

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

松崎 裕¹・熊谷 祐二²・川島 一彦³

¹正会員 博(工) 東京工業大学助教 大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

²正会員 修(工) 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

(現 八千代エンジニアリング(株) 総合事業本部 構造・橋梁部 (〒161-8575 東京都新宿区西落合2-18-12))

³フェロー 工博 東京工業大学教授 大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

1. はじめに

地震動の上下方向成分は水平方向成分に比べて小さく、また橋梁の地震応答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、上下方向地震動が橋梁の地震応答に及ぼす影響は重要視されてこなかった。一方で、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、強震観測網の充実により、断層近傍において、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上下方向地震動が観測されてきている。一関西記録については、Aoi et al.¹⁾は地盤のトランポリン効果によって上下方向地震動が増幅されたものとし、Ohmachi et al.²⁾は観測小屋のロッキング振動によって過大な加速度が観測された可能性を指摘している。このように、観測された地震動の発生メカニズムや特性に関しては様々な議論がなされているが、断層近傍においては、遠方とは異なり、短周期かつ大振幅の上下方向地震動が構造物に作用するのは事実であり、耐震設計の観点からは、こうした上下方向地震動が橋梁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。

こうした変動軸力がRC橋脚の耐震性に及ぼす影響に関する実験的研究として、堺・川島³⁾は、ラーメン橋脚の柱部材を対象に、水平変位の変動と同位相で生じる引張を含む軸力変動がRC橋脚の変形性能に及ぼす影響を検討している。また、Kim et al.⁴⁾は、水平方向地震動と上下方向地震動を同時入力したハイブリッド載荷実験を行っているが、入力している上下方向地震動の最大加速度は0.6g程度であり、

概ね圧縮の範囲内の変動軸力作用下での載荷実験となっている。一方、解析的研究として、松崎・川島⁵⁾は、一関西記録を用いた桁橋の動的解析を行い、短周期成分が卓越した上下方向地震動が作用した場合、橋梁の上下方向の固有周期に対応した短周期成分が卓越した上下方向地震動により、自重による圧縮力の大きさに匹敵する程の引張力を含む大振幅の軸力変動が橋脚基部に生じることを明らかにしている。Kim et al.⁶⁾は、強い上下方向地震動の作用下では、RC橋脚基部にせん断変形が生じることを考慮する必要がある、曲げとせん断の連成を考慮した地震応答解析を行うことで、履歴復元力特性をよく再現できることを示している。このように、変動軸力を受けるRC橋脚に関する研究は行われてきているが、一関西記録のように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橋脚の履歴復元力特性に及ぼす影響は実験事実として解明されていない。

そこで、本研究では、断層近傍の短周期成分が卓越した上下方向地震動により生じる引張力を含む短周期かつ大振幅の軸力変動がRC橋脚の履歴復元力特性に及ぼす影響を実験的に解明することを目的とする。

2. 実験供試体および載荷・計測方法

(1) 実験供試体の諸元

水平変位の変動と同位相で軸力変動を与えた堺・川島³⁾の実験結果と比較するべく、図-1に示すように、それらと同一寸法および同一配筋の2体の単柱式RC橋脚模型を用いて載荷実験を行った。後述するように、2体の供試体の水平方向載荷履歴は同一であり、軸力変動の与え方のみが異なる。

