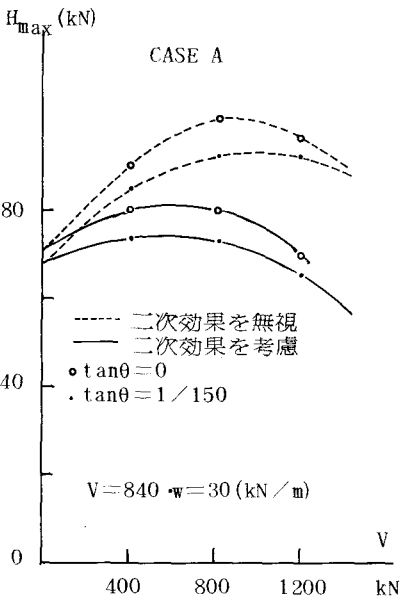


Fig.2 Relationships between H_{max} and V

果を考慮しない最大荷重の予測は危険側になる。

Fig. 2 は最大水平荷重および二次効果に対する垂直荷重の大きさの影響を示す。 図は、最大水平荷重が、垂直荷重の増加と共に増加し、ある所から低下し始めることを示している。 これは、ある軸荷重まではその軸圧縮力の影響による剛性増加が最大水平力を増加させるが、その後は、剛性増加の程度より、軸ひずみの増加が大きく影響するためであると思われる。 また、構造的初期不整を考慮しないと、考慮した場合の最大水平荷重より約 10 % も大きな結果となっている。

Fig. 3 は門形フレームに二次効果を考慮した場合の最大垂直荷重の約 1 / 3 を持続荷重として、作用させた場合の垂直荷重と荷重作用位置におけるたわみとの関係を示したものであり、二次効果を考慮した場合と考慮しない場合も比較した。 二次効果を考慮しないと、考慮した場合の最大荷重より約 15 % も大きくなり、クリープを考慮した場合より約 30 % も大きくなっている。 従ってこのような構造では、クリープを考慮しない最大荷重の予測は危険側となる。 ここで、持続載荷日数は 180日とした。

Fig. 4は二次効果を考慮しない場合と、考慮した場合、そして二次効果とクリープを考慮した場合の 3つのケースについて、同じ垂直荷重時の曲げモーメントを比較したものである。 最大曲げモーメントについても、クリープを考慮した場合が最も小さくなっており、クリープを考慮しないと、危険側の設計となることがわかる。

Fig. 5 は二次効果とクリープの両方を考慮した場合の変位図である。 クリープ期間の変位はかなり大きく、これが耐荷能力を低下させることになる。

CASE B (V=1800 kN)

