

論文 RC 部材の P- δ 関係に及ぼす載荷速度の影響

新保 弘^{*1}・村山 八洲雄^{*2}・須田 久美子^{*3}・一宮 利通^{*4}

要旨:橋脚を想定したRC柱部材の動的実験を行い、履歴復元力特性に対する載荷速度の影響を検討した。その結果、載荷速度が大きくなると同一変位に対する荷重の増加が認められるが、その差は最大でも15%程度であり、部材剛性や減衰定数への載荷速度の影響は非常に小さいことがわかった。この結果を、加力点速度、せん断スパンと断面高の関数であるひずみ速度指標を用いて既往の実験と比較し、実構造物での載荷速度の影響について検討したところ、RC柱部材の地震時履歴復元力特性は通常の静的実験で推定しても、大きな誤差は生じないと考えられる。

キーワード:RC橋脚、韌性、載荷速度、ひずみ速度、動的実験

1. はじめに

RC部材の耐力やエネルギー吸収能力の評価は、一般に静的加力実験の結果を基にしている。また、大地震に対する構造物の非線形応答解析も、静的実験による荷重-変位関係を用いて行われている。しかし、動的実験による耐力や荷重-変位関係は静的実験の場合と異なることがあるため、実構造物の地震時挙動も静的実験やこれを基にした解析結果と異なるとの考え方もある。この観点からこれまで研究が行われてきたが、その影響は必ずしも明確でないようである。その理由として、対象部材、模型の縮尺、実験方法などが研究によって異なること、実験の相似則に関する記述が少ないことが挙げられる。

そこで、本研究では橋脚を想定した縮小模型を用いて載荷速度をパラメータとした実験を行い、載荷速度がRC柱部材の履歴復元力特性に与える影響を検討し、実構造物での載荷速度の影響について検討した。

2. 実験の基本的な考え方

2.1 概要

対象部材としては独立1本柱型の橋脚を想定した模型(縮尺1/10~1/5相当)を7体使用し、4体を載荷速度の違いに着目したアクチュエータ加力実験に、2体を柱頭部に重錐を有する振動台実験に、1体を振動台実験との比較用の静的加力実験に供した。

2.2 相似則

振動台実験では、上部工の自重による軸応力度が実物と同じになるような大きさの質量を持つ重錐を用いると、同一加速度に対して同じ応力度が得られるが、模型の縮尺比を γ_L とするとひずみ速度は $(\gamma_L)^{0.5}$ 倍に大きくなる。

アクチュエータ実験の場合は、加力振動数を実物と同じにすることにより、ひずみ速度も同じにすることができる。この場合、加力点速度は縮尺比に比例して γ_L 倍に小さくなる。

2.3 復元力特性

振動台およびアクチュエータによって柱頭部を加力する場合の振動系は、柱部の質量の影響も含めた等価1質点系の振動方程式(複素数表示)で表すと次のようになる。

*1 鹿島技術研究所 第一研究部、研究員、工修、(正会員) *2 鹿島技術研究所 第一研究部、専門部長、工博、(正会員)

*3 鹿島技術研究所 第一研究部、主任研究員、(正会員) *4 鹿島 土木設計本部 第二設計部、工修、(正会員)

ここで、Mは柱頭部に取付けた重錘と柱の等価質量の和、(ż+ẍ)は柱頭部の絶対加速度、Pはアクチュエータの作用力、mは加力治具と柱の等価質量の和、kは試験体の剛性、(c/k×ω+β)は試験体の粘性減衰と履歴減衰を含めた損失係数、xは柱頭部の相対変位である。これより、振動台実験とアクチュエータ実験は両式の左辺に相当する値を測定することで同等に扱うことができる。

2.4 慣性力の補正

本実験の場合、振動台実験で柱頭部に取付けた重錐の重量は試験体の柱部の重量に比べて非常に大きいので、試験体の慣性力の影響は無視できる。アクチュエータ実験では、等価質量を次式に示す方法で求め、慣性力の影響分を補正した。

