

◆特集：道路構造物の性能評価技術◆

道路橋橋脚の耐震性能評価に用いる実験に関するガイドライン(案)

西田秀明* 運上茂樹** 星隈順一***

1. はじめに

道路橋を始めとした各種構造物の設計基準は、国際化や、コスト縮減に対する社会的ニーズ等を背景に、性能規定型設計法へ移行しつつある。性能規定型設計法への移行により、要求性能を満たすことを照査する方法が複数存在することが認められ、優れた技術や工法等の提案が積極的に行われることが期待される。

橋の耐震性能を照査する方法には、解析的方法や、実験に基づいて評価した橋の地震時挙動や部材の耐力・変形性能を反映させる方法がある。このうち、橋の耐震性能や部材の耐力・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。これらの実験方法は、現在、統一されたルールがなく、個々の事業者や研究者が保有している実験に関する知見に基づいて実施している。そのため、同じ構造物を対象とした実験であっても、実験供試体の設計や製作方法、載荷方法、計測方法は異なっており、これが原因で本来同じになる実験結果に差異が生じる場合がある。

そこで、道路橋鉄筋コンクリート (RC) 橋脚の実験として最も代表的な正負交番載荷実験、及び地震時と同様に構造物を挙動させる振動台実験を対象に、実験結果に差異が生じると考えられる項目や統一事項として考慮すべき事項を検討し、「橋の耐震性能の評価に用いる実験手法に関するガイドライン(案)」としてとりまとめた。本ガイドライン(案)の目次を表-1に示す。本文では、このうち、3章及び4章の主要事項について紹介する。

2. 正負交番載荷実験による耐震性能評価

2.1 実験供試体の製作・設計

RC橋脚の耐震性を検証するための実験は、実験施設や実験経費の制約等から、一般に縮小した実験供試体により行われている。このため、相似則と寸法効果の影響を考慮する必要がある。特に、構造諸元の設定が実験結果に重要な影響を与える

表-1 橋の耐震性能の評価に用いる実験手法に関するガイドライン(案)の目次

| |
|-----------------------------------|
| 1. 総則 |
| 1.1 適用の範囲 |
| 1.2 試験の種類と定義 |
| 2. 材料試験 |
| 2.1 コンクリート |
| 2.2 鋼材 |
| 2.3 材料の応力度-ひずみ関係 |
| 3. 構造部材に対する正負交番載荷実験 |
| 3.1 実験目的 |
| 3.2 実験供試体の設計・製作 |
| 3.2.1 使用材料 |
| 3.2.2 実験供試体の設計と相似則 |
| 3.2.3 実験供試体の数 |
| 3.3 計測項目と計測方法 |
| 3.4 載荷方法 |
| 3.4.1 セットアップ |
| 3.4.2 予備載荷 |
| 3.4.3 本載荷実験における荷重の制御と載荷パターン |
| 3.4.4 正負交番載荷実験における降伏変位の決め方 |
| 3.4.5 載荷速度 |
| 3.5 実験結果の評価 |
| 3.5.1 耐震性能の評価を行う上で着目すべき実験供試体の損傷状態 |
| 3.5.2 実験結果の明示方法 |
| 4. 構造部材に対する振動台実験 |
| 4.1 実験目的 |
| 4.2 相似則 |
| 4.3 実験供試体の設計・製作 |
| 4.4 計測項目と計測方法 |
| 4.5 加振方法 |
| 4.5.1 セットアップ |
| 4.5.2 振動台への入力地震動の設定 |
| 4.6 実験結果の明示方法 |

場合、相似則に基づくよう配慮が必要である。

例えば、単柱RC柱の曲げ変形性能の検証実験では、塑性ヒンジ長に有意な影響を与えないために、軸方向鉄筋比や帯鉄筋比を実構造物に近似させるだけでなく、鉄筋径、間隔、かぶりコンクリートの厚さも相似則に従って適切に設定することが重要である。一方で、縮小率(実構造物/供試体)が大きいと、極端に細径の鉄筋を用いなくてはならないことがある。この場合は、鉄筋自体の材料特性やコンクリートとの付着特性が実大構造物と

