

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 3月31日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760338

研究課題名（和文）断層近傍の上下方向地震動により生じる軸力変動が  
RC橋脚の耐震性に及ぼす影響の解明研究課題名（英文）Effects of Varying Axial Force due to Near-field Vertical Ground  
Motions on the Seismic Performance of RC Bridge Columns

研究代表者

松崎 裕（MATSUZAKI HIROSHI）

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：10506504

研究成果の概要（和文）：本研究では、断層近傍における短周期成分が卓越した大加速度振幅の上下方向地震動によって生じる軸力変動が RC 橋脚の耐震性に及ぼす影響について、その軸力変動を模擬した静的正負交番繰返載荷実験およびファイバー要素解析により検討した。その結果、軸方向鉄筋の座屈発生後は、圧縮・引張の繰返しの変動軸力によりコアコンクリートの損傷が進展し、塑性ヒンジ区間におけるせん断変形が顕著になること、変動軸力における最大引張力が大きいほど、コアコンクリートの損傷領域が大きくなることなどが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：Effects of varying axial force due to extreme near-field vertical ground motions on the seismic performance of RC bridge columns were investigated based on reversed cyclic loading experiments and fiber element analysis. It was shown from the experiments that the damage of core concrete progressed extensively due to the reversed cyclic axial force variation from compression to tension after the longitudinal bars buckled, which resulted in the shear deformation in the plastic hinge region. Damaged area of core concrete became larger as the peak tensile force in the axial force variation increased.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：上下方向地震動，軸力変動，RC橋脚，耐震，正負交番繰返載荷実験

## 1. 研究開始当初の背景

地震動の上下方向成分は水平方向成分に比べて一般的に小さく、また桁橋に代表される橋梁の地震応答には水平方向の振動モードが卓越することから、従来、我が国の耐震設計基準では、上下方向地震動の影響は重要視されてこなかった。しかし、近年の強震観

測網の充実により、1994年 Northridge 地震 Arleta 記録や、2008年岩手・宮城内陸地震 KiK-net 一関西記録（以降、一関西記録と呼ぶ）などのように、水平方向地震動に比べて最大加速度が大きく、短周期成分が卓越した断層近傍上下方向地震動が観測されてきている。大振幅の上下方向地震動の成因について

では様々な議論がなされているが、短周期成分が減衰してしまう断層から遠方とは異なり、断層近傍においては、短周期かつ大加速度振幅の上下方向地震動が構造物に作用する。ラーメン構造の柱部分には水平変位に伴う変動軸力が生じるが、こうした断層近傍上下方向地震動が作用した場合には、単柱式橋脚であっても引張力を含むような大振幅の変動軸力が生じるため、断層近傍上下方向地震動が RC 橋脚の耐震性に及ぼす影響を明らかにしておくことが重要である。

変動軸力が RC 橋脚の耐震性に及ぼす影響に関する研究は解析と実験の両面から行われている。しかし、実験条件としては、水平方向地震動によってラーメン橋脚の柱部分に生じる変動軸力を念頭に置いているものや、単柱式橋脚を対象としていても入力上下方向地震動の最大加速度が 0.6G 程度であり、一関西記録のように水平変位の周期に比べて短周期かつ大振幅の軸力変動をもたらす上下方向地震動が RC 橋脚の耐震性に及ぼす影響は実験事実として解明されていなかったことが本研究の開始当初の背景である。

## 2. 研究の目的

前記した本研究の背景を受けて、断層近傍における短周期成分が卓越した大加速度振幅の上下方向地震動により生じる引張力を含む大振幅かつ短周期の軸力変動が RC 橋脚の耐震性に及ぼす影響について、その軸力変動を模擬した静的正負交番繰返载荷実験およびファイバー要素解析に基づいて解明することが本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

静的正負交番繰返载荷実験を行うに当たり、2002 年道路橋示方書に基づいて設計された図-1 に示す同一寸法および同一配筋の合計 3 体の単柱式 RC 橋脚模型供試体を製作した。供試体は 400mm×400mm の正方形断面で