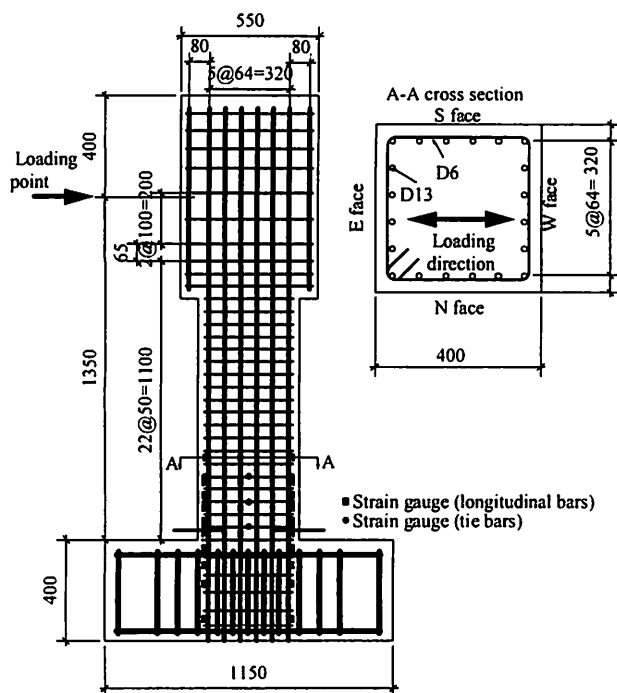


図-1 実験供試体の諸元

供試体は400mm×400mmの正方形断面であり、橋脚基部から頂部までの高さは1750mm、橋脚基部から水平力載荷点までの高さは1350mm、せん断支間比は3.75である。軸方向鉄筋にはD13-SD295(降伏強度374N/mm²)を20本配置し、軸方向鉄筋比は1.58%である。帯鉄筋はD6-SD295(降伏強度375N/mm²)を50mm間隔で配置しており、横拘束筋体積比は0.79%となる。帯鉄筋の定着長は100mmとし、135度曲がりフックを用いた。コンクリートの呼び強度は24N/mm²とした。材料試験により得られたコンクリート圧縮強度は24.7N/mm²である。上部構造の自重による圧縮力作用下での供試体の道路橋示方書⁷⁾に基づく地震時保有水平耐力は119kNであるのに対し、静的荷重に対するせん断耐力は215kNと、曲げ破壊型となるように設計されている。

(2) 載荷方法

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、図-1の橋脚模型と軸方向鉄筋比および横拘束筋体積比が等しくなるように、道路橋示方書⁷⁾に従って設計した実大規模橋脚を対象として、入力地震動を一関西記録とした動的解析を行った。図-2に軸力の時刻歴を示すが、引張1N/mm²～圧縮3N/mm²の変動軸力が繰返し作用し、その軸力変動の振動数は橋軸方向水平変位の振動数の10倍であった。

そこで、本研究では、水平変位変動の1サイクル当たり10サイクルの引張1N/mm²～圧縮3N/mm²の範

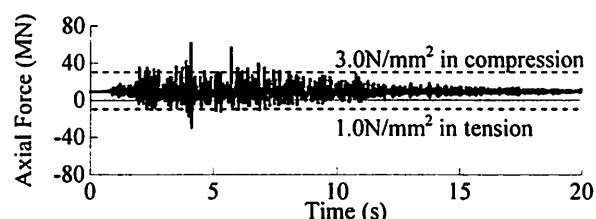
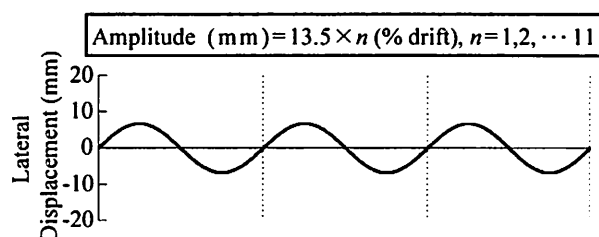
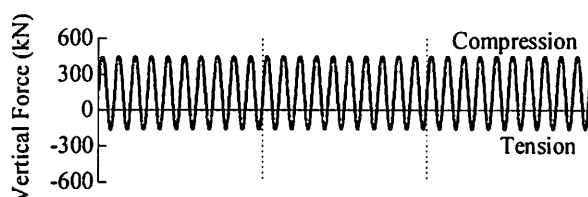


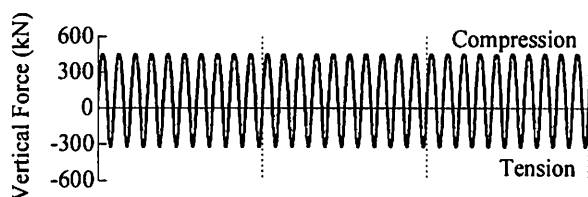
図-2 一関西記録を入力した場合の軸力の時刻歴



(a) 水平変位 (0.5%ドリフトの場合)