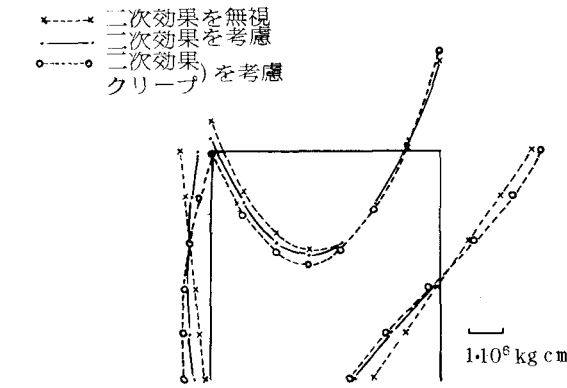


Fig.4 Bending Moment Diagram

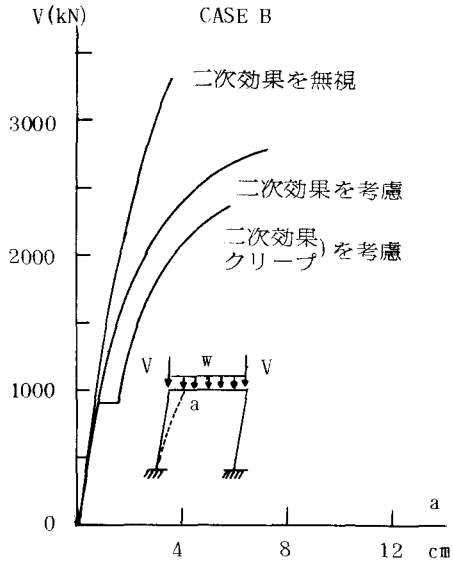


Fig.3 Load - Deflection Curve

CASE B

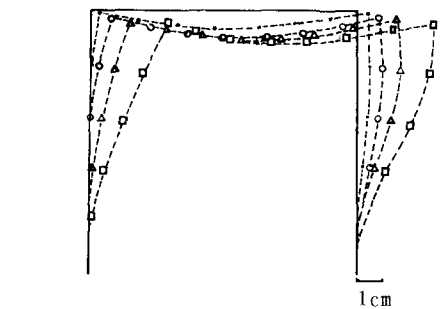
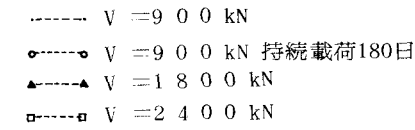


Fig.5 Displacement Diagram

Fig. 6は持続荷重を、二次効果を考慮した場合の最大垂直荷重の約 $1/3$ 、 $1/2$ 、 $2/3$ と変化させた場合の垂直荷重と荷重作用位置におけるたわみとの関係を示したものである。クリープひずみは、Manuel の式からコンクリートの応力の増加と共に増加するので、持続荷重が大きくなると、クリープひずみは増大する。したがって、持続荷重が大きい程、変位は大きくなっている。

Fig. 7は持続荷重を、二次効果を考慮した場合の最大垂直荷重の約 $1/3$ として、その後水平荷重を作用させた場合の、水平荷重と荷重作用位置におけるたわみとの関係を示したものである。水平荷重が0のときのたわみは、持続荷重時のたわみである。二次効果を考慮した場合と考慮しない場合も比較した。二次効果を考慮しないと、考慮した場合の最大荷重より約 30 % も大きな結果となり、二次効果とクリープの両方を考慮した場合の最大荷重より約 60 % も大きな結果となっている。

Fig. 8は持続荷重を同じくし、持続期間を、1年、5年、10年と変化させた場合の、垂直荷重と作用位置におけるたわみとの関係を示したものである。図から、クリープ期間を変えても、最大荷重が変化しないことがわかる。これは、持続荷重が作用した後、短時間でクリープの大半が終了してしまうためであると思われる。