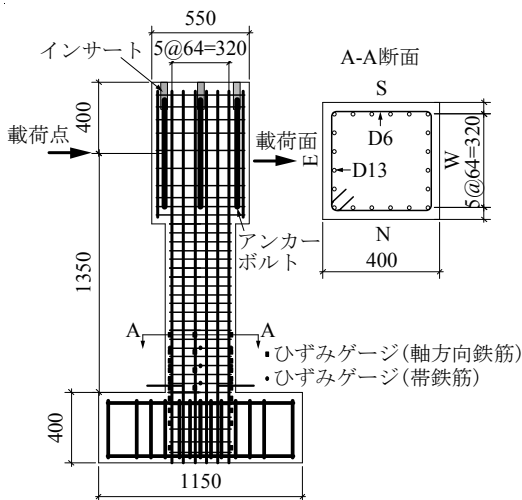


図-1 RC 橋脚模型供試体

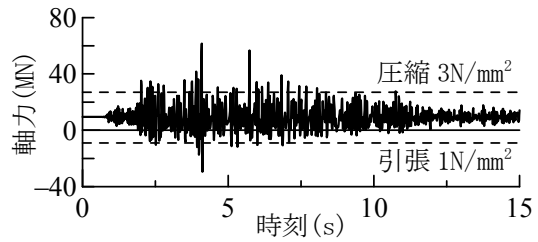
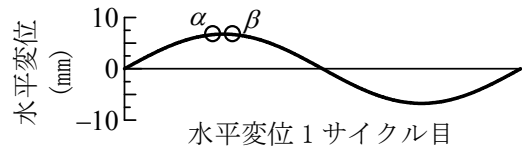
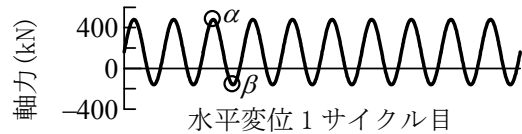


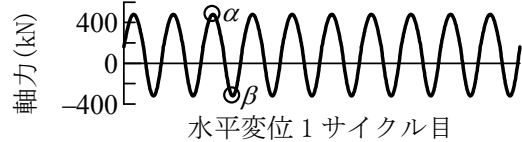
図-2 一関西記録に対する軸力の時刻歴



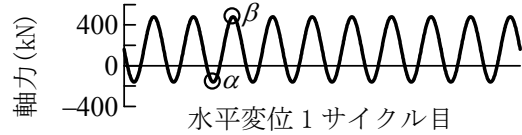
(a) 水平変位 (0.5%ドリフト载荷の場合)



(b) Case 1 における変動軸力



(c) Case 2 における変動軸力



(d) Case 3 における変動軸力

図-3 入力した水平変位および変動軸力

あり、橋脚基部から水平荷重载荷点までの高さは 1350mm である。軸方向鉄筋比は 1.58%、横拘束筋体積比は 0.79% である。上部構造の自重による圧縮力作用下での地震時保有水平耐力は 119kN であるのに対し、せん断耐力は 215kN と、曲げ破壊型となるように設計されている。

本研究では上下方向地震動により生じる軸力変動を模擬した静的正負交番繰返载荷実験を行ったが、供試体に作用させる変動軸力の振幅と、水平変位 1 サイクル当たりの変動軸力のサイクル数を決定するに当たり、実験供試体と相似な実大規模橋脚を想定し、道路橋示方書に基づいて設計した 3m×3m の矩形断面で橋脚高さ 10m の RC 橋脚を対象として、一関西記録を入力した動的解析を行った。図-2 に解析により得られた橋脚基部における軸力の時刻歴を示すが、引張 1N/mm<sup>2</sup>～圧縮 3N/mm<sup>2</sup> の変動軸力が地震動の主要動部において継続的に繰返し作用し、その変動軸力の振動数は水平変位における振動数の 10 倍であった。

そこで、本研究では、水平変位 1 サイクル

当たり 10 サイクルの割合で引張  $1\text{N}/\text{mm}^2$  ~ 圧縮  $3\text{N}/\text{mm}^2$  の範囲での変動軸力を作用させる場合を基準荷条件とした(以降, Case 1 と呼ぶ). また, 変動軸力における最大引張力が RC 橋脚のひび割れ性状や耐震性に及ぼす影響を検討するため, Case 1 を基準として, 最大引張応力を  $2\text{N}/\text{mm}^2$  へと変更した荷条件である Case 2 での荷を実施した. さらに, 水平方向と上下方向の地震動が作用する RC 橋脚は, 変動軸力と曲げの連成作用下において, 変動軸力と曲げによる圧縮・引張の組み合わせが問題となることから, Case 1 を基準として, 変動軸力の位相を逆位相とした荷条件である Case 3 での荷を実施した.

