

[183] 鉄筋コンクリート構造物の長柱効果と地震応答

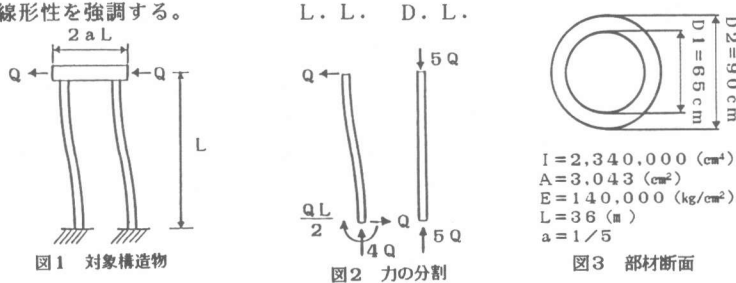
正会員 ○早 川 淳 一 (東京都立大学工学部)
 正会員 山 崎 淳 (東京都立大学工学部)

1. 問題とする挙動

橋梁下部構造のように重量を支える構造には地震等による横荷重を受け横方向変位が発生すると鉛直荷重による付加モーメントが生じる。これが、 $P-\delta$ 効果または長柱効果と称される。その影響は(1)付加モーメントによる着目断面のモーメントの増幅、および、(2)変位の増大による剛性の低下である。設計への反映において(1)の問題は種々検討されてきたが、(2)の問題については実用的方法が示されていない。構造物の剛性の変化は、地震時の挙動を問題とする場合には短柱においても無視できないが、長柱においては主要な影響要因である。

2. 対象構造物

図1のような軟弱地盤で橋脚を支える杭基礎のような構造物が長柱効果のうちの幾何非線形性を顕著に示す一例と考えられる。杭とフーチングがラーメンを形成するので、死荷重時には上部構造により杭の主要な断面力は軸力である。地震荷重が水平力として作用すると、杭にはモーメント、せん断力、水平変位が発生し、上部構造死荷重により付加モーメントが生ずる。更に、水平荷重により杭に発生する軸力が荷重・変位関係の非線形性を強調する。



3. 耐震設計基準

地震応答予測には、(1)構造物に許容すべき状態と(2)想定する地震波形の特性が規定されるべきと思われる。土木学会コンクリート標準示方書の耐震設計基準において、地震時に構造物が許容できる最大変位は、地震加速度の基盤での値が水平震度に換算して0.2程度となる場合については、降伏変位、 (δy) 、の2倍程度、 $(2\delta y)$ 、に制限することが推奨されている。この場合の降伏変位を一つの指標に用いる理由は、第一に降伏による剛性低下による地震の影響の減殺であると思われる。降伏変位を越えて変形させられたコンクリート構造物は、載荷、除荷、および載荷繰返し時に内部損傷を伴い、一方それが振動に対する減衰として地震の影響の減殺に有利に作用することも耐震設計の前提として暗黙に了解されてきた。これに対し上記2項で述べた幾何非線形性の顕著な構造物の挙動はこのような既往の耐震設計理論で検討済の範囲内にはない。

4. 構造物の地震応答における地震波形の特性の意義

上記耐震設計基準においては地震波形の特性の一般化については言及されていない。従来、多くの場合に用いられてきた El Centro の波形は、最大加速度が初期に発生するものである。その場合最大加速度をうける直前の構造物は降伏していないであろうし、最大加速度を受ける前後の載荷繰返し数は5回程度である。従って、この特定の地震に耐える構造物の設計条件はかなり明確に規定できる。これに対し、1985メキシコ地震の波形の一つは図-10のようであり、El Centro 波と対照的な特徴は、加速度振幅が漸増することと、ゼロクロッシング周期がほぼ一定していることである。このような地震を構造物が受けた場合、早期に降伏が起こり、徐々に増大する加速度を受ける状態が予測される。その後半の状態における構造物に対しては、線形の場合の固有周期に対応するような構造物の応答の鋭敏さを表す定説は立てられておらず、構造物の固有の特性から応答特性を推測することを困難にしている。以上の諸点から、地震応答のモデル解析においては、地震波形自体の特徴と、その地震継続中の構造物の力学特性の変化との対応を特定したうえで、応答結果の意味づけを行なうことが必要であると思われる。