異なり、新たな寸法効果を生じる可能性がある。また、せん断耐力の検証実験では、コンクリートの最大骨材寸法がコンクリートの負担するせん断抵抗に影響するといわれている。しかし、相似則に応じて最大骨材寸法を小さくすると、材料の基本的な力学特性に影響することも考えられる。従って実験装置等の制約を考慮しつつできる限り縮小率の小さな模型とすることが望ましく、やむを得ず相似則や実構造と異なる材料を用いる場合などは、その影響を検討し、必要に応じて実験結果の補正をする必要がある。

2.2 計測項目と計測方法

計測項目は、実験の目的に応じて適切に設定する必要がある。橋脚の正負交番荷重実験における計測項目としては、荷重、変位その他、断面に生じる曲率、鉄筋ひずみ、コンクリートのひびわれ幅、軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出しによる変位などが挙げられる。

また、特に、部材が塑性化した後の特性を把握する実験では、塑性化後のやり直しができない。従って、正確なデータが得られるような計測手法とするとともに、機器の動作確認を事前に行うことが重要である。

個別の計測項目に関する留意事項の例として、曲率と軸方向鉄筋の伸び出しについて示す。

曲率は、本来、断面毎に定義される指標であるが、実験において特定断面の曲率を計測することは困難であるため、図-1のような方法により平均曲率を計測する。平均曲率は、計測区間における圧縮縁近傍及び引張縁近傍の相対変位を変位計により計測した値から式 (1) により算出するものである。

$$\phi = \frac{\Delta_r - \Delta_c}{D_i \cdot h} \quad (1)$$

ここで、

ϕ : 計測区間内の断面における平均曲率

Δ_c 、 Δ_r : 圧縮縁近傍及び引張縁近傍の相対変位

D_i : 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

曲率の計測区間長は、曲率分布を精度良く推定するために断面寸法の0.25倍以下とすることを推奨している。また、曲率測定用変位計は、かぶりコンクリートがはらみだしてもすぐに接触しないこと、曲率の計測精度を低下させないことを考慮し、かぶりコンクリート厚さ程度の離隔を供試体からとることとしている。計測領域の目安としては、一般に塑性ヒンジ領域となると想定される範囲として、片持ちばり形式の場合で、柱基部から

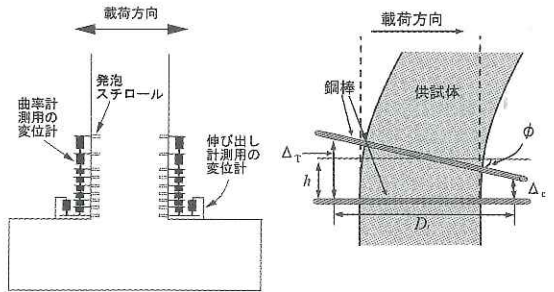


図-1 曲率の計測方法

断面寸法の1.5倍の高さ程度としている。

フーチングからの軸方向鉄筋の伸び出しは、橋脚基部において回転変形を生じる。この影響は荷重点変位に含まれるため、柱部の曲げ変形と回転変形を分離できるようにするのが望ましい。軸方向鉄筋伸び出しによる荷重点位置における回転変形は、図-1のように、圧縮縁及び引張縁となる面において、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た値から式 (2) により求められる。

$$\delta_0 \approx \frac{\Delta_r - \Delta_c}{D_i} H \quad (2)$$

ここで、

δ_0 : 荷重点位置における軸方向鉄筋の伸び出しに起因する変形

Δ_c 、 Δ_r : 圧縮縁近傍及び引張縁近傍の相対変位

D_i : 引張縁側と圧縮縁側に配置された変位計の距離

H : 柱基部から荷重点までの高さ

この時、柱部の曲げ変形分を極力含まないようにするため、相対変位の計測長はできる限り小さくする必要がある。また、軸方向鉄筋にワイヤーを固定し、シース管を通して外部に出し、その変位を測定して伸び出し変位を求めることもできる。

2.3 荷重方法

荷重方法は、供試体の設計、製作と同様、実験による結果の差異が生じる要因となる事項である。

2.3.1 加力装置と実験供試体の設置方法

加力装置と実験供試体の設置方法は、実験施設の条件により異なると考えられる。この時、設置方法によっては、加力装置の荷重値が供試体に作用している荷重値と異なる場合があるため、適宜補正をする必要がある。例えば、単柱RC橋脚における上部構造重量相当の軸力の作用方法には、図-2のような方法がある。このうち、図-2 (b)では、水平変位を作用させると軸力加力装置が傾き、軸力加力装置で作用させた荷重の水平方向成