ここで、 g は重力加速度、 y は柱基部からの高さ方向座標、 $w(y)$ は y における単位長重量、 $x(y)$ は y における変位、 x_0 は加力点変位、 l_0 は柱の加力点の高さである。

ひびわれ発生前(一様剛性)では、加力点より下側の柱部分の等価質量は全質量の $11/40$ であり、柱基部がヒンジ構造のときは $1/3$ であるが、実際はこの中間になる。実験では速度振幅を一定にしたため、加速度(慣性力)は変位振幅が小さいときに大きくなる。そのため、慣性力の補正是一様剛性と考え、加力点から外側もこの方法を援用した。

2.5 地震時最大応答速度

地震波の最大応答速度は減衰定数を5%として、既往の地震記録を基に推算された地震波[1]、や地震波の距離減衰に関する研究[2]などを参考にして、最大応答速度として100～150cm/sを想定した。減衰定数を5%としたのは、降伏変位相当の振幅での等価履歴減衰が5%前後であることを考慮したもので、降伏後や基礎からの逸散減衰も考慮すれば、安全側の評価になっている。多くの場合、最大応答速度は1Hzより小さい固有振動数で発

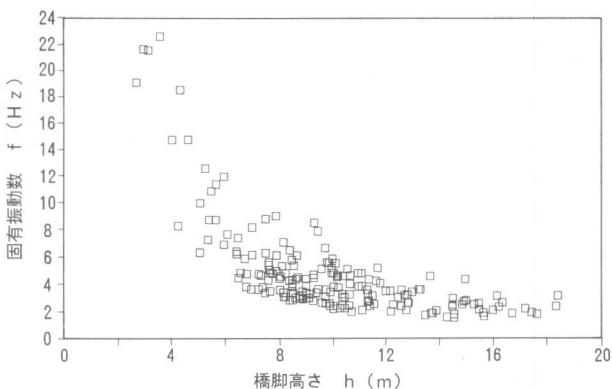


図-1 都市部高架橋の橋脚高さと固有振動数の関係

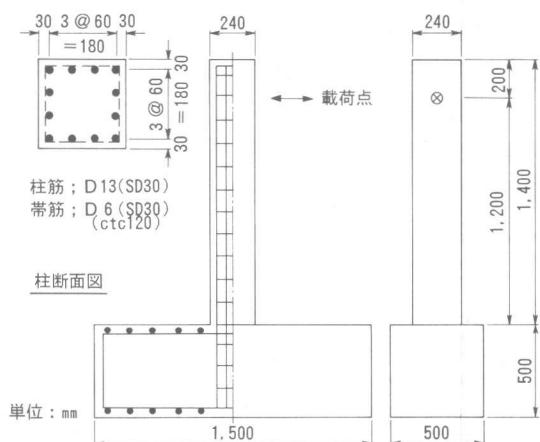


図-2 試験体諸元

生するが、図-1に示すように、ほとんどの都市部高架橋の固有振動数は2Hz以上であり、降伏時の剛性低下や支持地盤による剛性低下を考慮しても1Hzを大きく下回らないと考えられるので、上述の最大応答速度は妥当と考えられる。

3. 実験方法

3.1 試験体諸元

図-2に示すように、試験体はせん断スパン比5.7、柱部の軸方向鉄筋比2.7%、帯筋比0.2%とした。また、コンクリートには最大骨材寸法20mmのレディーミクストコンクリートを使用し、その実験時圧縮強度はNo.1,2,7試験体で 270kgf/cm^2 、No.3,4,5,6試験体で 260kgf/cm^2 であった。鉄筋の降伏点と引張り強さは、軸筋(D13)がそれぞれ $3,670\text{kgf/cm}^2$ 、 $5,470\text{kgf/cm}^2$ 、帯筋(D6)が $3,420\text{kgf/cm}^2$ 、 $5,050\text{kgf/cm}^2$ であった。

3.2 実験配列と載荷速度

実験配列を表-1に示す。振動台実験では、比較的広範囲の卓越振動数成分を有する地震波を選択し、時間軸は変更していない。相似則から、載荷速度は実構造物の2~3倍に相当する。