5. 本研究の方法

地震応答における幾何非線形性の影響の検討を、2段階で行なった。第一段階では通常の静的マトリックス構造解析法を増分法において繰返し用い、静的な荷重・変位関係を求めた。次に、その荷重・変位関係を理想化し、その特性に対して地震応答解析を行なった。

6. 幾何非線形性の静的解法

6.1 方法..... 荷重増分法により変位増分を逐次求めてゆく。各荷重レベルにおける累積変位で構造物の形状が表現されるものとする。マトリックス構造解析においては、要素剛性マトリックス [k] を要素に固定した局所座標系と全体座標系との角度 θ を変数とする座標変換マトリックス [T] により、(1) 式で全体座標系での要素剛性マトリックス [k'] に変換する。

$$[k'] = [T]^T [k] [T] \dots\dots\dots(1)$$

本手法では、各荷重レベルでの累積変位から各要素の全体座標系における方向角 θ を求め、(1)式によって全体座標系に関する要素剛性を算出し、変形した状態の構造物の剛性を得た。(図-4)

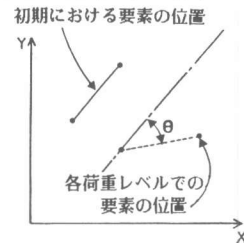


図4 幾何非線形の座標変換角 θ による取り扱い

6.2 計算例..... 図-1の構造物のラーメン脚の下半分を

フリーボディーと考え、漸増する軸力と水平力が先端に加わる片持梁の水平力Qと水平変位 δ 、および、軸力Pの関係を示したものが図5、6である。外径90cm、内径60cm、弾性係数140,000kg/cm²のプレストレストコンクリート杭を想定し、要素分割を5等分で行なった。図-5は(2)式による理論座屈荷重Q=28tonを目標に荷重増分を3tonで8段階によって加えた場合である。今回は荷重増分法であるため座屈後の解は得られない。図-6は、理論座屈荷重の1/2の14tonまで荷重増分を2tonで7段階により載荷した場合である。土木学会コンクリート標準示方書に示される鉄筋コンクリートの設計基準において、使用限界状態に対する設計荷重は理論座屈荷重のほぼ1/2である。プレストレストコンクリート杭に対する規定は与えられていない。

$$\delta = Q l^3 / E I \left((\tan u - u) / u^3 \right) \dots\dots\dots(2)$$

ここで $u = \sqrt{P l^2 / E I}$

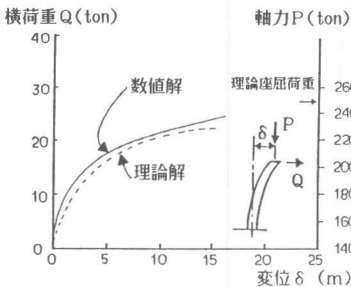


図5 幾何非線形解析結果と理論解 (A)

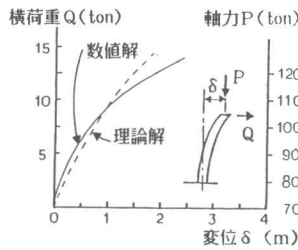


図6 幾何非線形解析結果と理論解 (B)

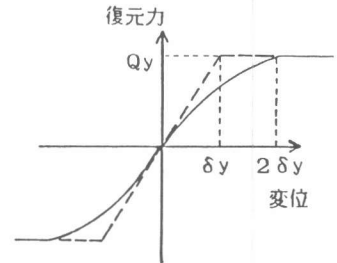


図7 地震応答解析に用いる幾何非線形の理想化

7. 幾何非線形性を有する構造の地震応答解析

7.1 荷重-変位関係の理想化..... 前項までの検討の結果を図-7のような2次のパラボラにより表示した。変位ゼロから変位 $2\delta y$ の範囲で剛性がkからゼロまで連続的に変化するものである。変位ゼロの点での接線と、頂点で引いた水平線との交点の変位が δy になるようにしてある。

7.2 入力地震波..... 図10に示すように1985メキシコ地震の入力波最大振幅時の一つ前のゼロクロッシング周期を0.94秒とし、最大加速度0.22gとなるように修正した。既報¹⁾から一連の研究で用いられている供試体の降伏直前まで固有周期と一致させた。

7.3 構造物特性と入力地震波との関係..... 構造物の荷重・変位関係において一定水平加速度0.22gとなる場合に、復元力が一定値になるように仮定した。また、変位ゼロの点での接線剛性に対応する固有周期を前記の入力波ゼロクロッシング周期の1.0倍と1/1.5倍とした。

