

[2076] 形状非線形性を有するコンクリート構造物の耐震設計

正会員○早川 淳一（東京都立大学大学院）

正会員 山崎 淳（東京都立大学工学部）

1. 目的

本研究の目的は構造物のP-δ効果のうち、幾何非線形性の影響が地震応答に及ぼす影響を研究することである。その方法として、幾何非線形性を顕著に示す構造物の一例として軟弱地盤中、または水中の杭基礎構造物を想定し、マトリックス構造解析により荷重-変位関係を求め、それを理想化して地震応答解析を行い、幾何非線形性による荷重-変位関係の特性と構造物の地震応答との関係を見いだそうとする。それにより、耐震設計における設計荷重の定め方の論拠を得ようとするものである。

2. 対象構造物

形状非線形性を有する構造物の一般的な動特性を把握するために、構造物自体の挙動を解析対象とした。地盤と構造物の連成作用については考慮しない。幾何非線形性のみの影響の評価を行うために、図1のような3種類の構造物を対象とした。通常の構造物としては、モデルCのようなラーメン形式、または多柱に支えられるラーメンが主な対象と考えられるが、その構成構造要素単独の挙動をも調べるために、単一柱の境界条件の異なるモデルA、Bの構造物についても解析を行った。モデルAはラーメンの柱のモーメント反曲点と固定端の間の部分であり、モデルBは部材の上端の回転を拘束し、柱の全長を想定したものである。モデル名の添え字が1の荷重条件は、最終鉛直荷重をオイラーの理論座屈荷重としたケースであり、モデル名の添え字が2の荷重条件は、最終鉛直荷重を理論座屈荷重の1/2としたケースを表す。各モデルの諸量については、表1に示す通りである。図2に杭の部材断面を示す。プレストレスのレベルがC種程度、つまり有効プレストレスは80-100kg/cm²、またコンクリートの圧縮強度は、プレキャスト杭に通常用いられる800kg/cm²程度を想定している。

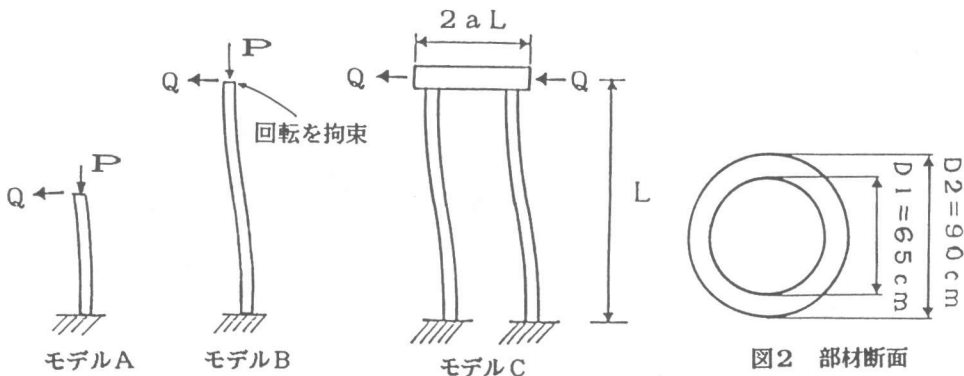


図1 対象構造物

表 1 解析モデルの諸量

構造物	断面2次モーメント (cm ⁴)	断面積 (cm ²)	弾性係数 (kg/cm ²)	柱の高さ (m)	梁の長さ (m)	梁の弾性係数(kg/cm ²)	境界条件
A	2340000	3043	140000	18	-	-	下端固定
B	2340000	3043	140000	36	-	-	下端固定, 最上端の回転を拘束
C	2340000	3043	140000	36	9	14000000	下端固定

3. 静的構造解析

形状非線形の取り扱い、既報 [1] のように、構造物が変形した時の各要素の部材角を座標変換マトリックスに取り込み、通常のマトリックス構造解析の荷重増分法によった。本報告では、杭の材料非線形性の影響がない、荷重-変位関係の幾何非線形性の影響のみを確認することが目的であるので、材料非線形性を意図的に除外するため初期弾性係数を用い、ひびわれ、鋼材の降伏による剛性の変化は考慮していない。

モデルCのラーメン構造物に横荷重が作用すると、ラーメンの構造特性により杭には横荷重の4倍の軸力が発生する。モデルA, Bの解析ではこの軸力を考慮するために、漸増する軸方向荷重をも与えている。要素数及び荷重条件については表2に示す通りである。ここで、最終横荷重は上部構造物重量の0.2倍、すなわち、ベースシャー係数が0.2を想定した。

4. 解析結果

各ケースにおける荷重-変位関係を図3-1~図4-2に示す。図3-1の軸力がオイラーの理論座屈荷重に近い状態では、変位の計算値には実用上の意味がないが、座屈荷重の90%程度までは、計算値は理論値とほぼ一致している。

