

V—8 鉄筋コンクリート長柱の変形と耐荷能力に関する研究

北海道大学 正員 堺 孝 司

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 柱部材は、軸方向圧縮だけでなく、構造系全体の性質、柱の拘束程度、載荷状態、あるいは施工上生じる寸法誤差などによって曲げモーメントを受けていると見なすのが一般的である。軸力が作用している部材に曲げによるたわみが生じると、そのたわみと軸力によって二次モーメントが生じるが、このモーメントによって更にたわみが生じ付加的なモーメントが増加する。結局、力学的な不安定状態に至るまでは、最終的には一つの安定状態を形成するのである。このように、柱部材の耐荷能力に対してたわみの影響を無視できない柱を長柱と称し、設計での扱いは当然、軸方向圧縮力のみを受けると見なす短柱とは異なる。

鉄筋コンクリート(RC)長柱を設計するためには、上述の二次モーメントの影響をいかに評価するかが重要な問題となるが、現在、世界各国の基準におけるRC長柱の設計に対する基本的な考え方は、大きく三つに分類することができよう。その一つは、DIN1045、あるいはCEB-FIP Model Codeに見られるように、二次偏心量に相当する値を与えて付加モーメント量を評価しようとする方法である。BSIのCP110の方法も本質的にはこれらと同じであると言える。第二の方法は、Moment Magnification Method と呼ばれている ACIの方法である。これは、最大端モーメントに、一定剛性を有する部材の弾性たわみから導びかれた係数を乗じ、増幅されたモーメントを設計モーメントとして用いようというものである。他の一つは、ACI Building Code の Commentary でもう一つの方法として付記されており、また現在日本で用いられている土木学会のコンクリート標準示方書で規定されている耐力の低減係数による方法である。この方法は、長柱の断面強度が細長の影響によって見かけ上低下するとして設計する方法であり、低減係数に関する式を細長比の関数として与えている。

上述した各設計法はRC長柱の近似設計法であり、それらの規定のほとんどは、種々の影響を考慮した合理的な構造解析に基づく一般的な設計法を第一に挙げていることは言うまでもない。しかしながら、材料の非線形性や幾何学的非線形性を考慮した構造解析は非常に複雑で衆目一致する有効な方法が確立されていないため、各規定において、構造解析で考慮すべき条件は挙げているものの、具体的な解析手法を挙げているものはほとんどない。

RC長柱を設計する場合、種々の複雑な特性を考慮した構造解析によるのが最良ではあるが、そのような解析結果に基づく単純化が可能であれば非常に便利である。このようなことから、本研究では、材料非線形性および幾何学的非線形性を考慮した解析法によりRC長柱の変形耐荷能力特性を調べると共に、それらの結果に基づく二次モーメントの形式化の可能性を探る。

2. 解析法および数値計算例 解析法は、大部分、Jakobsen(1)の方法を踏襲した。以下、その概要について述べる。解析は、有限要素法による二次弾性解析で幾何学的非線形性を、また、横断面解析で材料非線形性が考慮される。部材要素に関する力と変位の関係を用いると、部材全体に関する力と変位の関係は、良く知られているように次式で表わせる：

$$[K]\{w\} = \{P\} \quad (1) \quad [K] = [K_1] + [K_2] \quad (2)$$

ここで、 $\{w\}$ は全節点変位であり、 $\{P\}$ は全節点荷重である。式(2)の $[K_2]$ は、幾何学的非線形剛性マトリックスと呼ばれているもので、この中には軸力 N が入っている。式(1)は、各要素の剛性 EI 、 EA および N がわかれば変形 $\{w\}$ について解くことができ、その結果、各断面力およびそれに相当する全横断面のひずみ分布を求めることができる。ただし、剛性マトリックス中の軸力は、式(1)を解いて得られる断面軸力と一致するように決めてやらなければならない。このようにして得られた各断面における力およびひずみ分布は、当然、コンクリートと鉄筋の材料の性質に基づく断面力とひずみ分布に一致して