7.4 応答解析結果..... 図-8、9に示す。

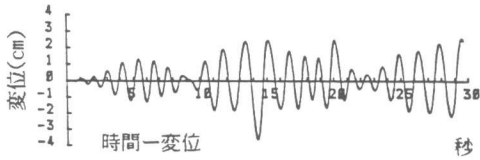


図8 応答解析結果 ($\delta y=0.73$)

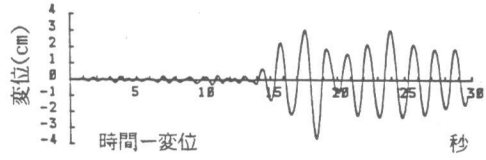


図9 応答解析結果 ($\delta y=0.27$)

8 材料非線形性を有する構造物の地震応答実験

8.1 方法・・・地震応答に及ぼす幾何非線形性と材料非線形性を比較対照するための地震応答実験を行った。載荷方法は静的なPseudo-Dynamic試験¹⁾であり、入力地震波は前項で用いたものと同じである。

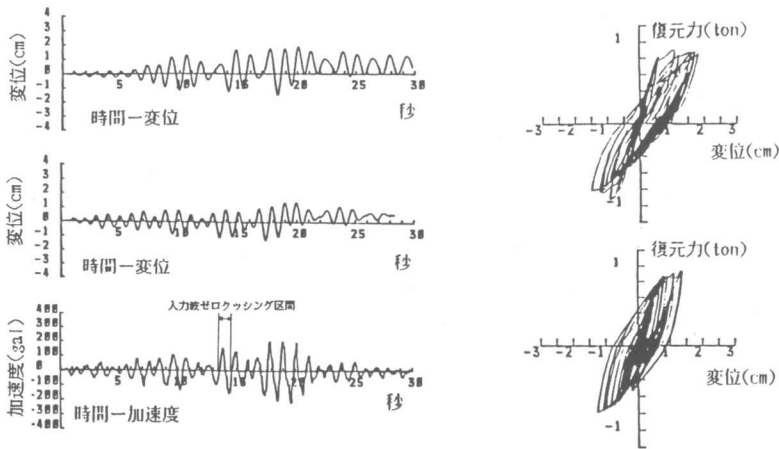


図10 メキシコ地震波に対する材料非線形構造の応答実験結果 ($Z.C.=1.0$)

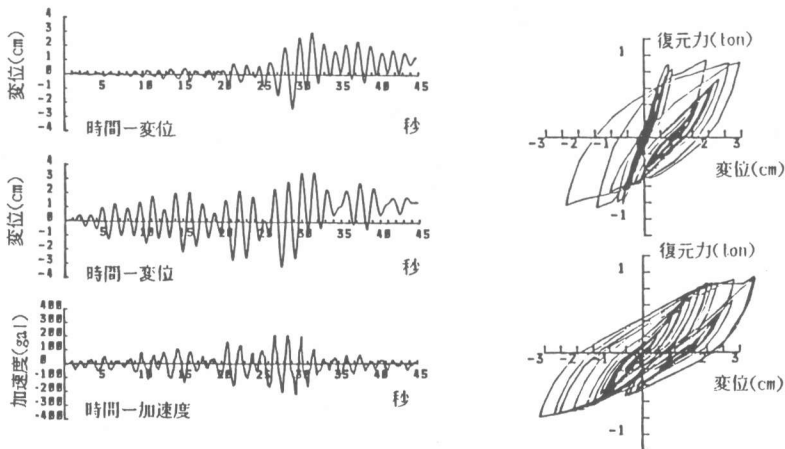


図11 メキシコ地震波に対する材料非線形構造の応答実験結果 ($Z.C.=1.5$)

8.2 構造物特性と入力地震波との関係……前項7.3の解析のための条件と合わせるため、供試体が一定水平加速度0.2gで降伏するようにし、前出の入力波ゼロクロッシング周期を構造物の固有周期0.94秒の1.0倍及び1.5倍とした。従って、この2個の試験は、前項の2個の解析と対をなして比較すべきものである。更に、1個の供試体と同じ地震波を2回加えた。すなわち、一回の地震によって損傷を受けた供試体の特性が特定し難い状態となっている場合の同一地震に対する反応を調べるためである。