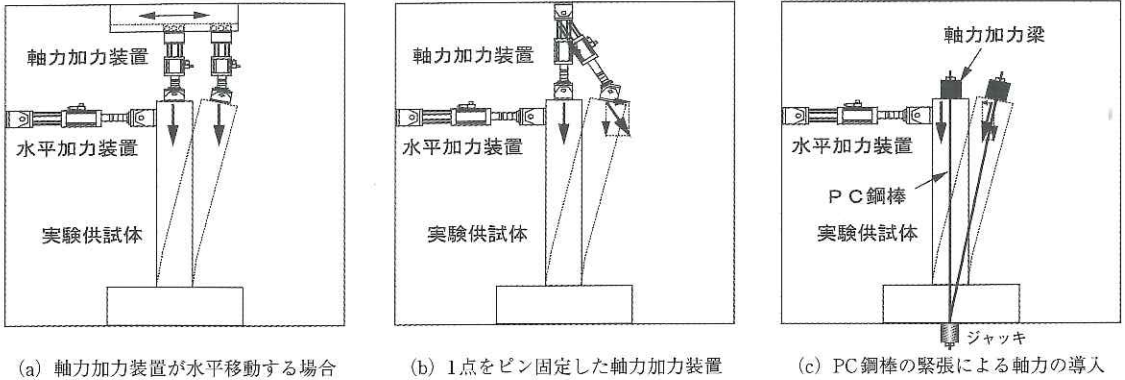


図-2 正負交番載荷実験における軸力加力機の設置方法と水平荷重の補正

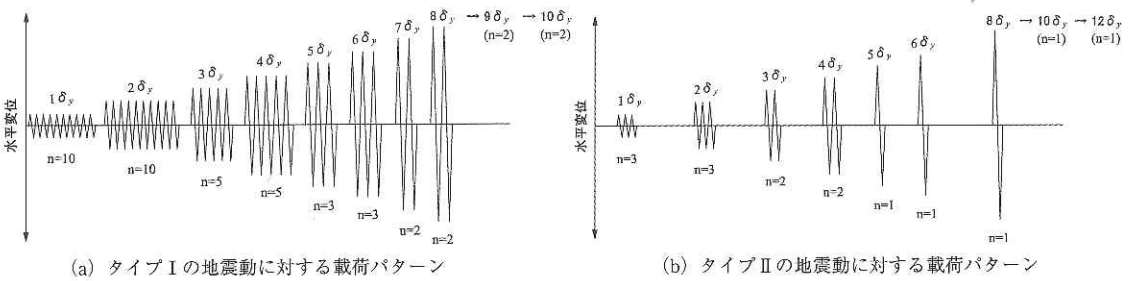


図-3 RC橋脚に対する耐震性能検証のための正負交番載荷実験における載荷パターンの設定例

分が実験供試体に水平荷重として作用する。従って、実験供試体に作用している水平荷重及び軸力を式 (3)、(4) により補正する必要がある。

$$H_e = H + W \sin \theta \approx H + \frac{W\delta}{L_v} \quad (3)$$

$$W_e = W \cos \theta \quad (4)$$

ここで、

H_e : 補正後の水平荷重 (kN)

W_e : 補正後の軸力 (kN)

H : 水平加力機に内蔵された荷重計により計測した水平荷重 (kN)

W : 軸力加力機に内蔵された荷重計により計測した軸力 (kN)

θ : 水平変位が δ (mm) の時に軸力加力機が部材鉛直方向となす角度 (rad)

L_v : 軸力加力機両端のピン支点間の距離 (mm)

図-2 (c) の場合も、同様の理由により補正が必要となる。

2.3.2 載荷パターン

正負交番載荷実験において供試体に与える載荷パターンは、ピーク載荷変位を降伏変位の整数倍で漸増させ、各ピーク載荷変位の繰り返し回数を3回とするものが一般的である。しかし、ピーク載

荷変位や繰り返し回数は、塑性変形性能に影響が生じるため、地震時に当該部材に生じると予想される弾塑性応答特性を踏まえて適切に載荷パターンを設定することが望ましいといえる。このような観点から、主としてRC橋脚の塑性変形性能の検証を目的とした場合の載荷パターンを設定した例を図-3に示す。これは、RC橋脚の塑性応答の繰り返し回数を非線形応答解析に基づいて検討した結果¹⁾に基づいて提案したものである。

