

◆ 特集：動的実験施設を活用した研究開発 ◆

構造部材の耐震性能評価実験法の提案

星隈順一* 運上茂樹**

1. はじめに

構造部材の地震時繰返し荷重下における耐力・変形性能、非線形履歴特性を検証する実験方法には正負交番載荷実験、疑似動的載荷実験、振動台実験等がある。これらの実験方法については、現在、統一的なルールが示された資料はなく、個々の研究者ごとにそれぞれが保有している実験に関するノウハウに基づいて実施されているのが現状である。しかしながら、同じ構造部材を対象とした実験であっても、実験供試体の設計、製作や載荷方法、計測方法が異なることが原因で、本来同じ結果となるべき実験結果に違いが生じることがある。この問題は、実験に基づいて耐震性能を評価しようとする場合には特に注意が必要である。

そこで、本文では、耐震性能の評価のために実施される実験としては最も代表的な正負交番載荷実験を例にとり、実験方法が異なることによって実験結果に影響が生じる項目について示すとともに、その標準的な方法について検討した。

2. 耐震性能評価のための実験法

耐震性能の照査に用いる実験としては、応力度-ひずみ関係等の材料の基礎的力学特性を調べるための材料実験や、地盤の土質力学特性を調査するための土質実験等の他に、橋全体系を対象として行う実験や、橋脚、支承、基礎、上部構造、落橋防止構造等の部材を対象とした要素実験等がある。このような実験に基づいて耐震性能の照査を行う場合には、実験の目的やその実験結果の耐震設計への反映方法等に応じて、適切な実験手法を選定しなければならない。具体的な実験手法としては、振動台実験、正負交番載荷実験等があるが、実験の目的と適用する実験方法選定の考え方の一例を表-1に示す。

なお、実験的な検討は、一般に実験数が限定されており、また、実験結果には様々な要因に起因するばらつきもある。したがって、実験結果の解釈においては、そのような限定された実験結果の

妥当性、信頼性についても配慮する必要がある。

3. 縮小鉄筋コンクリート橋脚模型による正負交番載荷実験と寸法効果

過去に実施された本誌グラビアの写真-8に示すような実大規模の橋脚模型に対する実験結果や寸法効果の影響等を踏まえると、塑性変形性能を検証するために行われる正負交番載荷実験では、その模型供試体の設計段階において、相似則に配慮しておく必要がある。その一方で、規格鉄筋の径が限られていることや模型施工上の制約等から、精度良く全ての構造諸元をスケールダウンさせた縮小模型を製作することは実際には非常に難しい面もある。

ただし、軸方向鉄筋の直径に関しては、寸法効果の影響が大きいため特に注意が必要である。図-1は、軸方向鉄筋径のみが主たる実験パラメータとなっている模型供試体を対象として、軸方向鉄筋径比と塑性ヒンジ長の関係を示したものである^{1),2)}。ここで、軸方向鉄筋径比とは、軸方向鉄筋径を断面寸法で無次元化した値である。また図中では、塑性ヒンジ長についても断面寸法で無次元化している。これより、正方形断面、円形断面とも、軸方向鉄筋径比が大きくなるにつれて、塑性ヒンジ長が長くなっていることがわかる。これは、帯鉄筋に関する条件を変えずに軸方向鉄筋径のみを太くすると、軸方向鉄筋の座屈長が長くなるためと考えられる。また、相対的に太径の軸方向鉄筋を用いると、フーチングからの伸び出し変位が大きくなることも知られている。したがって、縮小模型の設計においては、軸方向鉄筋比を実橋脚と一致させることも重要であるが、軸方向鉄筋径についてもできる限り縮小率に応じた適切なものを選定することが重要である。

その一方で、縮小率が大きくなると、相似則に基づけば規格にないような細い直径の鉄筋を軸方向鉄筋として用いないといけないような場合も生じる。このような場合には、逆に鉄筋自体の材料特性やコンクリートとの付着特性が実挙動との間で相違することがあり、新たな寸法効果の原