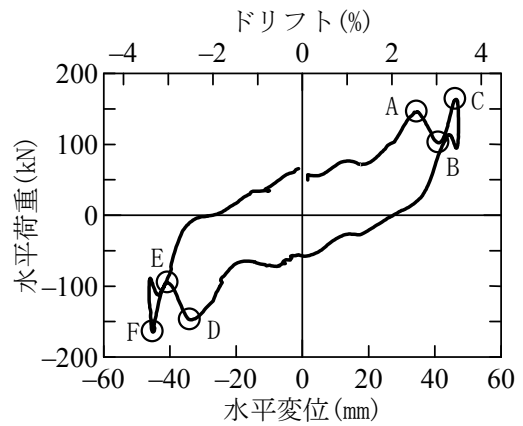
いずれの荷条件においても, フーチング表面から荷点までの高さに対する水平変位の比率であるドリフトを 0.5% から 0.5% ドリフトずつ漸増させて各ドリフトにおいて 3 サイクルずつ正負交番繰返荷を行った. 図-3 に入力した水平変位および変動軸力を示す. 図中において, 点  $\alpha$  は最大水平変位前に圧縮軸力または引張軸力が最大となる点, 点  $\beta$  は最大水平変位後に圧縮軸力または引張軸力が最大となる点である. 従って, Case 1 では, 曲げで圧縮側となる面において, 点  $\alpha$  において曲げによる圧縮応力の荷中にさらに変動軸力による最大圧縮応力が作用するのに対し, Case 3 では, 点  $\beta$  において曲げによる圧縮応力の除荷中に変動軸力による最大圧縮応力が作用する.

#### 4. 研究成果

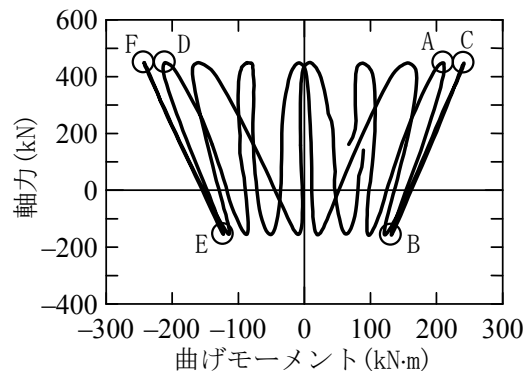
##### (1) 上下方向地震動による軸力変動が曲げの履歴復元力特性に及ぼす影響

荷条件 Case 1 のドリフト 3.5% 荷において荷実験で得られた水平荷重-水平変位の履歴および曲げモーメント-軸力の履歴を図-4 に示す. 各図中の記号 A~F はそれぞれ対応している点である. 最大圧縮軸力となる点 A において水平荷重は  $146\text{kN}$  となるが, 続いて点 B において最大引張軸力となると, 水平荷重は  $102\text{kN}$  と点 A の 70.2% まで低下する. その後, 点 B を過ぎて, 再び最大圧縮軸力を迎える点 C に至るまでの経路は, 図-4(b) のように点 C の後の除荷時の曲線と重なっており, M-N 相互図の包絡線上を移動している. このように水平変位 1 サイクル当たり複数回の軸力変動が生じることにより, 断面で保持できる水平荷重が M-N 相互図に対応するように大きく増減することとなる.

図-4 に示した実験結果に対して, ファイバー要素解析に基づいて再現解析を行った結果を図-5 に例示するが, 良好に実験結果を再現できている.