表 2 要素数及び荷重条件

構造物	要素数	荷重点	死荷重	横荷重増分	鉛直荷重増分
A 1	5	最上端	138	2	8
A 2	"	"	69	2	8
B 1	10	最上端	138	2	8
B 2	"	"	69	2	8
C 1	柱-7	最上端	各69	3	-
C 2	梁-1	の1点	各34.5	3	-

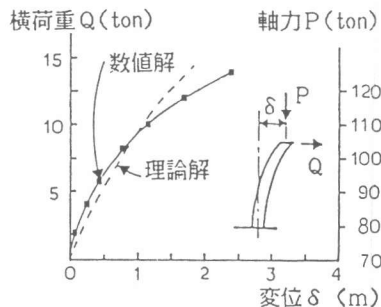
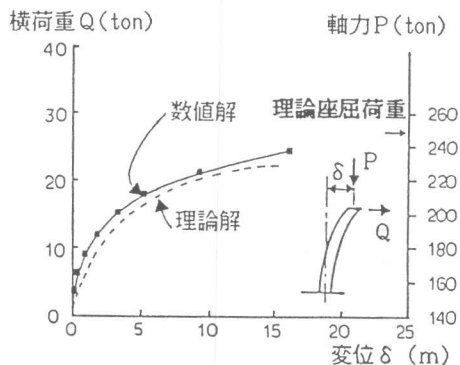


図3-1 幾何非線形解析結果と理論解 (A1) 図3-2 幾何非線形解析結果と理論解 (A2)

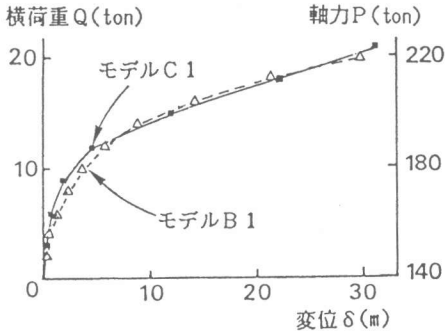


図4-1 幾何非線形解析結果 (B1, C1)

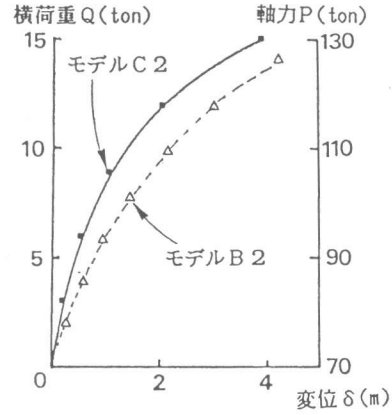


図4-2 幾何非線形解析結果 (B2, C2)

5. 入力地震波

入力地震波は波形の特徴と構造物の地震応答の関連を見いだす目的で、メキシコ地震波、エルセントロ地震波、及び比較のため正弦波の3種を選定した。図5、6に示したメキシコ地震波、エルセントロ地震波の着目点の周期は既報 [1] の実験結果との対照を行うため、そこで用いた供試体の想定上部構造重量29.2(ton)による固有周期0.94秒に合わせた。また、供試体との相似則の関係で最大加速度を1/10となるように20.0(gal)に時間軸と加速度軸を修正した。

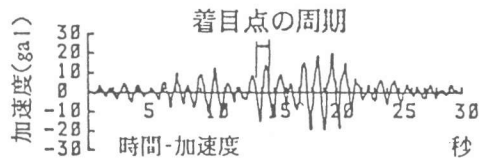


図5 メキシコ地震波

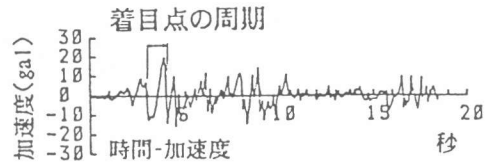


図6 エルセントロ地震波

6. 応答解析に用いる3種類の構造特性と荷重-変位関係の理想化

幾何非線形ならびに比較のため、弾塑性、及びそれと等価と考えられる減衰を有する線形の3種の構造物を対象とした。幾何非線形は荷重-変位関係の代表例として図7のような2次のパラボラによる理想化を行った[1]。接線剛性は原点における値から最大荷重点におけるゼロ値まで変化する。また、材料非線形は完全弾塑性とし、ダクティリティーは土木学会コンクリート示方書の耐震規定を考慮して、 $\mu=2.0$ とした。第3の構造物である弾塑性と等価の減衰を有する線形への変換は、図7のような通常の方法によった。既報 [2] の方法により、減衰定数は(1)式より、 $h=0.093$ となる。