アクチュエータ実験では4ケースの速度振幅を選び、動的な部類として20cm/s、静的な部類として0.2cm/s、0.02cm/s、および0.002cm/sとした。速度振幅20cm/sは試験体縮尺率1/10と1/5に対し、実構造物の200cm/s、100cm/sに相当する。速度振幅0.2cm/sは静的実験を想定したもので、降伏変位($1\delta_y$)からその2倍の変位($2\delta_y$)までの初載荷に要する時間が10秒オーダーを、0.002cm/sは仮動的実験を想定し、同じく10分オーダーを想定したものである。

3.3 加力方法

振動台による実験では柱頭部に回転自由の重量4tfの重錘板を取付け、地震波加振では、宮城県沖地震の開北橋際地盤における加速度記録を用いた。また正弦波加振の加振振動数は、ひびわれ後の試験体の固有振動数を下回るように設定した[3]。

アクチュエータ実験では50tfアクチュエータを用い、試験体の柱頭部に各変位振幅ごとに10回の正負交番繰返し荷重を作成させた。振動台実験との比較用のNo.7試験体のみ軸圧縮力を作用させたが、他の4体では実験精度を確保するために軸力の載荷は行わなかった。

4. 実験結果

4.1 アクチュエータ実験

No.3試験体(速度振幅20cm/s)のP- δ 履歴を図-3に示す。ここで慣性力を補正した点(○)と元の曲線と比較すると、変位振幅が $1\delta_y$ 程度よりも大きい領域で

表-1 実験配列

No.	試験体 軸応力度	加力方法	載荷方法	
			制御	
1	7kgf/cm ²	振動台加振	開北橋地震波入力	
2			SIN波入力2.2Hz	
3				20cm/s
4	なし			0.2cm/s
5				0.02cm/s
6		アクチュエータ	SIN変位制御	0.002cm/s
7	7kgf/cm ²			0.2cm/s

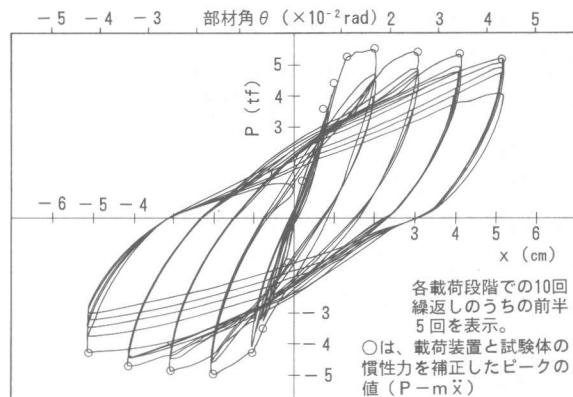


図-3 No.3試験体(20cm/s)の荷重-変位履歴

は慣性力の影響はほとんどないことがわかる。

各試験体の包絡線を比較したものを図-4に示す。これより同一変位での耐力を比較すると表-2の様になり、通常の静的実験(速度振幅0.2cm/s)程度ではP-δ包絡線に対する載荷速度の影響はほとんどなく、載荷速度を非常に遅くした静的実験(速度振幅0.002cm/s)の場合には若干影響があるといえる。

また図-5に示すように、正負の変位ピーク点での割線剛性や等価減衰定数で見た減衰特性は、載荷速度の影響よりも塑性率の影響の方がはるかに大きいことがわかった。

4.2 振動台実験

軸力を導入したNo.1, No.2およびNo.7のP-δ履歴曲線を比較して図-6に示す。No.7が最大耐力を示す変位までは、どの試験体もほぼ同じP-δ包絡線を示し、履歴ループの形状も似ている。この範囲では、No.1(振動台-地震波)、No.2(振動台-正弦波)とともに、柱頭部の速度はほぼ40cm/s程度以下であった。正側変位量が4δy程度より大きいところでは、No.1(振動台-地震波)の包絡線はNo.2(振動台-正弦波)よりも荷重が大きい。これは、No.1が90~100cm/sという大きな速度で初載荷されたためと考えられる。