(b) Case 1 の軸力変動



(c) Case 2 の軸力変動

図-3 入力水平変位と各載荷条件における軸力変動

囲での軸力変動を基本とし、引張力の大きさがRC橋脚の耐震性に及ぼす影響を検討するため、軸力変動のサイクル数は変えずに、軸力変動の範囲を引張2N/mm²～圧縮3N/mm²とした場合も検討することとした。以下、引張1N/mm²～圧縮3N/mm²の軸力変動を与える載荷条件をCase 1、引張2N/mm²～圧縮3N/mm²の軸力変動を与える載荷条件をCase 2と呼ぶ。

Case 1およびCase 2のいずれの載荷条件も、図-3に示すように、同一変位振幅における水平変位の繰返し数は3回とし、水平変位変動の1サイクルの間に軸力変動が10サイクル生じるような載荷条件である。以下、水平加振機で押す側(W面方向への変位)を正載荷側、引張る側(E面方向への変位)を負載荷側と呼ぶ。なお、本実験は水平一方向の静的正負交番繰返載荷実験であるが、橋脚基部の損傷進展に伴い、載荷直角方向に傾斜することを防ぐため、載荷直角方向にも加振機を取り付けた。比較対象である堺・川島³⁾による一定圧縮軸力3N/mm²の載荷条件であるCase 3と、水平変位1サイクル当たり同位相で引張

表-1 載荷条件と材料物性

Loading Condition	Case 1	Case 2	Case 3 ³⁾	Case 4 ³⁾
Number of Cycles of Vertical Force per Cycle of Lateral Displacement	10		—	1
Amplitude of Stress due to Vertical Force (N/mm ²)	-1.0~2.8	-2.0~2.9	3.0	-1.0~2.7
Concrete Strength (N/mm ²)	24.7		23.0	
Yield Strength of Longitudinal Bars (N/mm ²)	374			
Longitudinal Reinforcement Ratio (%)	1.58			
Yield Strength of Tie Bars (N/mm ²)	375		363	
Volumetric Ratio of Tie Reinforcement (%)	0.79			

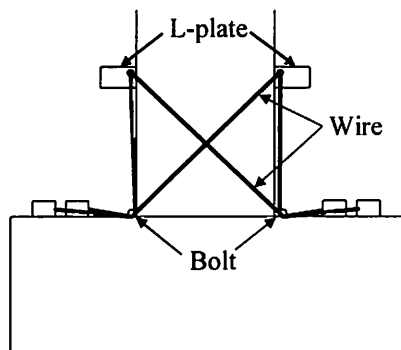


図-4 ワイヤー式変位計の設置図

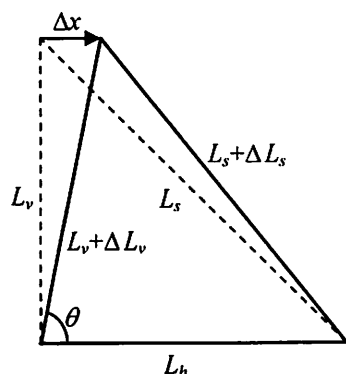


図-5 ワイヤーの伸びに関する幾何学的条件

1N/mm²～圧縮3N/mm²の軸力変動を1サイクル与える載荷条件であるCase 4を含めて、Case 1～Case 4の載荷条件を表-1にまとめて示す。なお、表-1に示すように、加振機の特長から、最大圧縮応力は3N/mm²には達していない。

(3) 橋脚基部1D区間の載荷方向水平変位の計測方法

引張力を含む軸力変動下では、塑性ヒンジ部にせん断変形が生じることが指摘されているため^{3), 6)}、本実験では、載荷直角面においてフーチング表面とフーチング表面から上方に1Dの位置との間の相対水平変位を図-4のようにワイヤー式変位計を用いて計測した。計測区間を1Dとしたのは、せん断変形が主に生じる塑性ヒンジ区間を0.5D程度と想定し、かぶりコンクリートの剥落の影響を受けない高さに、ワイヤー取り付けのためのL字型プレートを設置したためである。