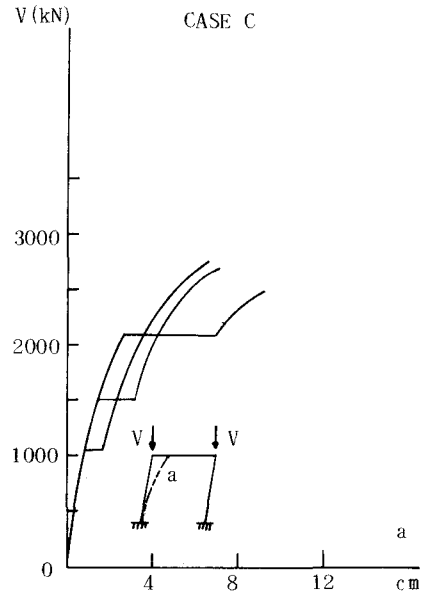


Fig.6 Load - Deflection Curve

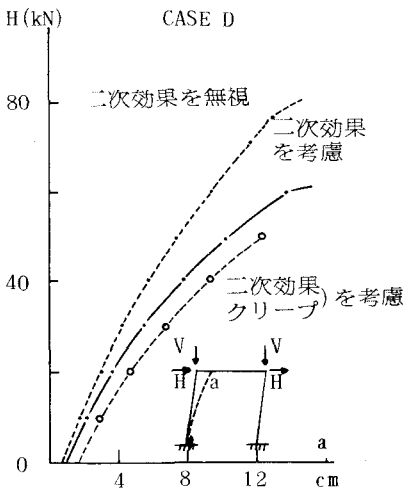


Fig.7 Load - Deflection Curve

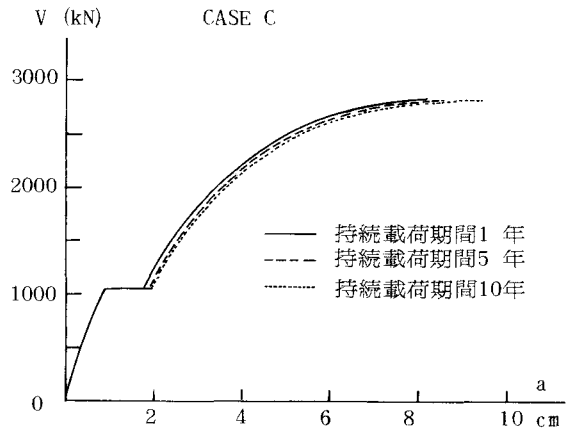


Fig.8 Load - Deflection Curve

ACI 基準の 10.10.1 の解説では、実際のモーメント～曲率関係に基づく正確な剛性値の代わりに、柱に関しては $E_c I_g (0.2 + 1.2 \rho t E_s / E_c)$ を、またはりに関しては、 $0.5 E_c I_g$ を用いてもよいことが記されている。Fig. 9 は、逐次計算による終局時のモーメント分布と、ACI の柱に関する剛性の第2項をその原式 $E_s I_s$ とし、二次効果を考慮した場合と考慮しない場合のモーメント分布の比較の例であるが、二次効果が顕著であり、設計でそれを無視することの影響は大きい。Fig. 10 は、垂直荷重だけの場合であるが、コンクリートの剛性の係数を 0.4 とした方が合理的な設計ができることがわかる。

持続荷重を考慮する場合には、ACI 基準の 10.11.5.2 の解説では、柱に関しては、 $\{ (E_c I_g / 5) + E_s I_s \} / (1 + \beta d)$ を、またはりに関しては $0.5 E_c I_g$ を用いてもよいことが記されている。また MacGregor は柱に関しては $(E_c I_g / 5\alpha) + E_s I_s$ を、またはりに関しては $0.5 E_c I_g$ を用いることを提案している。ここで $\alpha = 1.8 \beta d + 0.75$ 、 βd は設計荷重に対する持続荷重の比である。

Fig. 11、12 は水平荷重でその終局状態となる場合であるが、これらより、ACI の式の場合は、コンクリートの剛性の係数を 0.52、また MacGregor の式の場合は 0.2 とすることで合理的な設計ができることがわかる。

このようにコンクリートの剛性の評価は、荷重条件や境界条件等によって変化することが予想される。

本研究は、文部省科学研究費（昭和58年度奨励研究（A）、No.58750378）によって行なったものである。なお、数値計算には北海道大学大型計算機センターの HITAC M-200H を使用した。

(参考文献)

1. Manuel, R.F. and J.G. MacGregor : Analysis of Restrained Reinforced Concrete Columns under Sustained Load, ACI Journal, pp. 12 ~ 23, January 1967.
2. Aas-Jakobsen, K. and M. Grenacher : Analysis of Slender Reinforced Concrete Frames, Bericht Nr.50, Institut für Baustatik ETH Zurich, p.17, Mart 1974.