$$h = 1/\pi (1 - 1/\sqrt{\mu}) \cdots (1) \quad \text{ここで、} \mu = 2$$

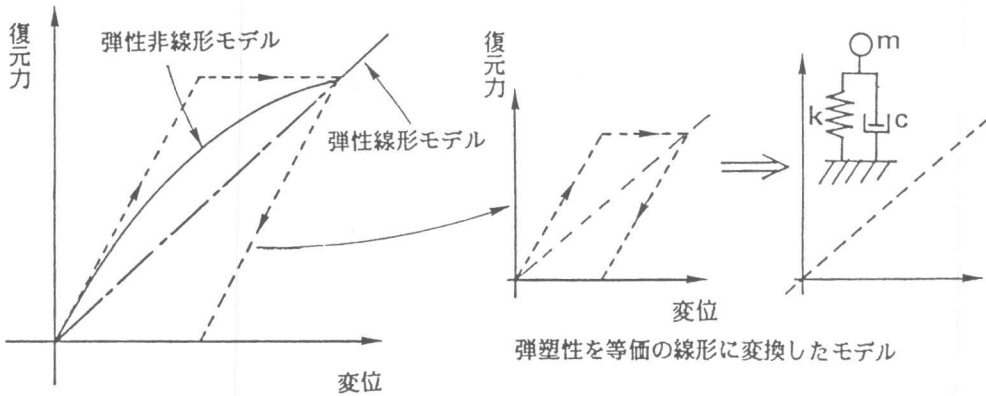


図7 荷重-変位関係の理想化

7. 地震応答解析

構造物の固有周期と入力波の着目点の周期との比率を種々に変化させ、ベースシャー係数の応答倍率を求めた。幾何非線形構造の接線剛性は変位により変化するので、固有周期は原点での接線剛性による値を用いて便宜的に表すこととした。幾何非線形構造の応答解析は図7の荷重-変位関係の頂点の値を種々に変化させ、最大応答復元力が仮定した構造物の復元力-変位関係の頂点になるべく近くなる結果を試行錯誤により求めた。

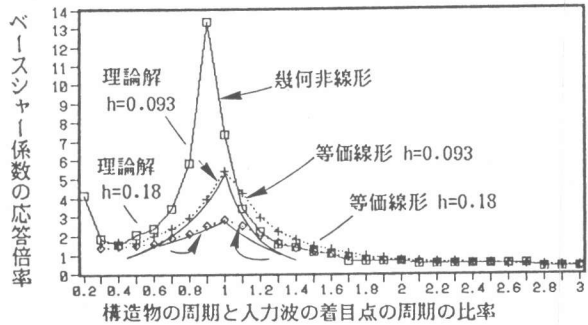


図8 正弦波に対する幾何非線形と等価線形の比較

8. 幾何非線形性を等価の線形に置き換える試み

幾何非線形性を近似する方法として、正弦波に対して幾何非線形構造を減衰を有する等価の線形構造に置換するために減衰定数を種々に変化させた応答解析の結果、減衰定数 $h=0.0366$ の時に最大応答倍率が一致した。この $h=0.0366$ は(1)式によれば、ダクティリティー $\mu=1.28$ に相当する。さらに応答スペクトル図(図9)をみると、幾何非線形構造の方が等価線形構造に比べ全体的に固有周期の比率で約0.1ほど左にシフトしていることが示されている。

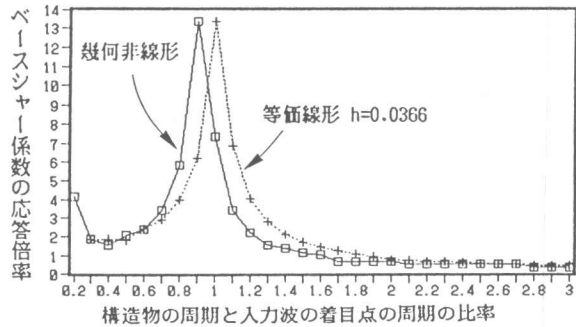


図9 正弦波に対する幾何非線形を減衰定数 $h=0.0366$ とした等価線形に置換した場合の比較

9. 応答解析結果

正弦波に対する幾何非線形、及び弾塑性構造物のベースシャー係数の応答スペクトルを図8、9に示す。角速度 Ω の正弦波に対する応答倍率の理論解は(2)式となり、図8に減衰定数が0.093と0.18の線形構造物の理論解をも示した。図9は幾何非線形構造の最大応答倍率と減衰を有する等価線形構造の最大応答倍率を一致させた時の応答スペクトルである。メキシコ地震波、エルセントロ地震波に対する幾何非線形、弾塑性、および近似法による等価の線形構造物の応答スペクトルを図10、11に示す。

$$\text{応答倍率} = 1 / \{ (1 - \Omega^2 / \omega^2)^2 + 4 \times (h \cdot \Omega / \omega)^2 \} \cdot (2)$$