(a) 水平荷重-水平変位の履歴



(b) 曲げモーメント-軸力の履歴

図-4 Case 1 の 3.5% ドリフト荷

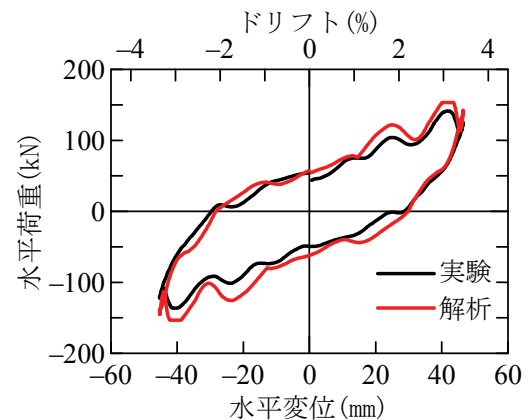


図-5 ファイバー解析による再現解析結果

##### (2) 軸力変動における最大引張力の大きさが損傷進展に及ぼす影響

軸力変動における最大引張力の大きさが異なる荷条件 Case 1 と Case 2 とを比較すると, Case 1 ではフーチングの表面から高さ  $500\text{mm}$  までの区間にひび割れが観察された一方で, Case 2 では同  $800\text{mm}$  までの区間にひび割れが観察された. 軸方向鉄筋の座屈発生はいずれもドリフト 4.0% 荷であったが, 軸方向鉄筋の座屈発生後は, 塑性ヒンジ部がせん断変形をしながら, 引張軸力から圧縮軸力への変化の際に橋脚基部におけるコアコンク

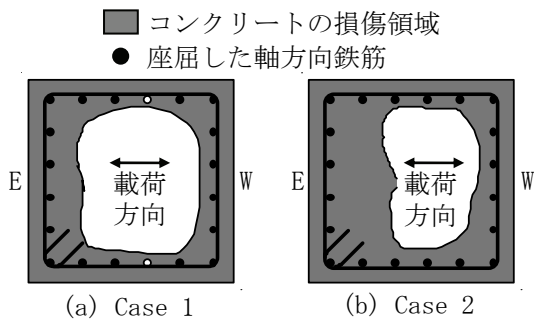


図-6 荷終了後における橋脚基部の損傷状況

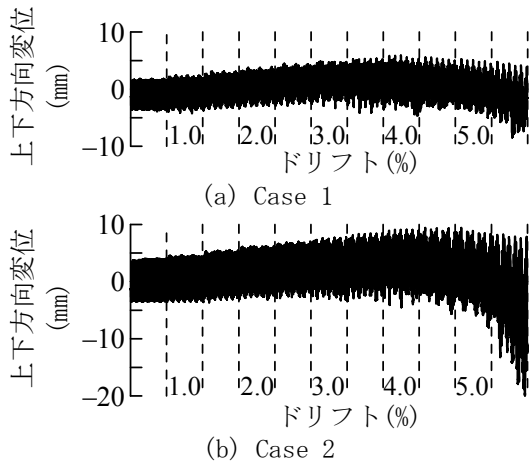


図-7 橋脚上端の上下方向変位

リートの未損傷部分が繰り返し押しつぶされ、コアコンクリートの圧壊が急速に進展した。橋脚基部において損傷が最も著しかったフーチング表面から高さ130mmにおける最終的な損傷状況を図-6に示すが、最大引張軸力の大きいCase 2の方がCase 1よりも大きくコアコンクリートが損傷していた。このように、最大引張軸力が大きいほど、軸方向鉄筋の座屈発生後にコアコンクリートの損傷が著しく進展することが確認された。

以上の最大引張軸力のコアコンクリートの損傷進展への影響は、橋脚上端における上下方向変位の観点からも確認された。図-7に鉛直上向きを正として橋脚上端における上下方向変位の履歴を示す。軸方向鉄筋の座屈が発生したドリフト4.0%荷重までは徐々に橋脚上端が鉛直上向きへとシフトしているが、これはフーチングからの軸方向鉄筋の抜け出しによるものである。軸方向鉄筋の座屈発生後は、コアコンクリートの損傷進展に応じて徐々に橋脚上端が下向きへとシフトしている。上下方向変位の振幅に着目すると、Case 1の場合、ドリフト0.5%荷重時で5mm、ドリフト5.5%荷重時で13mmと、コアコンクリートの損傷の進展や軸方向鉄筋の座屈の影響により、上下方向変位振幅が増加している。一方、最大引張軸力が大きいCase 2の場合には、ドリフト0.5%荷重時において7mm

