

鉄筋コンクリート橋脚の地震時 非線形応答の繰り返し特性

星隈順一¹・運上茂樹²

¹正会員 工修 建設省土木研究所耐震研究室研究員 (〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)

²正会員 工博 建設省土木研究所耐震研究室長 (〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)

鉄筋コンクリート橋脚模型に対する正負交番載荷実験では、実験で得られるじん性率が載荷繰り返し回数や載荷履歴の影響を大きく受けることが知られており、正負交番載荷実験における載荷繰り返し回数や載荷履歴の与え方をどう設定するかが重要となる。そこで、本研究では、剛性低下型の履歴復元力特性でモデル化された一自由度振動系に対して、様々な地震動を入力として非線形動的解析を行った。そして、本解析により得られた時刻歴応答変位波形を基に、非線形応答の繰り返し回数を評価するとともに、最大応答変位が生じる時刻を境とした前と後において、地震動の特性や鉄筋コンクリート橋脚の固有周期が非線形応答の繰り返し回数とその応答変位レベルに及ぼす影響について検討した結果を報告する。

Key Words : reinforced concrete columns, inelastic seismic response, cyclic number, loading history

1. はじめに

鉄筋コンクリート橋脚の変形性能は、載荷繰り返し回数や載荷履歴の影響を大きく受けることがよく知られている。したがって、鉄筋コンクリート橋脚のじん性率を実験結果を基に定量的に評価する場合には、正負交番載荷実験において、載荷繰り返し回数を何回に設定するのか、また、載荷履歴をどのように与えるのが重要なポイントである。橋脚に生じる地震時応答の繰り返し回数や履歴パターンは、橋脚に入力される地震動の特性と密接に関連するものであり、正負交番載荷実験における載荷繰り返し回数や載荷履歴については、耐震設計で想定している地震動の特性に応じて定義されるべきである。

そこで、本研究では、繰り返し特性の異なる既往の強震記録を用いて、鉄筋コンクリート橋脚に生じる非線形域での応答の繰り返し回数を時刻歴応答解析を基に検討を行った。そして、地震動の特性や鉄筋コンクリート橋脚の固有周期が応答の繰り返し回数に及ぼす影響について考察を行った。

2. 鉄筋コンクリート橋脚の非線形応答の繰り返し特性の評価手法

(1) 動的解析モデル

本解析では、鉄筋コンクリート橋脚を1自由度系にモデル化し、その基部に地震動を作用させて時刻歴応答解析を行った。橋脚断面の履歴復元力特性と

しては、図-1に示すように、鉄筋コンクリート部材の非線形性をよく表すことのできる剛性低下型弾塑性モデル(武田モデル)を適用した。ただし、本解析では、1次剛性(降伏剛性)に対する2次剛性(降伏後剛性)の比を0.001とした。

ここで、ある入力地震動に対して系に生じる最大変位 δ_{max} とし、最大応答塑性率 μ_{max} を次式で定義する。

$$\mu_{max} = \delta_{max} / \delta_y \quad (1)$$

ただし、 δ_y は降伏変位である。また、系の固有周期は1次剛性と質量から算出される。

本解析では、目標とする最大応答塑性率と固有周期を予め設定し、これに達するように系の降伏耐力 P_y および降伏変位 δ_y 、質点の質量を収束計算により定める。これは、系の降伏耐力や入力地震動の強度に応じて非線形域に達しなかったり、また、最大