このように、部分的には載荷速度の影響が現れているが、相似則の項で述べたように振動台実験では載荷速度が実際の2~3倍になることなどを考慮すると、実際には3つの試験体間での載荷速度の影響はほとんどないとみるべきであろう。

5. 載荷速度と部材耐力

5.1 ひずみ速度と材料強度

鉄筋の高速引張り試験では、静的試験に比べて降伏点が上昇することが確認されており、またコンクリートでもひずみ速度の上昇による弾性係数や圧縮強度の増加が確認されている。そこで、今回の部材実験での載荷速度による耐力の変化を、通常のはり理論によるRC断面計算で試算する。

5.2 降伏耐力

降伏時の鉄筋ひずみ速度は、変位速度

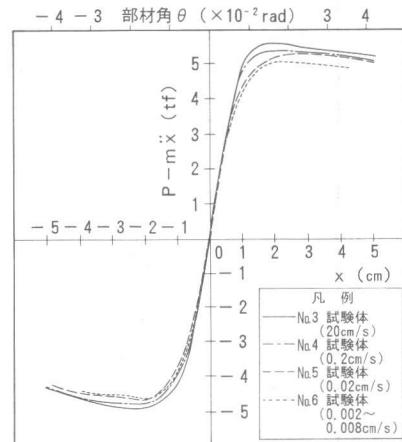


図-4 アクチュエータ加力試験体の荷重-変位包絡線

表-2 同一変位1サイクル目での荷重比

試験体	載荷速度	変位			
		1.5δy	2.5δy	2.5δy	3.5δy
No.3	20cm/s	1.00	1.00	1.00	1.00
No.4	0.2cm/s	0.97	0.96	0.96	0.95
No.6	0.002cm/s	0.86	0.86	0.90	0.91

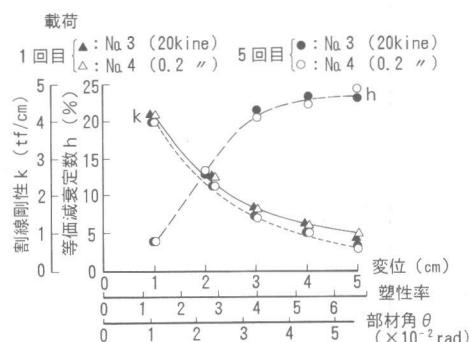


図-5 塑性率による割線剛性と等価減衰定数の変化

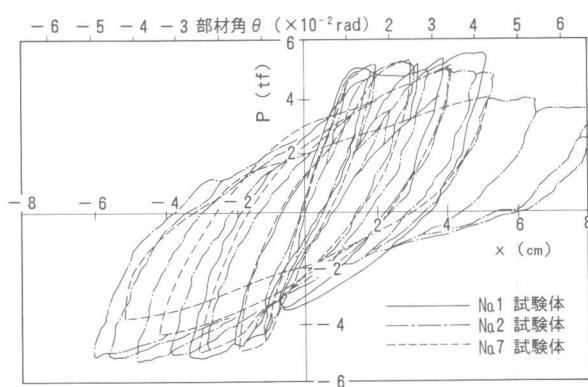


図-6 振動台加力試験体の荷重変位履歴

0.2cm/sで 3×10^4 /s前後、20cm/sでは 3×10^2 /s前後となり、ASCEレポート[4]によればこれによって鉄筋の降伏強度は1.15倍となる。また変位速度0.2cm/sと20cm/sにおける鉄筋の降伏時のコンクリートのひずみ速度は、それぞれ 2×10^4 /s、 2×10^2 /s前後となるが、畠野ら[5]によれば、これにより鉄筋降伏時のコンクリートのひずみ量である約 $1,000 \times 10^{-6}$ の時の割線弾性係数は、1.15倍に増加するとしている。

しかし断面計算によると、この程度のコンクリートの弾性係数の増加は部材の降伏荷重にはほとんど影響せず、降伏荷重の増加率は鉄筋の降伏強度の増加率にほぼ等しくなる。

5.3 最大曲げ耐力

ASCEレポート[4]によれば、ひずみ速度が $2\times10^{-4}/\text{s}$ から $2\times10^{-2}/\text{s}$ に増加した場合、コンクリートの圧縮強度は1.20倍に強度が増加するとしている。しかし断面計算によると、コンクリート強度のこの程度の増加は部材の最大耐力にはほとんど影響を与えない。