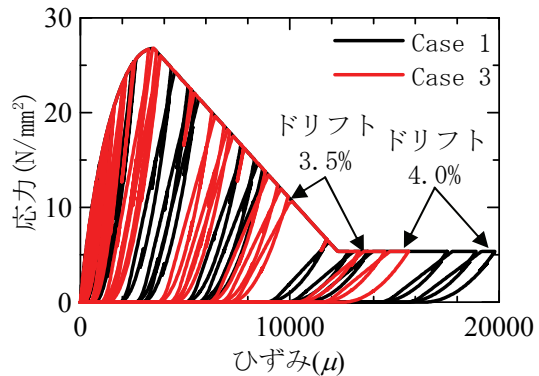


図-8 軸方向鉄筋位置におけるコアコンクリートの応力-ひずみの履歴

であったものが、ドリフト5.0%荷重時には14mm、ドリフト5.5%荷重時には28mmと、ドリフト0.5%荷重時の4倍程度まで急速に大きくなっている。Case 1とCase 2における軸方向鉄筋座屈発生後における上下方向変位振幅の増幅度の違いは、軸力変動における最大引張軸力の大きさの違いがコアコンクリートの損傷進展に及ぼす影響を示すものである。

### (3) 変動軸力と水平変位の位相差が損傷進展に及ぼす影響

図-5に示したように、大振幅の変動軸力を受けるRC橋脚に対してファイバー要素解析を適用することで、実験で得られる水平荷重-水平変位関係を良好に再現できるが、図-8にCase 1とCase 3の荷重条件の違いがコアコンクリートの圧縮側での応力-ひずみの履歴に及ぼす影響を示す。図-8に示されるように、Case 1におけるドリフト3.5%時のひずみがCase 3におけるドリフト4.0%時のひずみと同程度になるまで、Case 1のひずみの方が大きい。前記したように、Case 1は、曲げによる圧縮応力の荷重中に変動軸力による最大圧縮応力が付加的に作用する条件である一方で、Case 3は曲げによる圧縮応力の除荷中に変動軸力による最大圧縮応力が作用する。従って、曲げと軸力による圧縮応力の両者がコアコンクリートのひずみを増大させる荷重条件Case 1の方がCase 3よりも損傷進展が大きくなるのが事前解析の結果より推察された。

上記の事前解析の結果を受けて、荷重条件Case 1とCase 3の違いを実験的に検証した。その結果、損傷進展やひずみの観点からは顕著な違いは認められなかったが、その主たる要因としては、Case 1とCase 3のそれぞれで用いた供試体において、コンクリートの圧縮強度と帯鉄筋の降伏強度に意図したよりも大きな違いが生じてしまったことが挙げられる。一方で、実際の供試体を使用した各材料の強度をそれぞれ用いた再現解析を行

ったところ、両载荷条件においてコンクリートや鉄筋に生じるひずみがほぼ同程度であり、载荷実験の結果と整合していた。

以上より、同一の材料強度を有する供試体に対して、Case 1 と Case 3 の各条件で载荷条件を実施した場合には、曲げと軸力の重ね合わせの作用により圧縮側のコアコンクリートのひずみが増加する Case 1 の方が Case 3 よりも損傷進展が大きいと考えられる。断層近傍上下方向地震動の作用は、変動軸力と曲げの連成作用下での耐震設計を考えることになり、Case 1 のようにより損傷が大きくなるような荷重条件を念頭に耐震設計のあり方を検討していく必要がある。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

1. 松崎裕，熊谷祐二，川島一彦：断層近傍上下方向地震動による変動軸力下の RC 橋脚の耐震性に関する実験的研究，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，査読有り，印刷中

[学会発表] (計 3 件)

1. 松崎裕，熊谷祐二，川島一彦：断層近傍上下方向地震動による変動軸力下の RC 橋脚の耐震性に関する実験的研究，第 31 回土木学会地震工学研究発表会，2011 年 11 月 18 日，東京大学生産技術研究所
2. 松崎裕，熊谷祐二，川島一彦：断層近傍上下方向地震動による軸力変動が RC 橋脚の耐震性に及ぼす影響，日本地震工学会大会-2011，2011 年 11 月 10 日，国立オリンピック記念青少年総合センター
3. 松崎裕，熊谷祐二，川島一彦：短周期成分が卓越した上下方向地震動による軸力変動が RC 橋脚の履歴復元力特性に及ぼす影響に関する実験的研究，第 14 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム，2011 年 7 月 29 日，土木学会

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松崎 裕 (MATSUZAKI HIROSHI)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号：10506504

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：