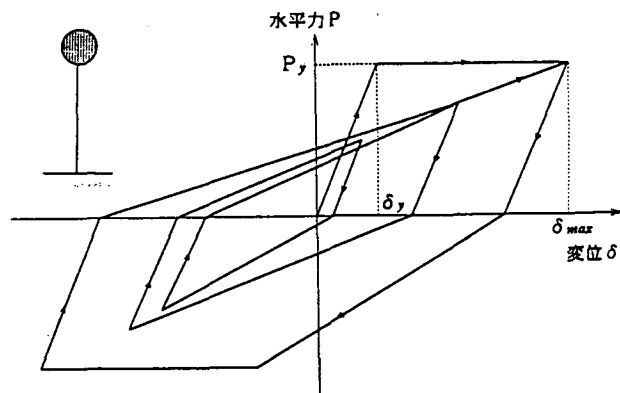


図-1 解析に用いた履歴復元力モデル

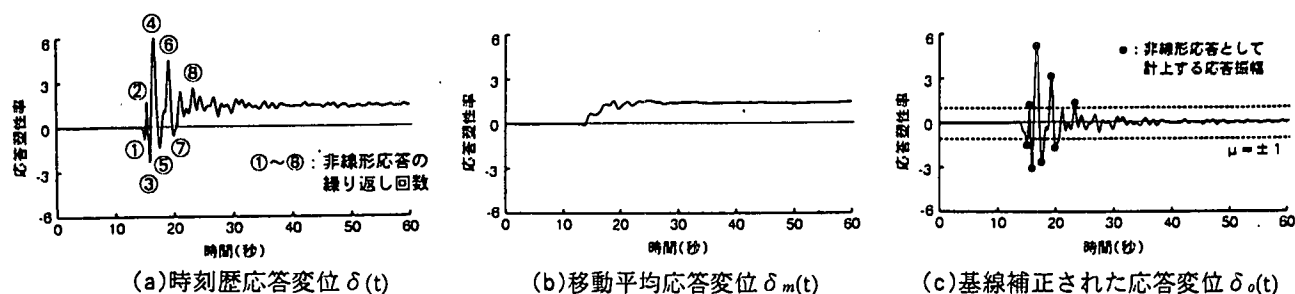


図-2 非線形応答の繰返し回数の評価方法

応答塑性率も異なってくるためであり、どのような入力地震動に対しても、所定の最大応答塑性率が生じるように考慮したものである。

(2) 応答の繰返し回数の評価手法

応答の繰返し回数の評価手順を図-2に示す。橋脚が非線形応答を示すと一般に残留変形が生じるため、応答変位波形の基線がゼロ点からずれてくる。したがって、残留変形が生じた後の応答で、応答の振幅がエネルギー吸収の期待できない降伏変位振幅相当以下の場合には、正負交番载荷実験への適用という観点からは、この応答を塑性応答として繰返し回数にカウントするのは合理的でない。そこで、非線形応答変位に含まれている残留変位の成分を基線補正により除去し、この補正された応答波形において、変位振幅が降伏変位振幅以上となっている応答を繰返し回数にカウントする。すなわち、本解析により得られる時刻歴応答変位 $\delta(t)$ に対して、サンプル時間間隔を5秒として移動平均応答変位 $\delta_m(t)$ を求め、式(2)により基線補正された応答変位 $\delta_o(t)$ を算出する。

$$\delta_o(t) = \delta(t) - \delta_m(t) \quad (2)$$

次に、基線補正された応答変位 $\delta_o(t)$ において、ゼロ・クロッシングする時刻 $t_i (i=1, 2, \dots)$ を求める。そして、 $t_i \leq t \leq t_{i+1}$ の時刻区間における $\delta_o(t)$ の絶対値の最大値が $1\delta_y$ よりも大きくなっている場合に対して、その時刻区間における $\delta(t)$ の絶対値の最大値 δ_i ならびに応答塑性率 $\mu_i (= \delta_i / \delta_y)$ を算出する。そして、非線形応答の繰返し回数は、ここに求めた応答塑性率 μ_i の度数分布により評価するものとする。ただし、応答塑性率のカテゴリーは、1.0以上2.0未満、2.0以上3.0未満というように、1.0刻みで設定した。なお、模型供試体に対する正負交番载荷実験では、一般に正負にそれぞれ1回ずつ変形させることを1回の繰返し回数として定義されているのに対し、本解析では正側もしくは負側に1回変形することを1回の繰返し回数としてカウントしていることに注意する必要がある。

表-1 解析で考慮した地震

プレート境界付近で生じた海洋性地震	日向灘(1968年, 1969年), 愛媛県西部沿岸宮崎県沖(1970年, 1978年2月, 1978年6月) 八丈島東方沖, 根室半島沖, 大島近海 伊豆大島南部沿岸近海 日本海中部, 釧路沖
内陸直下型地震	ノースリッジ, 兵庫県南部

3. 既往の強震記録に対する非線形応答の繰返し特性

(1) 解析に用いた既往の強震記録と解析条件

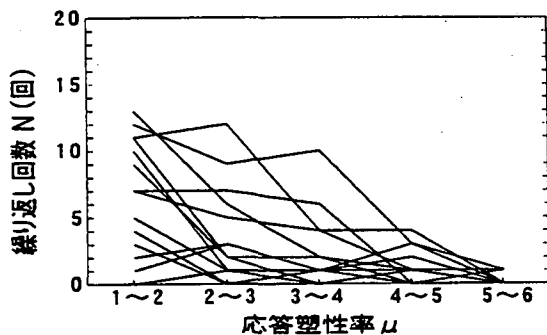
前述のような解析を、過去に発生したマグニチュード6.5以上の14の地震で観測された20成分の強震記録に対して行った。なお、これらの20成分の強震記録は、表-1に示すように、プレート境界付近で生じた海洋性地震による地震動(タイプⅠの地震動)15成分と内陸直下型地震による地震動(タイプⅡの地震動)5成分に分類される。