8.3 応答実験結果……応答変位-時間関係、ヒステリシスループを図10, 11に、また主要な着目事項を表-1, 2に示した。表には初降伏時、最大変位時、最大変位以前に達した極大変位時のそれぞれに対する入力加速度、ゼロクロッシング周期を記した。

表1 Z.C.=1.0の一回目と二回目

供試体番号: NO. 10
入力地震波: MEXICO

入力地震波のZ.C.=1.0

番号	項目	(1) 初降伏	(2) 最大応答変位時	(3) 最大応答変位の前に 到達した最大変位
一回目	1 時刻 : t(sec)	8.7	18.4	17.6
	2 入力加速度 : \ddot{z} (gal)	105	200	170
	応答変位 : δ (mm)	9	16	18
	$\mu = \delta / \delta_y$	1.4	2.5	2.8
二回目	4 入力波のZ.C.(sec)	0.93	0.93	0.92
	1 時刻 : t(sec)	9.4	29.5	13.5
	2 入力加速度 : \ddot{z} (gal)	110	210	160
	応答変位 : δ (mm)	8.5	12	11
目3	$\mu = \delta / \delta_y$	1.3	1.8	1.7
	4 入力波のZ.C.(sec)	0.96	0.92	0.94

表2 Z.C.=1.5の一回目と二回目

供試体番号: NO. 11
入力地震波: MEXICO

入力地震波のZ.C.=1.5

番号	項目	(1) 初降伏	(2) 最大応答変位時	(3) 最大応答変位の前に 到達した最大変位
一回目	1 時刻 : t(sec)	21.4	29.0	28.2
	2 入力加速度 : \ddot{z} (gal)	160	200	210
	応答変位 : δ (mm)	7	25	19.5
	$\mu = \delta / \delta_y$	1.0	3.6	2.8
二回目	4 入力波のZ.C.(sec)	1.41	1.78	1.56
	1 時刻 : t(sec)	11.2	28.5	27.3
	2 入力加速度 : \ddot{z} (gal)	120	220	200
	応答変位 : δ (mm)	18	30	31.5
目3	$\mu = \delta / \delta_y$	3.0	5.6	5.3
	4 入力波のZ.C.(sec)	1.42	1.78	1.56

9 地震応答に対する幾何非線形性と材料非線形性の影響の類似点と相異点

幾何非線形構造の解析による変位応答倍率は、荷重-変位関係の原点での剛性が前記の入力波ゼロクロッシング周期の1.0倍および1.5倍の時、3.2および3.6となっており、材料非線形構造の比較対象供試体の実験における応答倍率2.5および3.6とほぼ同等となった。

材料非線形構造の応答における幾何非線形構造との顕著な相異点として、固有周期をゼロクロッシング周期の短い側に設計した供試体は、2回目の同一供試体においてより大きな変位を示した。履歴曲線の正負の最大変位点を結ぶ線の傾きが減少し、周期が長めになっていることを示唆している。またループも膨らみのある紡錘型からスリップ型へ変化し、荷重繰返し数の増加とともに減衰効果が減じていることも示唆している。

10 結論

地震応答における有意な影響要因として長柱効果の幾何非線形性と材料非線形性に関する影響因子を特定することを目的として一つの解析システムを示した。用いた手法と得られた知見を要約すると以下のようである。

- (1) 長柱効果のうち幾何非線形性が地震応答に及ぼす影響が顕著な一例を挙げ、マトリックス構造解析の増分法による解法を示した。
- (2) 荷重-変位関係の幾何非線形性が、接線剛性が変位ゼロにおける値から変位 $2\delta_y$ でゼロになるように連続的に変化する場合、材料非線形構造と初期剛性および最大耐力を同一にした場合の変位応答倍率が同等になることが示された。
- (3) El-Centro波と特性が顕著に異なる1985メキシコ地震波による材料非線形構造のPD試験結果を得た。同一の供試体に2回同じ地震を入力した場合、2回目において応答変位がより大きくなる場合があることが示された。

謝辞 本研究は、岡村 甫東大教授を研究代表者とする文部省科学研究・総合A・No. 60302062の一環として行なった。実験に協力して頂いた品川清和君(PC橋梁設計課)に謝意を表す。

参考文献 1. 本橋、尾崎、山崎(1985): 鉄筋コンクリート片持梁の地震応答への入力波形の影響 第7回コンクリート工学協会年次講演会、論文集、p p 449-452。