さて、解析は、本質的には外荷重に対し弾性解析と横断面解析による断面力とひずみ分布状態が同じとなるような変形を求めることであるが、実際の計算では収束性の問題で若干の工夫が必要である。終局荷重あるいは不安定状態に近づくとき外荷重を直接与える方法は収束が悪く、實際上計算不可能となる。そこで、ある荷重レベルに到達すると、それ以降の計算は最大曲率点の曲率を制御する方法を

3. 二次モーメントの評価

Figure 1 is a graph showing the load p (ton) versus deflection δ (cm) for a rectangular plate under two loading conditions: curvature control and load control. The y-axis ranges from 0 to 25 ton, and the x-axis ranges from 0 to 8 cm. The 'curvature control' curve (solid line with open circles) shows a higher load capacity than the 'load control' curve (dashed line with solid circles). Both curves show a peak load followed by a drop. The load control curve drops sharply after its peak, while the curvature control curve drops more gradually. The graph also includes a diagram of the rectangular plate with dimensions: width 25 cm, height 15 cm, and a central rectangular hole with width 3.14 cm and height 2.7 cm. The plate is supported at four points, with a vertical displacement δ indicated at the center. The load p is applied at the center. The plate is labeled with dimensions 43.3 cm and 3.75 cm.

Curvature control

load control

$f_s = 4610 \text{ kg/cm}^2$

$f_c = 257 \text{ kg/cm}^2$

3.75

3.14 cm²

2.7

2.7

25

15

43.3 cm

δ

p

p

δ (cm)

-412-

示したものである。タイプAの柱は、点Cでコンクリートが圧壊する場合である。すなわち、断面の材料強度で柱の破壊が決まる場合である。このような場合、破壊時におけるモーメントは、作用軸力の偏心によるモーメント Pe と二次モーメント Pe_2 との和である。これは、最終的に e_2 なる付加的なたわみがRC柱に生じたときに、コンクリートが圧壊することを意味する。タイプBは、点Dで不安定状態となる場合である。この場合にも、最終的には、点Fで材料破壊するが、タイプAと決定的に違うのは、最大耐力と最終耐力とが異なることである。タイプBのような場合、挙動そのものが不安定現象となるのであるから、そのような挙動に合致した設計法によるのが良いことは言うまでもない。しかしながら、軸方向はもちろんのこと荷重レベルごとに変化する剛性をどのように評価するかという非常に扱いにくい問題がある。そして、何よりも、RC部材は終局限界状態に対する断面耐力の算定によって断面設計を行うのが一般的であるということを考えれば、これを弾性的な不安定問題として扱うのは議論のあるところである。そこで、このような場合に対しても、ここでは、タイプAと同様な扱いをすることにした。すなわち、二次モーメントを評価するために、最大耐力を保持したままコンクリートの圧壊が生じるようなひずみ分布を有する仮想上の点Eを、このような場合の終局状態として扱うこととした。二次モーメントを評価する方法として、上述の方法の外に、図.5の最終荷重点Fをそのまま用いる考え方もあると思われるが、場合によっては最大耐力をかなり低く見積る可能性があるもので、その扱いには注意を要する。さて、ここで述べる方法による最終的な付加たわみは、 $e_2 = M_{nomi} / P_{max} - e$ と評価される。

種々の影響因子を考慮した数値解析から、上述のように定義した付加的な偏心量についての形式化の可能性を探るために数値実験を行なった。考慮した変数は、 $\beta = 1 / h = 10, 25, 40$ $\gamma = (d - d') / h = 0.7, 0.8, 0.9$ $\delta = e / h = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ $\rho_t = 0.008, 0.034, 0.06$ のほぼすべての組み合わせである。この外に、必要に応じて適当な組み合わせを増加した。柱の両端はヒンジとした。実際の柱の両端は様々な拘束状態となっているであろうが、それらをすべての場合について考えることは事実上不可能であることと、最も基本的な境界条件である両端ヒンジに関する情報が得られれば、例えば有効長のような考え方を導入することによって他の拘束条件に対しても適用できることなどにより、すべてこの境界条件とした。またコンクリートの圧縮強度は 300 kg/cm^2 、鉄筋の降伏応力度は 3500 kg/cm^2 、鉄筋の弾性係数は 2.1×10^6 、コンクリートの所与ひずみはそれぞれ $e_{cy} = 0.002$ 、 $e_{cu} = 0.0035$ であるとした。