表-1 実験の目的と適用する実験手法選定の例

実験の観点	実験による検討項目の例	適用する実験手法例
橋全体系の挙動	- 橋全体系の耐震性能の照査 - 橋全体系の振動特性や減衰特性等の動的特性の検討 - 入力地震動の位相差が橋の地震応答に及ぼす影響の検討	振動台実験
部材間の相互作用	- 地盤-基礎系の動的相互作用の検討 - 橋脚-支承-上部構造系の動的相互作用の検討 - 橋脚-基礎系の動的相互作用の検討 - 上部構造端部の衝突に関する検討 - 地盤-基礎系における基礎の耐力、変形特性、履歴復元力特性の検討 - 上部構造と橋脚が一体となった構造の耐力、変形特性、履歴復元力特性の検討 - 地盤の液状化時の基礎の地震時挙動	振動台実験 ハイブリッド振動実験 正負交番 載荷実験 遠心力載荷実験
部材の動的特性	- 橋脚の地震時非線形挙動の検討 - 上部構造本体の耐力、変形特性、履歴復元力特性の検討 - 橋脚の耐力、変形特性、履歴復元力特性の検討 - じん性を向上させるための構造細目の検討 - 基礎本体の耐力、変形特性、履歴復元力特性の検討 - 支承本体の動的特性の検討 - 落橋防止構造の動的特性の検討	振動台実験 正負交番 載荷実験 支承試験 衝突実験
基礎的力学特性	- コンクリートの応力度-ひずみ関係の検討 - 鋼材の応力度-ひずみ関係の検討 - コンクリートと鉄筋の付着特性の検討 - 地盤のせん断弾性係数-せん断ひずみの関係の検討 - 液状化の判定に用いる繰返し三軸強度比の検討	圧縮載荷実験 引張り試験 付着実験 繰返し中空ねじ せん断実験 繰返し三軸試験

因となってしまうため、相似則に配慮したために過度に細い鉄筋を用いることが必ずしも適切な判断とはならないこともある。したがって、このような問題が生じないようにするためにも、できる限り大きな供試体で正負交番載荷実験を行うのが望ましいと考えられる。

4. 正負交番載荷実験における載荷パターンの設定

4.1 正負交番載荷実験と載荷方法

鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能を実験的に検証する場合、一般に正負交番載荷実験が行われることが多い。正負交番載荷実験における載荷方法は、入力地震動の特性とは無関係に設定されているが、載荷繰返し回数や載荷履歴によって、

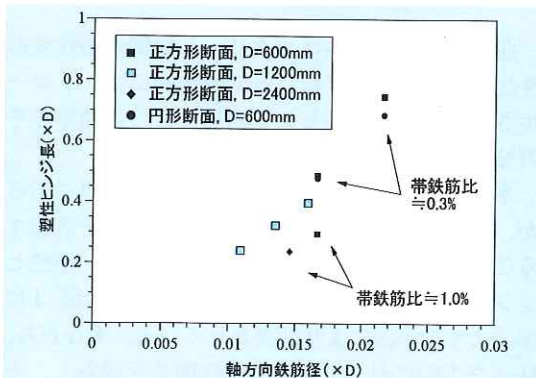


図-1 軸方向鉄筋径と塑性ヒンジ長の関係

終局変位やじん性率等、塑性変形性能を表わす指標に影響が生じることがこれまでに多くの研究で指摘されている^{3)~6)}。そこで、ここでは、振幅の繰返し特性や継続時間の異なる多くの強震記録を用いた非線形時刻歴応答解析の結果を用いて、鉄筋コンクリート橋脚に生じる塑性応答の繰返し回数特性と正負交番載荷実験における載荷方法との関係について検討した⁷⁾。