CASE A ($H=58.2\text{kN}$)

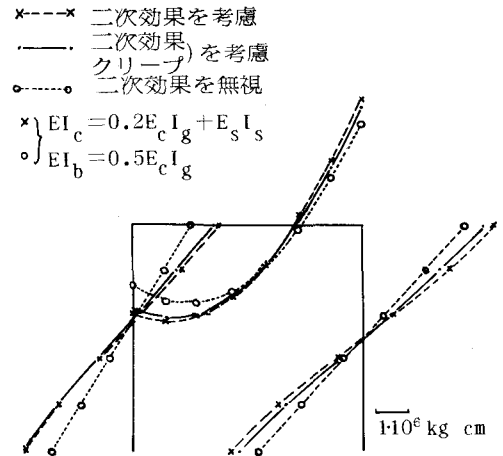


Fig.9 Bending Moment Diagram

CASE B ($V=2800\text{kN}$)

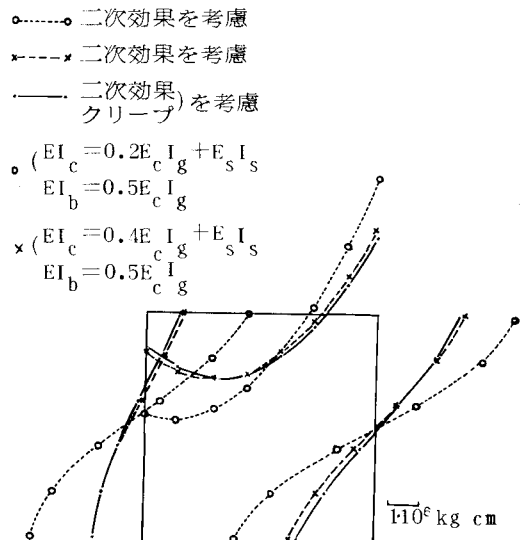


Fig.10 Bending Moment Diagram

3. 堺・角田・能町：鉄筋コンクリート長柱
の設計に関する研究、土木学会第38回
年次学術講演会講演概要集、第5部、V-47.

4. 田村・堺：鉄筋コンクリートフレーム構造
における二次効果と等価剛性、土木学会
第38回年次学術講演会講演概要集、第5部、
V-22.

CASE D ($V=1050\text{kN}$ $H=50\text{kN}$)

- 二次効果を考慮
- x.....x 二次効果を無視
- o.....o 二次効果(クリープ)を考慮

$$\begin{aligned} EI_c &= 0.2E_c I_g + E_s I_s \\ EI_b &= 0.5E_c I_g \end{aligned}$$

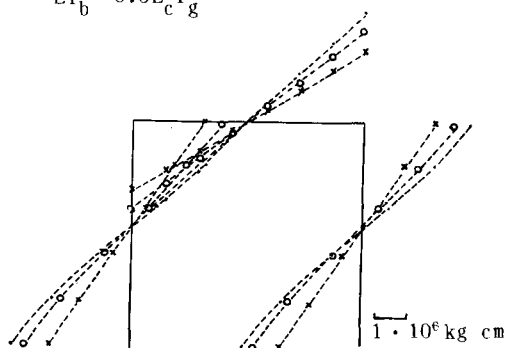


Fig.11 Bending Moment Diagram

CASE D ($V=1050\text{kN}$ $H=50\text{kN}$)

- o.....o 二次効果(クリープ)を考慮
- 二次効果を考慮

$$\begin{aligned} EI_c &= 0.52E_c I_g + E_s I_s \\ EI_b &= 0.5E_c I_g \end{aligned}$$

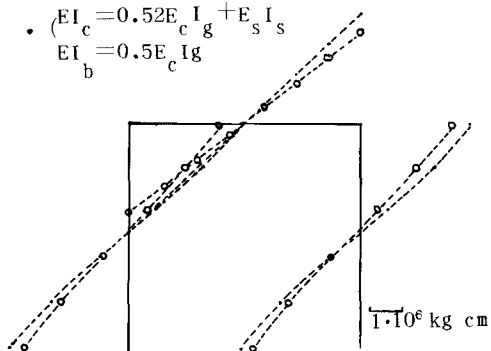


Fig.12 Bending Moment Diagram