図-5に示すワイヤーの伸びに関する幾何学的な

条件より、水平変位 Δx は式(1)のように算定される。

$$\Delta x = (L_v + \Delta L_v) \cos \theta \quad (1)$$

ここに、 L_v は鉛直方向に張られたワイヤーの元の長さであり、 ΔL_v は橋脚の変形に伴う同ワイヤーの伸びである。また、 θ は図-5のように、橋脚の変形後に鉛直方向に張られたワイヤーが水平方向となす角度であり、幾何学的な関係より、余弦定理に基づき、式(2)の関係式が成立する。

$$\cos \theta = \frac{(L_v + \Delta L_v)^2 + L_h^2 - (L_s + \Delta L_s)^2}{2(L_v + \Delta L_v)L_h} \quad (2)$$

ここに、 L_h はワイヤーを水平方向から鉛直方向あるいは斜め方向に変曲させるために設置されたボルト間の距離であり、 L_s は斜め方向に張られたワイヤーの元の長さ、 ΔL_s は同ワイヤーの橋脚の変形に伴う伸びである。

以上の水平変位 Δx には、式(3)で算定されるように、フーチングからの軸方向鉄筋の抜け出しに伴う橋脚基部の回転角 ϕ による水平変位 Δx_b が含まれる。フーチングからの軸方向鉄筋の抜け出し量は橋脚基部に設置された変位計によって計測された値より求める。

$$\Delta x_b = w\phi \quad (3)$$

ここに、 w は橋脚の幅(400mm)である。

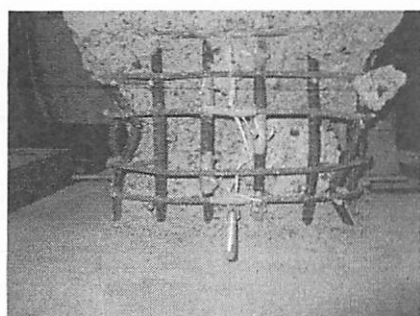
従って、フーチングからの軸方向鉄筋の抜け出しに伴う水平変位量を除去した塑性ヒンジ区間の水平変位は式(4)のように算定される。

$$\Delta x_s = \Delta x - \Delta x_b \quad (4)$$

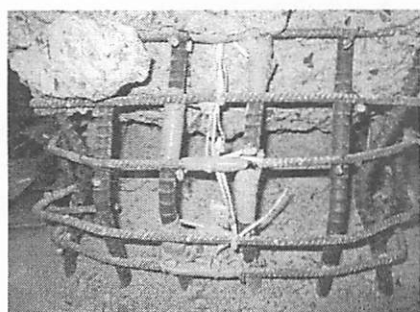
3. 短周期かつ大振幅の軸力変動がRC橋脚の履歴復元力特性に及ぼす影響

(1) 損傷状況

載荷条件Case 1, Case 2ともに、ドリフト1.0%載荷時において、最初に水平変位により引張側となるE面のフーチング表面から150mmおよび300mmの高