2.3.3 降伏変位の設定

土木構造物を対象とした正負交番載荷では、載荷パターンを決める際の基準変位として、降伏変位を用いるのが一般的である。従来、実験時における降伏変位の決め方としては、軸方向鉄筋に貼り付けたひずみゲージの値が降伏ひずみに達した時の載荷点変位とすることが多かった。しかし、この段階では部材としての弾性限界には到達していないこと等を踏まえ、式 (5) により設定することを標準とした。

$$\delta_y = (P_{max}/P_{y0}) \cdot \delta_{y0,exp} \quad (5)$$

ここで、

δ_y : 正負交番載荷実験における降伏変位

P_{max} : 実験供試体に用いた材料の強度試験結果

を用いて計算した部材の水平耐力

P_{y0} : 実験供試体に用いた材料の強度試験結果を用いて計算した最外縁の軸方向鉄筋が初めて降伏する時の水平力

$\delta_{y0,exp}$: 水平力が P_{y0} に達した時の荷重点位置の水平変位の計測値

このようにすることで、ばらつきが少ない荷重値に基づいて合理的に降伏変位の設定ができる。

2.3.4 載荷速度

既往の研究成果^{2),3)} から、塑性変形性能の検証を目的とした正負交番載荷実験では、載荷速度の影響は少ないと考えられる。さらに、載荷速度が速い実験を行える施設は限られていることから、使用する加力装置の性能に応じて適切に設定すればよいとした。また、載荷速度が速い場合や、急加振や急停止をする場合、供試体の自重や取り付け治具の重量などによる慣性力の影響が大きくなる。この影響が大きいと考えられる場合は、荷重点位置における加速度を測定し、荷重の計測値の補正ができるようにしておく必要がある。

2.4 実験結果の評価

2.4.1 着目すべき損傷状態

実験結果を評価する上で着目すべき損傷状態は、実験対象部材の限界状態や破壊特性に応じて適切に設定する。実験時は、設定した限界状態にどこで達したのかを記録できるように、実験供試体の損傷の進展状態を観察する必要がある。

RC橋脚の塑性変形性能の検証を目的とした実験の場合では、図-4のように損傷が進展するが、このうち一般的に、損傷の修復を容易に行うる状態及び橋脚の水平耐力が大きく低下し始める状態に着目する。ここで、一般的なRC橋脚の場合、損傷の修復を容易に行うる状態とは、かぶりコンクリートが剥落し始めた時を、また、橋脚の水平耐力が大きく低下し始める状態とは、1サイクル目の載荷で水平力が最初に最大水平荷重の80%以下にまで低下した時、とした。後者については、水平力が初降伏耐力 P_{y0} にまで低下した時とする方法も提案されている。一般的には、両者で大きな差はないが、仮に最大水平荷重と P_{y0} に大きな差がある場合も想定すると、最大水平荷重の80%とする方が汎用的と考えられる。

2.4.2 実験結果の明示方法

正負交番載荷実験で最低限明示する実験結果には、a) 水平力-水平変位関係の履歴曲線及び包絡線、b) 載荷ステップ毎の供試体の損傷状況、c) 履歴吸収エネルギー、がある。この他に、軸方向鉄筋の伸び出し変位や曲率、鉄筋のひずみ等がある。また、降伏変位とその時の水平力や、着

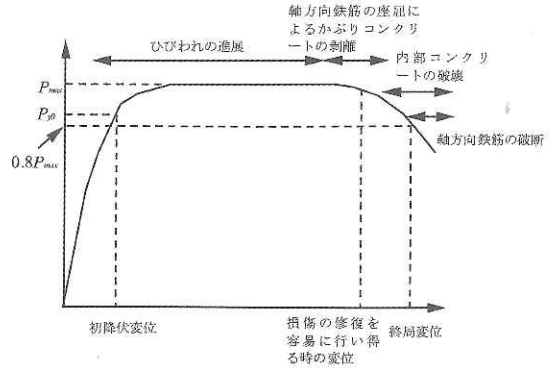


図-4 曲げ破壊型RC橋脚の損傷の進展と着目すべき損傷状態

目すべき損傷状況に達した時の水平変位と水平力は、表-2のように数値で明記するものとする。このように整理することで、他の実験結果との比較を定量的に行うことが可能となる。