結果について以下のことが言えよう。

- (1) メキシコ地震波に対する幾何非線形構造の応答倍率をエルセントロ地震波の場合と比較すると1.5倍となる。正弦波の場合と比較すると1/2.35倍となる。
- (2) 幾何非線形構造と減衰定数 $h=0.093$ （土木学会コンクリート示方書の耐震設計推奨値 $\mu=2$ に相当）を有する弾塑性構造の最大応答倍率を比較すると、メキシコ地震波に対し5.7:4.0、エルセントロ地震波に対し3.8:2.3、正弦波に対し13.4:5.4となる。3種類の地震波ともに幾何非線形構造の場合の方が高く、その比はそれぞれ、142%、165%、248%となる。
- (3) 幾何非線形構造と先に求めた減衰定数 $h=0.0366$ として置換した等価の線形構造の応答スペクトルとの関係を見ると、図11のエルセントロ地震波の場合は、危険な周期が2つあり、最大応答倍率で比較すると、近似法による等価線形構造は幾何非線形構造の70%程度であるが、波形はよく似ている。図10のメキシコ地震波の場合は、逆に近似法による等価の線形構造の方が125%程度ほどに応答倍率が高くなるという結果となった。
- (4) 幾何非線形構造の場合、ベースシャー係数の応答倍率を2以下とするためには、メキシコ地震波の場合、構造物の固有周期と入力波の着目点の周期との比率は0.8以下、または1.7以上とすべきであり、エルセントロ地震波の場合は1.4以上とすべきである。

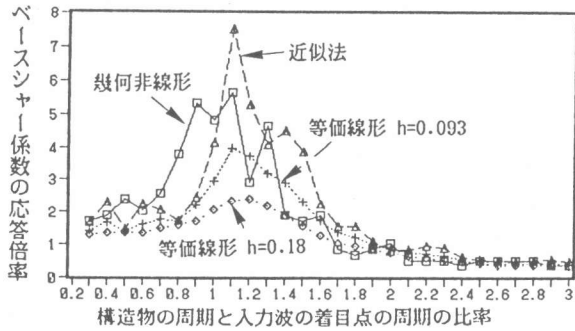


図10 メキシコ地震波に対する幾何非線形と等価線形の比較

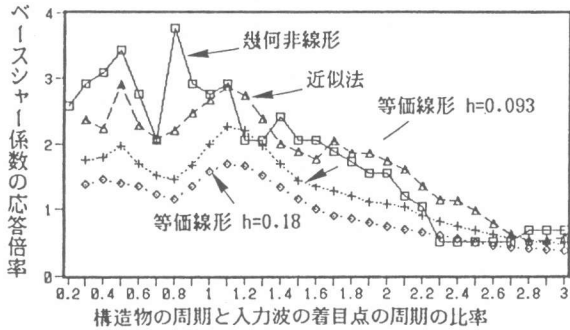


図11 エルセントロ地震波に対する幾何非線形と等価線形の比較

10. 設計荷重との関係

幾何非線形構造を近似法による等価の線形構造とした場合の最大応答倍率は、メキシコ地震波に対して7.5、エルセントロ地震波に対して2.9となる。9節(2)の減衰定数 $h=0.093$ を有する弾塑性構造の最大応答倍率と比較すると、設計荷重をそれぞれ1.88、1.26倍大きくしなければならない。

11. 結論

細長い柱を有する構造物を例として、増分解析により求めた荷重-変位関係の幾何非線形性を2次放物線で近似し、この場合の応答解析をエルセントロ地震波およびメキシコ地震波に対して行った。幾何非線形性を等価の線形に置き換えるとすれば、減衰定数 h を0.0366とし、等価の固有周期としては原点での接線剛性により求めた値の $(1.1)^2$ 倍の値を用いれば、正弦波に対する応答倍率は一致した。エルセントロ地震波については、もっとも危険な周期についても幾何非線形構造に対して70%程度の値となり、メキシコ地震波については、逆に幾何非線形構造に対して132%程度と近似法による等価の線形構造の方が大きくなり、その誤差は30%程度である。土木学会規準の材料非線形におけるダクティリティー $\mu=2.0$ に対し、この幾何非線形を等価の線形に置換した時の減衰定数はダクティリティー $\mu=1.28$ に相当する。この等価のダクティリティーの違いにより、耐震設計荷重としては、メキシコ地震波において1.88倍、エルセントロ地震波において1.26倍となることが示された。

謝辞：この研究は、文部省科学研究No.60302062（研究代表者、岡村甫東大教授）およびNo.61460161により行った。

参考文献

- [1] 早川、山崎：鉄筋コンクリート構造物の長柱効果と地震応答、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、1986、p.p.729-732
- [2] 金子、山本、川田、山崎：鉄筋コンクリート梁の等価剛性と減衰定数の1つの算定方法、第6回コンクリート工学年次講演会論文集、1984、p.p.697-700