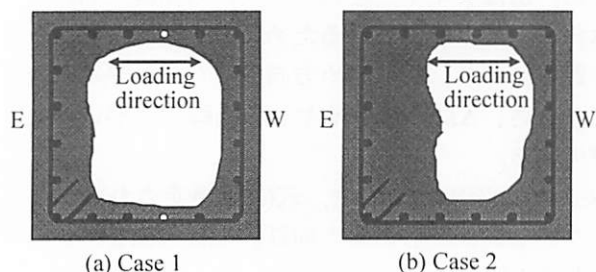
(a) Case 1



(b) Case 2

写真-1 E面のかぶりコンクリート除去後の損傷状況

■ : Crushed Concrete Area
● : Buckled Longitudinal Bar



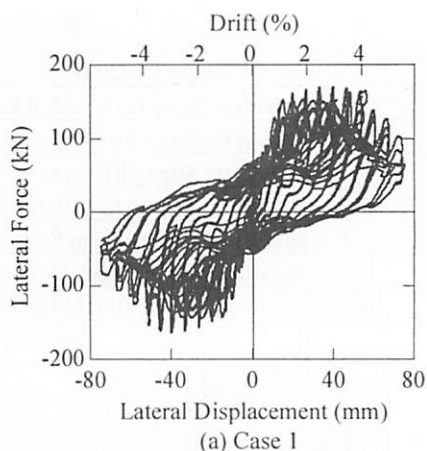
(a) Case 1

(b) Case 2

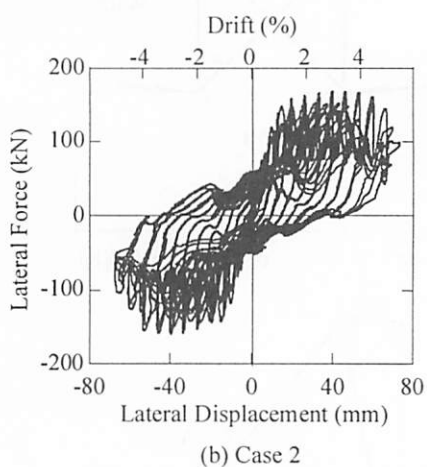
図-6 ドリフト 5.5% 載荷終了後の橋脚基部断面の損傷の比較

さに曲げひび割れが発生した。その後、載荷の進展に伴い、最終的にそれらのひび割れが全周に進展した。Case 1とCase 2のひび割れ状況の相違点は、Case 1ではフーチング表面から高さ600mm区間にひび割れが観察された一方で、Case 2では同800mm区間までの範囲にひび割れが観察された点である。これは、Case 2では最大引張軸力がCase 1の2倍の 2N/mm^2 と大きかったためである。いずれの載荷条件においても、ドリフト4.0%の負載荷時には、最大水平変位を迎える前の段階で、フーチング表面から150mmの高さを腹としてE面の軸方向鉄筋が面外に座屈するとともに、かぶりコンクリートが押し出されるように剥離し、ドリフト4.5%載荷においてE面のかぶりコンクリートが剥落した。

最終載荷であるドリフト5.5%載荷終了後において、E面を撮影した写真-1および図-6に示すように、



(a) Case 1



(b) Case 2

図-7 水平力-水平変位の履歴

コアコンクリートの損傷が最も大きかったのは最初に引張を受けるE面であり、最大引張力が大きい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。また、図-6に示すように、Case 1では20本中18本の軸方向鉄筋が座屈し、Case 2では全数の軸方向鉄筋が座屈した。破断した軸方向鉄筋は、いずれの載荷条件でも、SE方向の隅角部に位置する軸方向鉄筋1本であった。

(2) 水平力-水平変位の履歴

Case 1～Case 4における水平力-水平変位の履歴を図-7に示す。水平変位の変動1サイクルの間に10回の軸力変動が生じているため、軸力変動に応じて水平力が変化するような履歴を示している。その特性を詳しく見るために、ドリフト3.5%載荷の1サイクル目の水平力-水平変位の履歴および橋脚基部における曲げモーメント-軸力の履歴をそれぞれ図-8および図-9に示す。図-8および図-9におけるA～Fの記号はそれぞれ対応している。