3. 振動台実験による耐震性能評価

3.1 実験供試体の製作・設計と相似則

振動台実験は、地面に相当する振動台を振動させ実地震時と同様の構造物の挙動を再現し、その応答挙動や破壊特性などを把握するために行うものである。

振動台実験では、a) 慣性力の作用により断面力を得ること、b) 時間の概念が加わること、が正負交番載荷実験と異なる点であり、供試体の設計、製作の際は、これらの条件を考慮する必要がある。

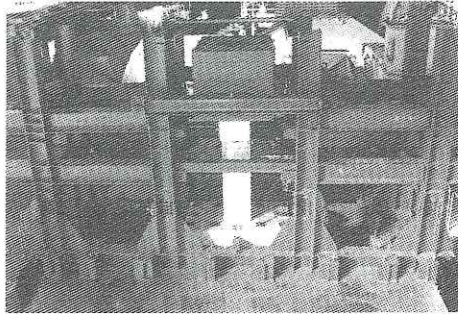
相似則の適用方法は、慣性力や軸力の作用方法により異なる。慣性力や軸力の作用方法例を図-5に示す。

図-5 (a) の供試体が上部構造に相当する重錘や桁模型による重量を直接支持している場合の実験に適用する相似則の整理例を表-3に示す。

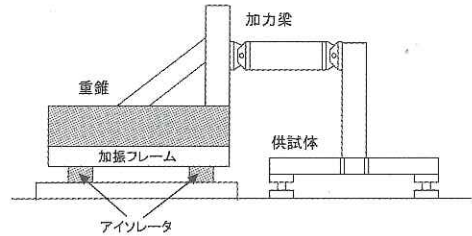
重力加速度は供試体の大小にかかわらず一定である。また、使用材料は、一般には実構造物と縮小模型供試体で同一のものを使用するため、材料の弾性係数も一定である。この条件は不変であるとして、相似則に従い縮小する場合、長さに関する縮小率 (実構造物/供試体) を S_L とすると、面積は S_L の2乗、体積は同 S_L の3乗の縮小率となる。この時、質量は、材料が同一であり密度が変わらないため、体積と同じ S_L の3乗の縮小率となる。従って、面積と質量の次元が異なるため、応力は小さくなる。ここで、部材に作用する軸応力を縮小前後で変えないようにするためには、実構造物の構造質量 m に対して、式 (6) の付加質量 Δm が必

表-2 耐震性能評価を行う上で着目する状態における実験結果の整理例

| 着目した 載荷ス テップ | 本実験で降伏と定義した 載荷ステップ | | 水平力が最大となる 時の載荷ステップ | | 軸方向鉄筋の座屈により かぶりコンクリートが剥 落し始めた時の載荷ス テップ | | 1サイクル目の載荷で水 平力が初めて最大水平 荷重の80%以下にまで低 下した時の載荷ステップ | |
|--------------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|---|--------------|--|--------------|
| | 水平力 (kN) | 水平変位 (mm) | 水平力 (kN) | 水平変位 (mm) | 水平力 (kN) | 水平変位 (mm) | 水平力 (kN) | 水平変位 (mm) |
| 供試体 | | | | | | | | |



(a) 模型供試体が重錘を直接支持する例



(b) 加力梁を介して慣性力を模型供試体に作用させる例⁴⁾

図-5 振動台実験における慣性力及び軸力作用方法

要となる。

$$\Delta m = \frac{m}{S_L^2} - \frac{m}{S_L^3} = \left(\frac{S_L - 1}{S_L^3} \right) m \quad (6)$$

付加質量には、コンクリートブロックや鋼板ウエイトが用いられるが、慣性力作用中心位置が供試体のみの場合と異なることに注意が必要である。縮小率が大きくなると相対的に付加質量も大きくなり必要な質量を負荷できなくなることがある。また、時間の次元は長さの0.5乗となるが、縮小率が大きいと極端に加振時間が短くなる場合があるため、地震時挙動の再現を目的とした実験では特に注意が必要である。以上より、できる限り供試体の縮小率は小さくするとともに、適宜加振時の入力加速度の縮小率を調整し目標とする応答性状が得られるようにする必要がある。

また、振動台の加振能力や許容モーメント、周波数などの諸特性、供試体の振動に伴い振動台に作用する反力や損傷進展に伴う共振周波数の変化、振動台の制御方法なども考慮し、供試体の設計・製作を行う必要がある。