図.6は、数値実験より得られた付加偏心量の一部を、 $1/h$ を横軸にプロットしたものである。同図には、CEB-FIP、CP110、DIN1045 による結果をも示した。CEB-FIP式は、 $1/h$ と γ の関数、そしてCP110式は $1/h$ のみの関数となっている。一方、DIN1045の式は、その適用範囲が $1/h$ で約20までとなっていると共に、 δ が0.3以下に対しては細長比と δ の関数式を、それ以上2.5以下に対しては δ に無関係な細長比のみの関数式を与えている。このように、最も影響のあると思われる $1/h$ 以外の影響因子のとり方は、各基準で全く異なっている。しかしながら、これ

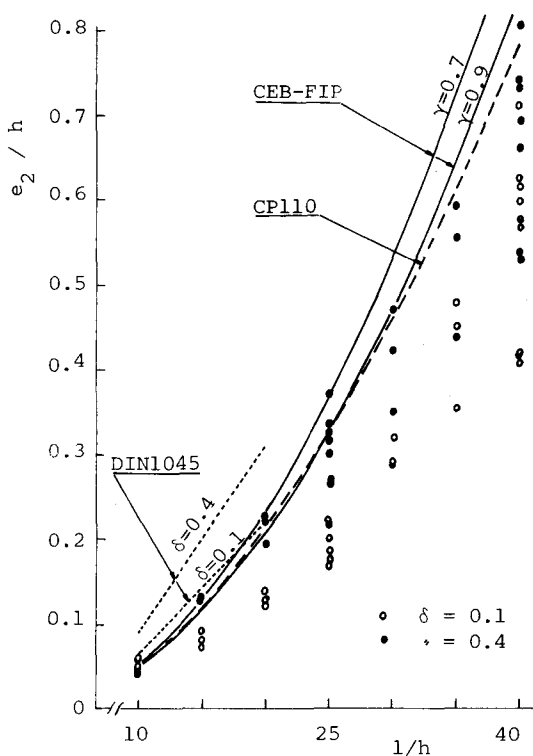


Fig.6 Second Order Eccentricities by Numerical Tests

らの基準による付加偏心は、数値計算結果をほぼ安全側に押えていると言えよう。図.6から、少なくとも δ の影響を顕著に見ることができる。次に、その他の影響因子 ρ_t 、 γ をも含めて、もう少し詳しく検討する。

図.7は、 $1/h$ の影響を δ をパラメータにして描いたものである。図中の黒印は最大耐力がつり合い軸力より大きい場合であり、白印はそれ以下の場合を示している。軸力支配の場合は $1/h$ に対して曲線的な変化を、また曲げ支配の場合はほぼ直線的な変化を示している。図.8は、 γ の影響を見たものであるが、何れも γ の増加と共にほぼ直線的に減少している。図.9