図-8のA点で最大圧縮軸力を迎えた後、B点で最大引張軸力となることで復元力が低下し、その後、再度、最大圧縮軸力を迎えるC点に至るまでの経路

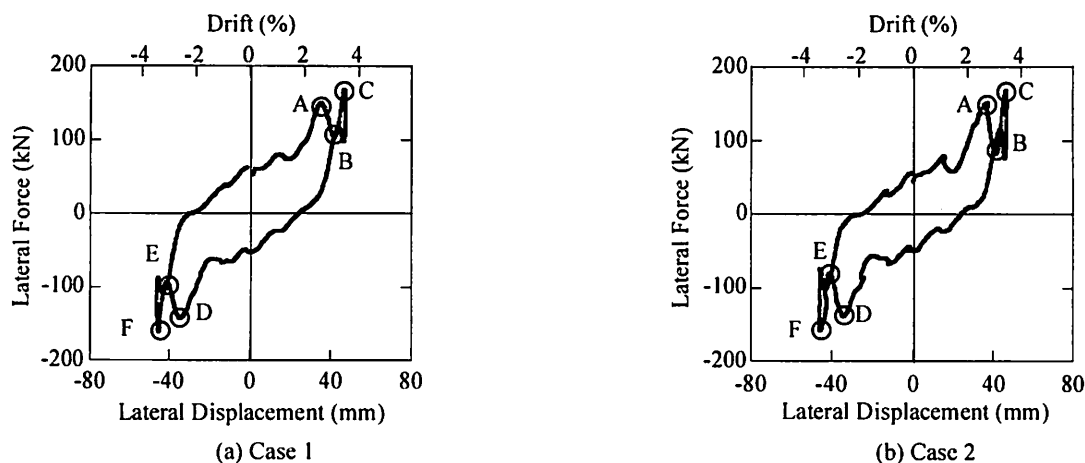


図-8 3.5%ドリフトにおける水平力-水平変位の履歴

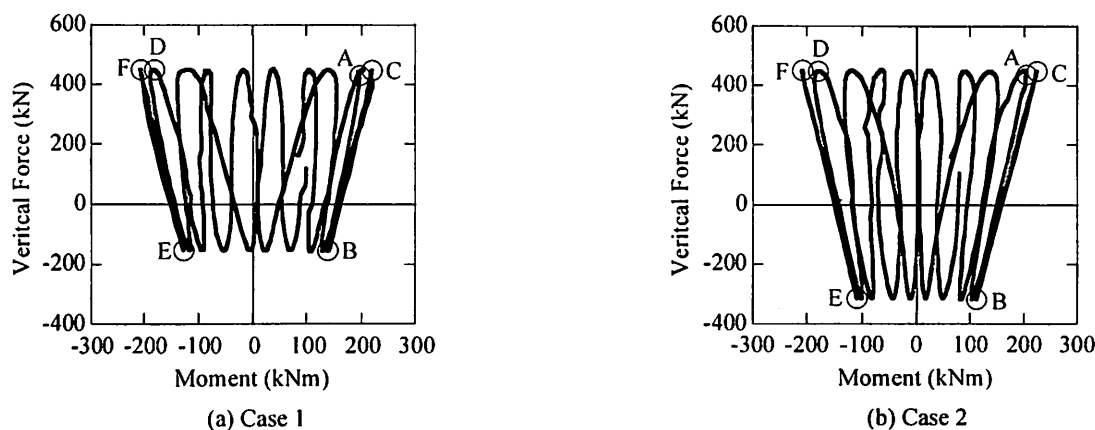


図-9 3.5%ドリフト時の橋脚基部における曲げモーメント-軸力の履歴

では、M-N相互図の包絡線上を移動している様子が図-9から分かる。3N/mm²程度の圧縮応力が作用している図-8(a)および(b)でのA点での復元力はCase 1とCase 2それぞれ150kNであるが、図-8(a)のB点に対応する引張応力1N/mm²作用時には104kNと69.3%まで低下し、図-8(a)のB点に対応する引張応力2N/mm²作用時には81.8kNと54.5%まで低下している。図-9からも明らかなように、この軸力変動の範囲では、軸力の大きさに応じて曲げ復元力の大きさはほぼ線形の関係で変化している。

(3) 履歴吸収エネルギー

各ドリフトの1サイクル目における履歴吸収エネルギーの累積値を図-10に示す。ドリフト3.5%載荷時に着目すると、一定圧縮軸力条件であるCase 3における履歴吸収エネルギー32.0kNmを基準として、Case 1ではその79.1%の25.3kNm、Case 2ではその73.8%の23.6kNm、Case 4ではその89.4%の28.6kNmまで低下している。Case 1とCase 4の相違は水平変位の変動1サイクル当たりの軸力変動のサイクル数の影響であり、図-8の水平力-水平変位の関係に示すように、特に引張力を受ける際に曲げ復元力が