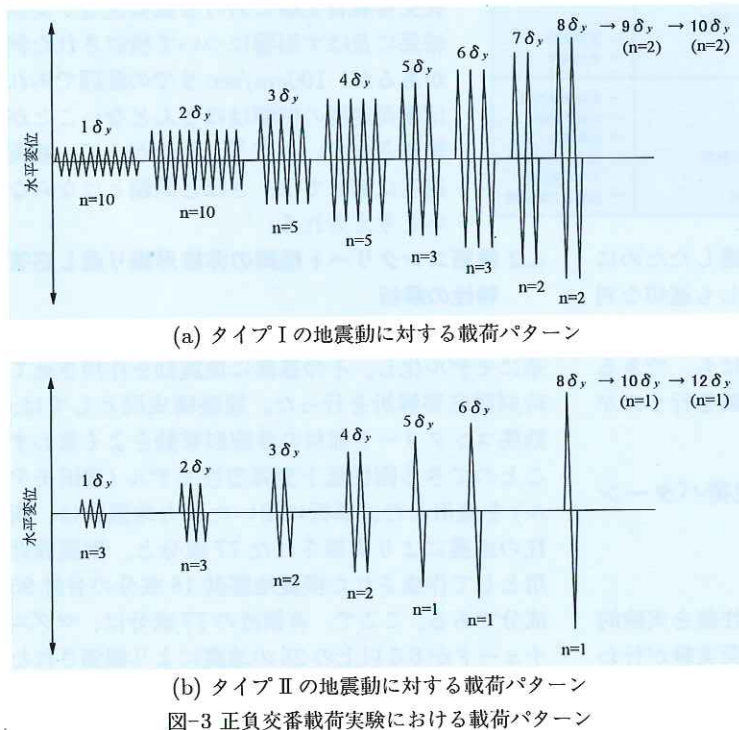
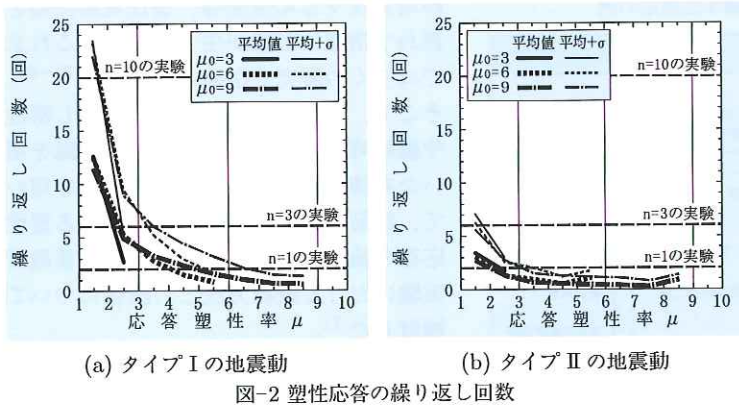
なお、この他にも載荷方法のパラメータとして載荷速度がある。これまでに正負交番載荷実験における載荷速度が実験結果に及ぼす影響について検討された例があるが、100cm/sec までの範囲であれば載荷速度の影響はほとんどないことが報告されている^{3),5)}。したがって、載荷速度に関しては、さほど問題とはならないと考えられる。

4.2 鉄筋コンクリート橋脚の非線形繰返し応答特性の解析

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。履歴構成則としては、鉄筋コンクリート部材の非線形挙動をよく表わ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。解析に用いた入力地震動は、既往の地震により実測された77成分と、耐震設計用として作成された模擬地震動18成分の合計95成分である。ここで、実測波の77成分は、マグニチュードが6.5以上の25の地震により観測されたものであり、震源が海洋のプレート境界付近の地震による地震動(以下「タイプIの地震動」という)と内陸直下の地震による地震動(以下「タイプIIの地震動」という)が含まれている。また、系の固有周期として、0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 0.95, 1.0, 1.5, 2.0秒の10ケース、また、最大応答塑性率は、3.0, 6.0, 9.0の3ケースをそれぞれ設定した。