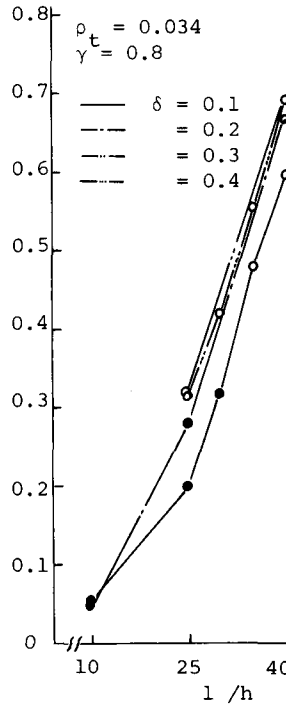


Fig.7 Effects of $1/h$ on e_2/h

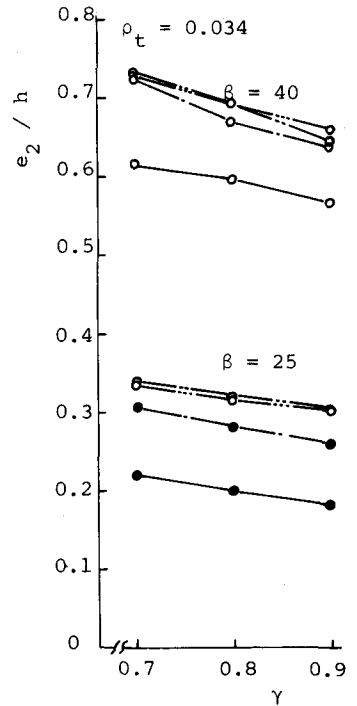


Fig.8 Effects of γ on e_2/h

は e/h に対する影響であるが、軸力支配の場合はほぼ単調増加傾向である。ところが、曲げ支配の場合には、 e/h のある値以上ではほぼ一定となることがわかる。しかも、それが鉄筋比の大きさに依存しているようである。図.10は鉄筋比の影響であるが、これらは、軸力支配か曲げ支配かによって全く異なった傾向を示している。以上の結果、各種変数の影響を考慮した付加偏心量の形式化を行なうとすれば、少なくとも軸力支配のタイプと曲げ支配のタイプに分ける必要があると言えよう。更に、今回は検討の範囲外としたコンクリートの圧縮強度および鉄筋の降伏応力度の影響も重要な問題として残る。今後、より広汎な影響因子の分析を進め、付加偏心量の形式化を行なうつもりである。なお、本研究は、昭和

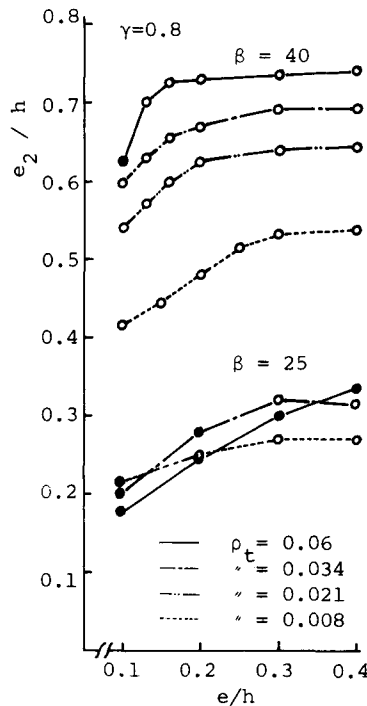


Fig.9 Effects of e/h on e_2/h

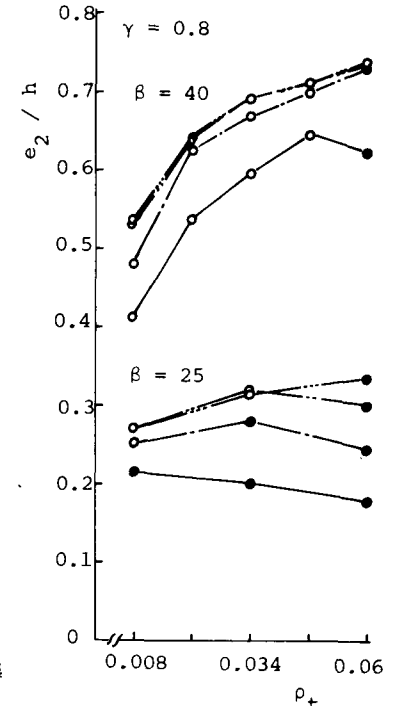


Fig.10 Effects of ρ_t on e_2/h

56年度文部省科学研究費によって行なったものである。また、数値計算は北海道大学大型計算機センターのHITAC M 200Hを用いた。

(参考文献) (1) Jakobsen、März 1974、Bericht Nr.50、Institut für Baustatik ETH Zürich
(2) ACI Building Code (3) CP110 (4) CEB- FIP Model Code (5) DIN1045、その他