3.2 計測項目と計測方法

計測項目および計測方法は、実験目的や供試体の設置方法等に応じて適切に選定する。主な計測項目には、供試体の慣性力作用中心位置もしくは桁などのこれに準じる位置における加速度及び変位、振動台上の加速度がある。

表-3 振動台実験に適用する
相似則の整理例

| 物理量 | 縮小率 |
|---------|--------------|
| 長さ | S_L |
| 時間 | $S_L^{0.5}$ |
| 振動数 | $S_L^{-0.5}$ |
| 応力 | 1 |
| 弾性係数 | 1 |
| 力 | S_L^2 |
| 曲げモーメント | S_L^3 |
| 曲率 | S_L^{-1} |
| 加速度 | 1 |
| 質量 | S_L^2 |
| 重量 | S_L^2 |

加速度は、振動台の制御方法や供試体反力の影響等により、加振軸以外にも加速度が生じうるため3成分測定することが望ましい。変位計測時の不動点は、振動の影響が生じない振動台の外部にとることが望ましいが、振動台上に組んだ剛性フレーム上にとることもできる。この場合、変位計設置位置における加速度を計測し、振動台上の加速度との差を用いてフレームと振動台との相対変位の影響を補正できるようにする。

荷重は、計測することが望ましいが、計測が困

難な場合、荷重相当の物理量として慣性力作用中心位置における加速度と質量から慣性力を求めることがある。この慣性力には、減衰力も含まれており、正負交番載荷実験で得られる荷重(復元力)と異なるので注意が必要である。

付加質量が大きいかつ重心が高い場合、回転慣性による影響が大きくなる場合がある。この影響を評価できるよう複数箇所での加速度を測定するか、回転慣性の影響が生じないように加振軸以外の並進や回転を拘束する治具を設置するのがよい。

3.3 加振計画

振動台実験において用いる加振波の入力レベルの設定には、正負交番載荷実験ほど共通したルールは存在しない。従って、入力レベルは、事前解析により実験の目的が達成できるレベルを予測し、相似則を考慮して入力波の振幅や時間軸を調整して適宜設定する必要がある。事前解析は、振動台や計測機器の性能、過大な損傷による倒壊等に対する問題点を確認するためにも必要である。また、各加振終了後に解析結果と比較し、事前の予測と著しく異なる場合は、その原因を調査し、必要に応じて以降の加振計画の変更を検討する。

損傷進展度の定量的な把握には、固有振動数の変化が目安となる。固有振動数は、本加振の前後に、ホワイトノイズ(ランダム波)や正弦スイープ波による微小加振を行い、慣性力作用中心位置(またはこれに相当する位置)の振幅スペクトルを振動台の振幅スペクトルで除した比から求めることができる。また、衝撃試験や油圧投入時に生じる微振動を用いることができる場合もある。

3.4 実験条件および結果の明示

実験条件および結果を明示する項目は、正負交番載荷実験と類似しているが、正負交番載荷実験に比べて自由度が大きいことから、振動台の加振性能や制御方法を含めて、実験条件の明確化が特に重要である。振動台実験特有の項目としては、

a) 慣性力の作用方法、b) 時間を含む縮小率と基本定数の設定方法、c) 加振方法、がある。

4. おわりに

実験手法は、本来、その目的や諸条件により多種多様であり、また、実験手法自体に独創性を求めることもある。本ガイドライン(案)の目的は、そのような条件や自由度を制約することではなく、実験結果に差異が生じると考えられる項目や、統一事項として考慮すべき点等についての認識を共有することである。これにより、橋の耐震性能の合理的な検証や、実験データを有効に活用できるようになることが期待される。

なお、本ガイドライン(案)は、米国連邦道路庁との共同研究として作成したものである。今後、日米双方で共通的に活用できる実験手法に関するガイドライン(案)について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 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、コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.1243-1248, 2001.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 秋山 宏、山田 哲、箕輪親宏、寺本隆幸、大竹章夫、矢部喜堂：慣性力加力装置を用いた構造要素の実大振動実験方法、日本建築学会構造系論文報告集, No.505, pp.139-146, 1998.

西田秀明*



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所耐震研究グループ耐
震チーム主任研究員
Hideaki NISHIDA

運上茂樹**



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所耐震研究グループ耐
震チーム上席研究員, 工博
Dr. Shigeki UNJOH

星隈順一***



国土交通省九州地方整備局長崎
河川国道事務所長(元 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