本解析では、いずれの強震記録に対する解析においても最大応答塑性率は6で一定とし、系の固有周期は0.5秒、0.7秒、1.0秒、1.5秒の4種類とした。

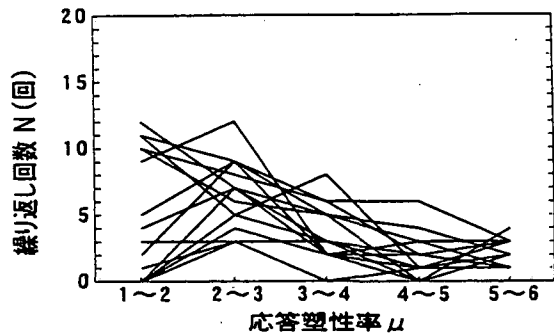
(2) 地震動のタイプが応答繰返し回数に及ぼす影響

地震動のタイプが応答繰返し回数に及ぼす影響を検討するために、タイプⅠ及びタイプⅡの地震動を用いて、固有周期が0.7秒の系を対象として、非線形応答の繰返し回数を分析した。

図-3及び図-4は、それぞれタイプⅠ及びタイプⅡの地震動に対する非線形応答の繰返し回数の度数分布を示したものである。なお、ここでは、最大応答変位が生じる前までと、最大応答変位が生じてから以後の2つに分けて、繰返し回数の度数分布を示している。これらからもわかるように、強震記録によって非線形応答の繰返し回数にはばらつきが認められる。そこで、応答塑性率のカテゴリー毎に繰返し回数の平均値と標準偏差を計算し、平均値とこれに標準偏差の1倍を加減した結果を示す