今回の実験では、載荷速度の変化による部材降伏後の同一変位量に対する強度の変化は1.05倍程度であり、鉄筋の材料試験結果から推定されたものと同程度かそれ以下であった。

6. ひずみ速度指標による検討

6.1 ひずみ速度指標

載荷速度の影響に関する既往の実験は、実験条件や縮尺などが互いに異なっているため、そのまま比較することは困難である。そこで構成材料のひずみ速度を考慮した次式で表される指標を考え、これを基に比較する。

$$\dot{\xi} = (\dot{\delta}/a)/(a/d) \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_c$ はひずみ速度指標、 $\ddot{\alpha}$ は加力点速度、 a_l はせん断スパン長、 d は断面の有効高さである。ひずみ速度指標の値を1.5倍すると全断面有効柱部材の場合のひずみ速度に一致する。実際のひずみ速度には鉄筋比や軸応力度も影響するが、ほとんどのデータが軸応力度の小さい場合であり、また、軸応力度が小さいと部材断面の縁辺から中立軸位置までの距離は鉄筋比の変化に鈍感であるので、これらは考慮しなかった。

図-7は、既往文献で述べられている降伏時の鉄筋のひずみ速度をひずみ速度指標で整理したものである。これより、鉄筋のひずみ速度とひずみ速度指標はほぼ比例関係にあり、比例定数を1と見なしてもよいといえる。

6.2 ひずみ速度指標と最大荷重

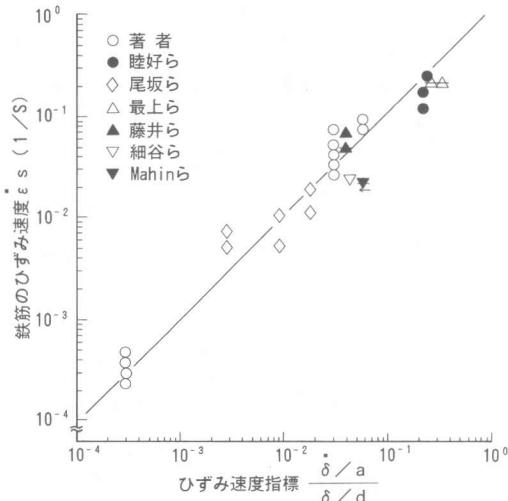


図-7 ひずみ速度指標と鉄筋ひずみ速度の関係

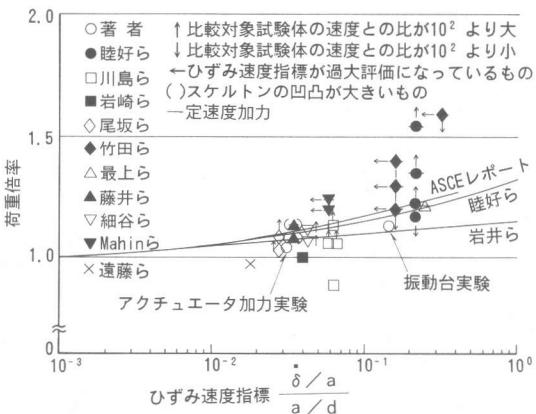


図-8 ひずみ速度指標と荷重倍率の関係

図-8は最大荷重までのP- δ 包絡線で、同一変位量に対する動的荷重と静的荷重の比率の最大値とひずみ速度指標の関係を表したものである。荷重の比率が明らかでないものについては、文献で述べられている降伏荷重または最大荷重の比率を使用した。図中には、文献[4],[6],[7]のデータをもとに、ひずみ速度指標が鉄筋のひずみ速度に等しいとして、鉄筋の降伏強度増加率とひずみ速度指標の関係を実線で示した。ただし、文献によって静的載荷と動的載荷の載荷速度の比が異なるため、ここでは100倍を基本とし、100倍以上や100倍以下のものには矢印を付した。図-8より、一定速度加力実験のデータは、総じて実線より上にあるが、正弦波加力実験のデータの多くは、3本の実線が位置する比較的狭い領域の中かそれに近い所に分布している。今回の正弦波加力のデータは他の正弦波加力実験と比べて低めに、地震波加振実験のデータは中程度になっている。