4.3 塑性応答の繰返し回数

図-2は、最大応答変位が生じる前までの時間における応答塑性率の度数分布を全ての解析ケースに対して求め、その平均値と標準偏差を示したものである。ここで、応答塑性率が k 以上 $k+1$ 未満($k=1, 2, \dots, 8$)の繰返し回数は、図の横軸において、 $\mu = k + 0.5$ の位置にプロットして



いる。また、ここでは、入力地震動と系の固有周期の特性を全解析ケースで平均化して示していることになる。

これより、タイプ I の地震動では、標準偏差の 1 倍のばらつきを考慮すると、 $1 \sim 2\delta_y$ の応答が 23 回前後作用するが、 $3 \sim 4\delta_y$ の応答は 6 回前後、 $5 \sim 6\delta_y$ の応答は 3 回前後となっている。これは、繰り返し回数を正負にそれぞれ 10 回とする荷重方法は、タイプ I の地震動が作用した時の実際の挙動よりも非常に多い繰り返し回数を与えていることを示している。また、応答変位の増大に伴って、その繰り返し回数が徐々に少なくなっている点も特徴的である。一般的な正負交番荷重実験で

は、荷重変位とは無関係に繰り返し回数は一定とされるが、本解析結果からは、タイプ I の地震動に対しては、荷重変位の増大に伴って、徐々に繰り返し回数を減らす方が合理的であると言える。

一方、タイプ II の地震動に対する繰り返し回数は、明らかにタイプ I の地震動の場合よりも少ない。すなわち、 $1 \sim 2\delta_y$ の応答は 6 回前後作用しているが、 $3\delta_y$ 以降の応答変位は、各カテゴリーとも 1 回程度ずつしか作用していない。これは、タイプ II の地震動に対しては、正負交番荷重実験において、 $3\delta_y$ 以上の荷重ステップの繰り返し回数は 1 回でも十分であることを示している。

4.4 標準的な荷重パターンの設定

上述した鉄筋コンクリート橋脚に生じる非線形応答の繰り返し回数特性に基づき、単柱式鉄筋コンクリート橋脚に対する正負交番荷重実験における荷重パターンを設定すると図-3 のように提案できる。ここでは、タイプ I の地震動に対する荷重パターンとタイプ II の地震動に対する荷重パターンの 2 種類を示している。

5. 正負交番荷重実験における曲率の計測

曲げ破壊型の鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能は、塑性ヒンジによって支配的にコントロールされるため、塑性ヒンジ内部における曲率やその分布は有用な実験データとなる。

本来、曲率とは断面毎に定義される指標であるが、実験においてある特定の断面の曲率を計測することは非常に難しい。そこで、一般に、塑性ヒンジとその近傍の断面領域における曲率は図-4 に示すような手法により計測されている。すなわち、柱高さ方向に対してある計測区間長を設定し、その区間における圧縮縁近傍ならびに引張縁近傍の

相対変位を変位計により計測し、この計測値から、計測区間内の断面における平均曲率を次式により算出している。

$$\phi = \frac{\Delta_T - \Delta_c}{D_t \cdot h} \quad (1)$$

ここに、

ϕ : 計測区間内の断面における平均曲率

Δ_T, Δ_c : 計測区間における引張縁近傍及び圧縮縁近傍の相対変位

D_t : 引張縁側と圧縮縁側に配置された変位計の距離

h : 計測区間長 (断面高さの 0.25 倍以下とするのが望ましい⁸⁾)