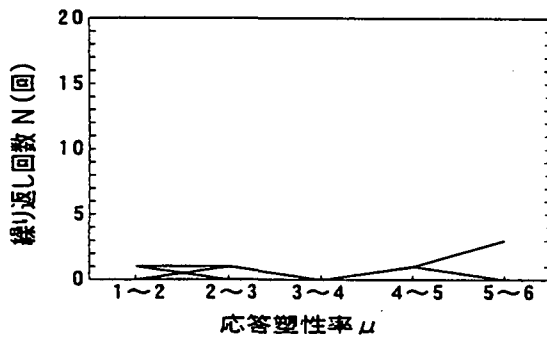


(a)最大応答変位発生前

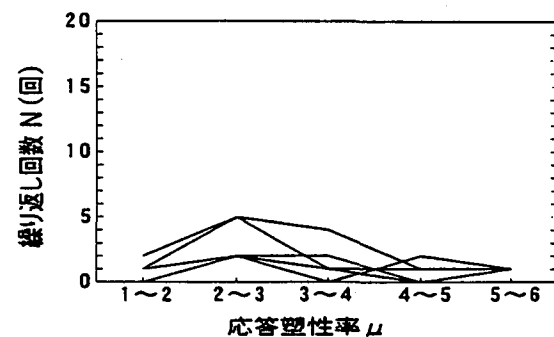


(b)最大応答変位発生後

図-3 タイプⅠの地震動に対する非線形応答の繰り返し回数の度数分布

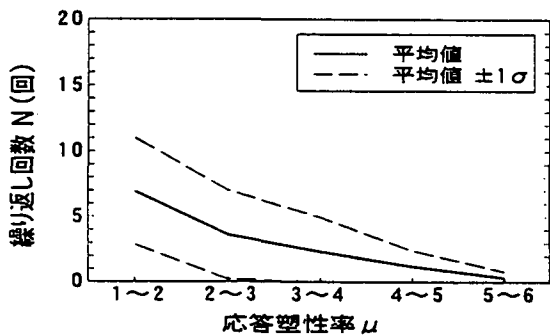


(a)最大応答変位発生前

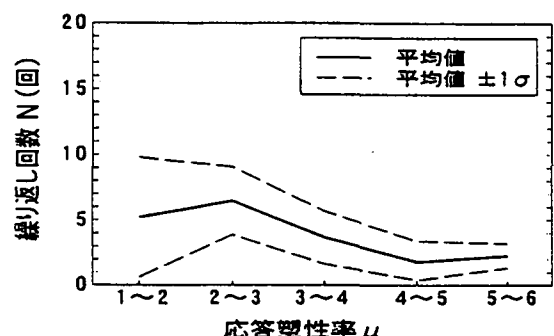


(b)最大応答変位発生後

図-4 タイプⅡの地震動に対する非線形応答の繰り返し回数の度数分布

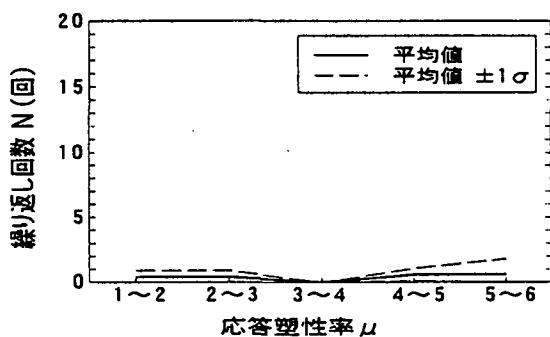


(a)最大応答変位発生前

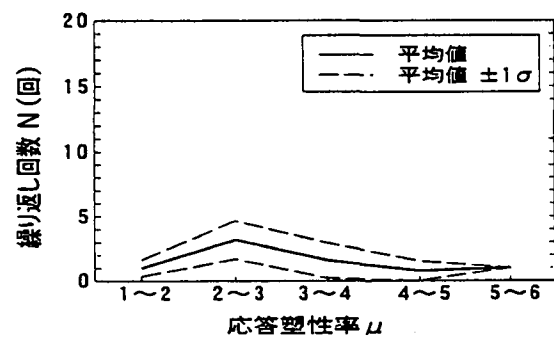


(b)最大応答変位発生後

図-5 タイプⅠの地震動に対する非線形応答の繰り返し回数の平均値の度数分布



(a)最大応答変位発生前



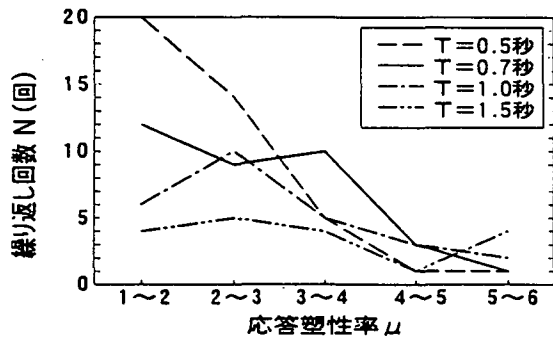
(b)最大応答変位発生後

図-6 タイプⅡの地震動に対する非線形応答の繰り返し回数の平均値の度数分布

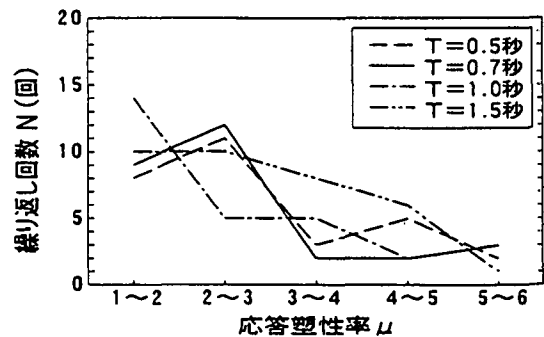
と図-5及び図-6の通りである。

タイプⅠの地震動では、応答塑性率が大きくなるにつれて、その繰り返し回数は少なくなる傾向がある。すなわち、標準偏差の1倍のばらつきを考慮すれば、 $6\delta_y$ の最大応答変位が生じる前までに鉄筋コンクリート橋脚が受ける履歴は、 $1\delta_y \sim 2\delta_y$ が約11回、 $2\delta_y \sim 3\delta_y$ が約7回、 $3\delta_y \sim 4\delta_y$ が約5回、 $4\delta_y \sim$

$5\delta_y$ が約2.5回、 $5\delta_y \sim 6\delta_y$ が約1回である。また、最大応答変位の発生以後においても、その発生以前と同等の非線形応答の繰り返し特性が見られることがわかる。このことは、タイプⅠの地震動に対する正負交番載荷実験においては、載荷変位の増大に伴って、載荷繰り返し回数を順次低減させていくのが合理的であることを示唆している。