6.3 実橋での載荷速度の影響

図-9は、都市部の高架橋の桁の振動速度が150cm/sの場合のひずみ速度指標を計算したものである。ほとんどの高架橋ではひずみ速度指標が10⁻¹以下となっている。橋脚高の小さい範囲でこれを超えるものもあるが、これらは固有振動数が大きく、速度を過大に設定しているので大きな問題ではない。したがって、地震時の載荷速度の影響による荷重の増加率は1.15程度以下であることが他の実験データからも類推される。

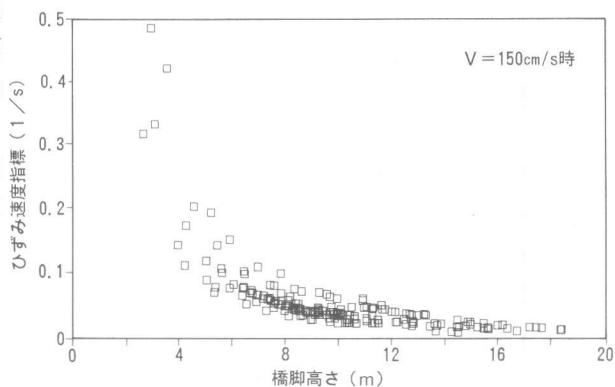


図-9 都市部高架橋の橋脚高さとひずみ速度指標の関係

7. 結論

フーチングを有するRC橋脚模型を用い、載荷速度に関する相似則を考慮した模型加力実験を行った結果、RC柱部材の復元力特性に対する載荷速度の影響を明らかにできた。

- 1) P- δ 包絡線は、鉄筋降伏後の初載荷時の載荷速度が大きいと同一変位量での荷重が増加するが、その増加率は通常の静的実験に対して1.05倍、載荷速度が極めて遅い実験で1.16倍となった。
 - 2) 割線剛性と等価減衰定数は、塑性率による変化量に比べれば、載荷速度の影響はほとんど無視できる範囲であった。
 - 3) 実橋脚の履歴復元力特性に対する載荷速度の影響は、荷重増加率で1.15倍程度以下であった。
- 以上より、地震時のRC柱部材の履歴復元力特性は、通常の静的実験で推定しても、大きな誤差は生じないといえる。

なお、本論文は文献[3]中の実験で得られた実測データと実橋の諸元についてひずみ速度指標の観点から検討を加えたものである。

参考文献

- [1]丹羽ら：“ウォーターフロントにおける耐震設計用入力地震動評価(その2)”,鹿島技術研究所年報,第39号,1991年10月,pp.117-124
- [2]川島ら：“最大地震動及び地震応答スペクトルの距離減衰式”,土木研究所報告,第166号,昭和60年
- [3]三村ら：“RC橋脚や柱の韌性に及ぼす繰り返し載加速度の影響に関する実験的研究”,鹿島技術研究所年報,第31号,1983年6月15日,pp.25-32
- [4]“Report on the ASCE Committee on Impulsive and Impulsive Loads”,Second ASCE Conference on Civil Engineering and Nuclear Power, Vol.V,September 1980
- [5]畠野ら：“地震荷重を対象としたコンクリーの動的圧縮変形ならびに破壊”,土木学会論文集,第67号,昭和35年3月,pp.19-26
- [6]岩井ら：“構造部材の挙動に及ぼす載荷速度の影響に関する実験的研究”,日本建築学会論文報告集,第314号,昭和57年4月,pp.102-111
- [7]睦好ら：“動的外力を受ける鉄筋コンクリート部材の力学的特性に関する研究”,土木学会論文集,第354号,V-2,1985年2月,pp.81-90