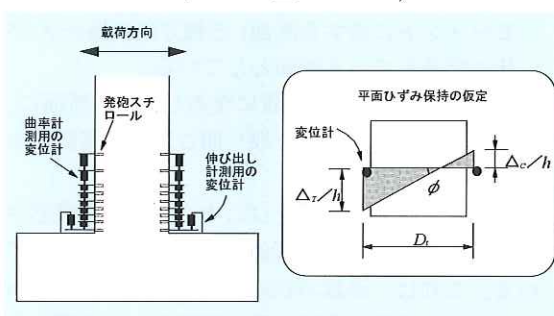


図-4 一般的な曲率の計測方法

6. 正負交番載荷実験における軸方向鉄筋の伸び出しによる基部の回転の計測

フーチングに固定された単柱式鉄筋コンクリート橋脚の正負交番載荷実験では、橋脚躯体部の曲げ変形以外に軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出しによる基部の回転変形がある。軸方向鉄筋の伸び出しによる橋脚基部の回転変形は、図-4に示すように、圧縮縁ならびに引張縁となる面の両方において、フーチング上面と基部からわずかに上方の区間の相対変位を変位計により計測し、その差分を2つの変位計の距離で除して求められる。この時、橋脚躯体部の曲げ変形による回転成分を含まないようにするため、相対変位の計測区間長はできる限り小さくするのがよいが、既往の実験では、この計測区間長は40mm程度としている事例が多い。また、この計測区間長のある断面において圧縮側ならびに引張側の軸方向鉄筋のひずみを計測しておき、この計測値から橋脚躯体の曲げによる回転角を計算し、その分だけを補正する手法もある。

このように計測区間長を設けて伸び出し変位を計測する手法以外にも、橋脚基部の断面位置において軸方向鉄筋にアンボンドワイヤーを取り付け

て、軸方向鉄筋の伸び出し変位を直接的に計測する方法も報告されている⁹⁾。

7. まとめ

本文では、耐震性能の評価のために実施される実験としては最も代表的な正負交番載荷実験を対象として、寸法効果と縮小模型の設計上の注意点について述べた。また、正負交番載荷実験においては載荷繰返し回数が実験結果に大きな影響を及ぼすため、設計で考慮する地震動の特性に応じて載荷パターンを図-3のように提案した。

参考文献

- 1) 星隈順一、長屋和宏、運上茂樹：鉄筋コンクリート橋脚の塑性曲率分布と塑性ヒンジ長、構造工学論文集, Vol.46A, pp.1461-1468, 2000年3月
- 2) 星隈順一、運上茂樹、長屋和宏：縮小模型実験に基づくRC橋脚の塑性変形性能と寸法効果、土木学会第55回年次学術講演会, V-495, 2000年9月
- 3) 川島一彦、長谷川金二、長島博之、小山達彦、吉田武史：鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査法の開発に関する研究、土木研究所報告第190号, 1993年9月
- 4) Kawashima, K. and Koyama, T.: Effect of Number of Loading Cycles on Dynamic Characteristics of Reinforced Concrete Bridge Pier Columns, Proceedings of JSCE, No.392/I-9, pp.205-213, 1988.4
- 5) 尾坂芳夫、鈴木基行、蟹江秀樹：RC柱の履歴復元力特性に及ぼす載荷速度と載荷パターンの影響、構造工学論文集, Vol.34A, pp.911-922, 1988年4月
- 6) 武村浩志、川島一彦：載荷履歴特性が鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす影響、構造工学論文集, Vol.43A, pp.849-858, 1997年3月
- 7) 星隈順一、運上茂樹：入力地震動の特性とRC橋脚に生じる塑性応答回数、第23回コンクリート工学年次論文報告集, 2001年7月
- 8) 星隈順一、運上茂樹、長屋和宏：RC橋脚に対する正負交番載荷実験における曲率の計測とその精度、土木学会第56回年次講演会, 第5部, 2001年10月
- 9) 小林薫、海原卓也、石橋忠良：大変形領域の交番荷重を受けるRC橋脚のフーチングからの鉄筋拔出し特性に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1249-1254, 1999年

星隈順一*



独立行政法人土木研究所
耐震研究グループ耐震
チーム主任研究員、工博
Dr.Jun-ichi HOSHIKUMA

運上茂樹**



同 耐震チーム上席研究
員、工博
Dr.Shigeki UNJOH