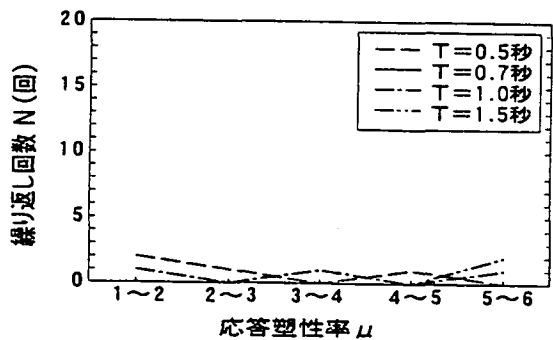


(a)最大応答変位発生前

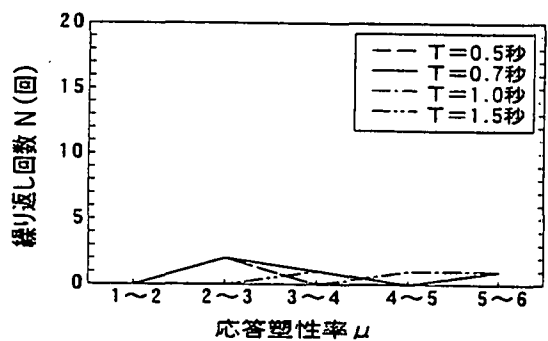


(b)最大応答変位発生後

図-7 非線形応答の繰返し回数に及ぼす固有周期の影響 (津軽大橋近傍地盤強震記録)



(a)最大応答変位発生前



(b)最大応答変位発生後

図-8 非線形応答の繰返し回数に及ぼす固有周期の影響 (東神戸大橋近傍地盤強震記録)

一方、タイプⅡの地震動では、タイプⅠの地震動の場合と比較して、繰返し回数は非常に少なく、最大応答変位が生じる前に着目すると、標準偏差の1倍のばらつきを考慮しても、各応答塑性率のカテゴリーとも、繰返し回数は1回~2回程度である。また、最大応答変位発生後においては、その発生前よりも非線形応答の繰返し回数が増している。すなわち、タイプⅡの地震動では、鉄筋コンクリート橋脚が塑性応答変形の履歴をあまり受けていない状態で、その地震中における最大の塑性応答変形を受けることがわかる。

(3) 固有周期が応答の繰返し回数に及ぼす影響

図-7は、タイプⅠの地震動である1983年日本海中部地震において津軽大橋近傍地盤で得られた強震記録を用いて、系の固有周期を変化させた場合の塑性応答の繰返し回数を度数分布で示したものである。最大応答変位が発生する前までに着目すると、応答塑性率が3以下の応答に関しては、系の固有周期が短くなるにつれ、その繰返し回数が多くなっているが、応答塑性率が4を超える応答の繰返し回数については、固有周期によるばらつきは小さくなる。また、最大応答変位の発生後の応答では、固有周期によってある程度のばらつきはあるが、固有周期の長い系の方が繰返し回数が多い傾向がある。

一方、図-8は、タイプⅡの地震動である1995年

兵庫県南部地震において東神戸大橋近傍地盤で得られた強震記録を用いた場合の解析結果を示したものである。これより、最大応答変位の発生前後とも、固有周期による繰返し回数の違いは顕著でないことがわかる。

4. 結論

既往の強震記録を用いて、鉄筋コンクリート橋脚に生じる非線形応答の繰返し回数を1自由度系モデルによる時刻歴応答解析により検討を行った。本研究により得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- 1) タイプⅠの地震動では、最大応答変位発生前に着目すると、 $1\delta_y \sim 2\delta_y$ の応答が約11回であるが、応答塑性変位が大きくなるにつれて、その繰返し回数は少なくなり、 $5\delta_y \sim 6\delta_y$ は応答は1回程度である。また、最大応答変位発生後でも、同様な応答の繰返し特性が見られる。
- 2) タイプⅡの地震動では、塑性変形の繰返し回数はタイプⅠの地震動の場合と比較すると少なく、塑性応答変形の履歴をあまり受けていない状態で、最大の塑性応答変形を受ける。
- 3) タイプⅠの地震動では、固有周期により塑性応答の繰返し回数が有意に変化するが、タイプⅡの地震動では、その影響は顕著ではない。