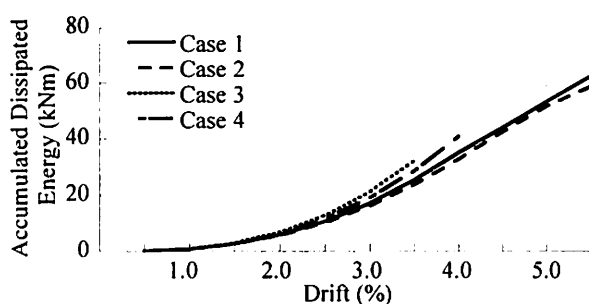


図-10 履歴吸収エネルギー

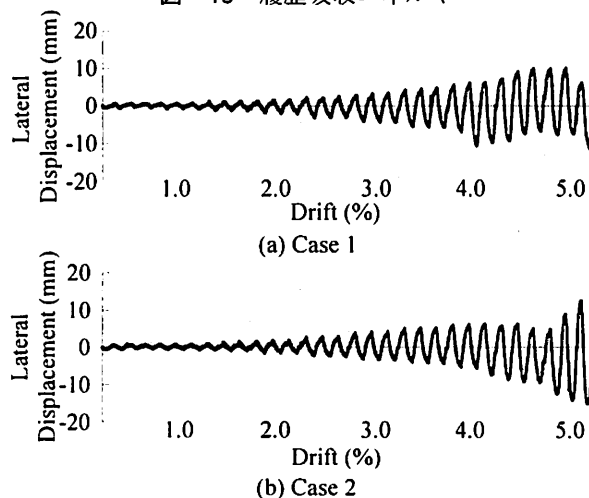
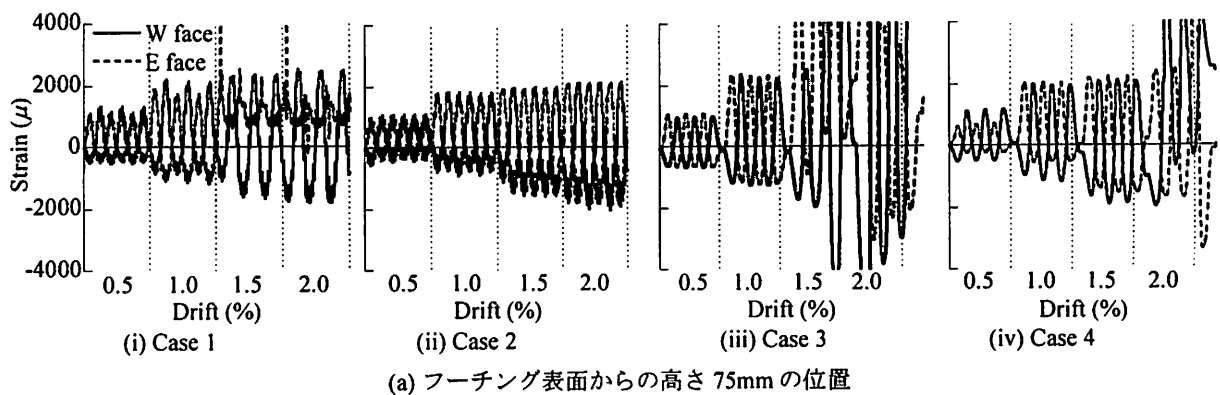
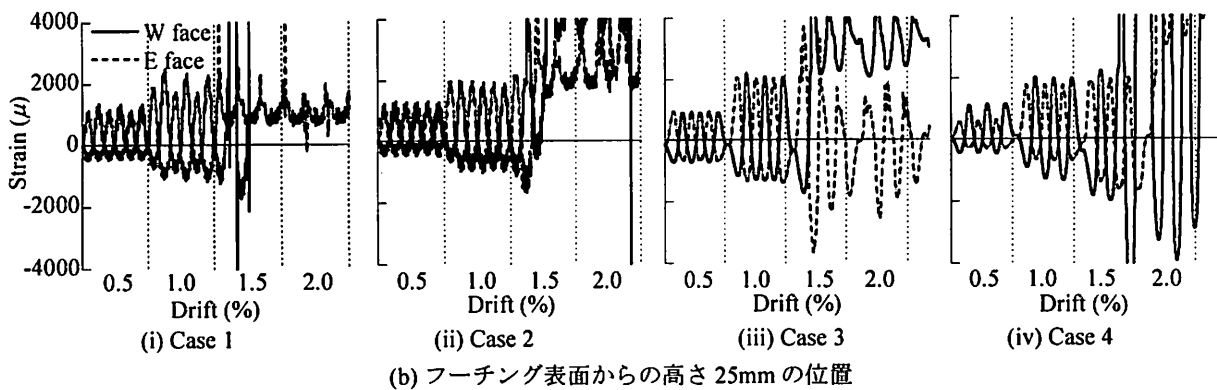


図-11 橋脚基部 1D 区間に生じた水平変位



(a) フーチング表面からの高さ 75mm の位置



(b) フーチング表面からの高さ 25mm の位置

図-12 軸方向鉄筋のひずみ

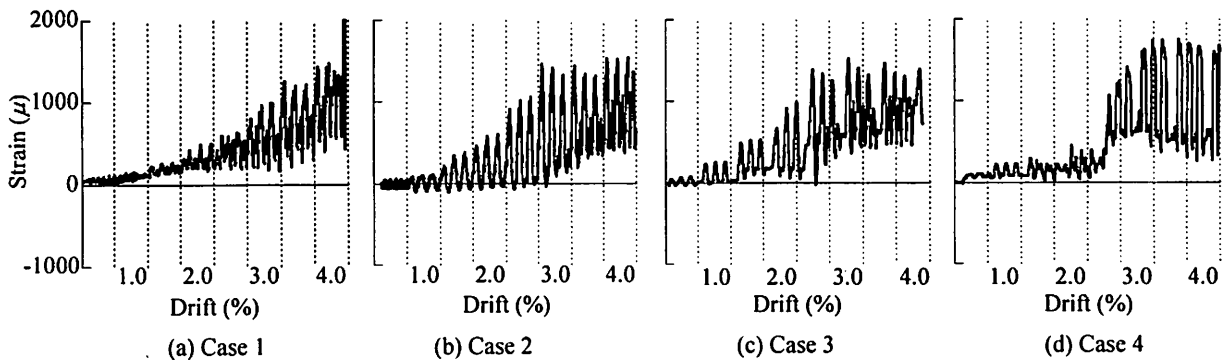


図-13 帯鉄筋のひずみ

大きく低下することと、軸力変動の回数が多いほど、繰返し大きなひずみを受けるため、コアコンクリートの損傷が進展し、履歴吸収エネルギーが小さくなっていることが確認される。また、Case 1とCase 2の相違は引張力の大きさであるが、繰返し大きな引張力が作用するほど、コアコンクリートが損傷し、履歴吸収エネルギーがより低下していることが分かる。

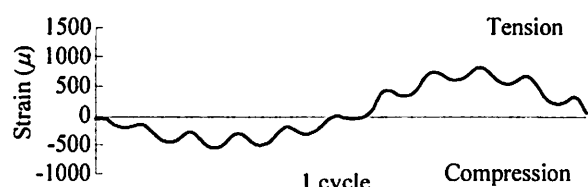
(4) 橋脚基部1D区間の水平変位

軸方向鉄筋の抜け出しの影響を式(4)により除去して評価した橋脚基部1D区間の水平変位を図-11に示す。ドリフト3.5%載荷までは、ドリフトの大きさに応じて、橋脚基部1D区間の水平変位は線形に増加しているが、軸方向鉄筋の座屈が生じたドリフト4.0%以降では、ドリフトの増加に対する橋脚基部1D区間の水平変位の増加が顕著となっている。これ

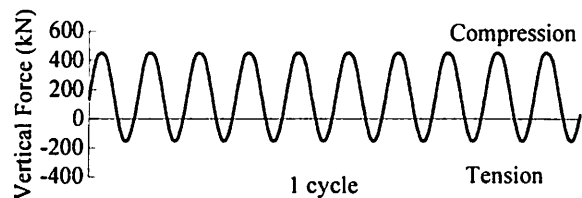
は、目視でも認められたように、軸方向鉄筋の座屈が生じたドリフト4.0%以降はコアコンクリートの損傷が激しく進展し、せん断変形が卓越したことを示している。

(5) 軸方向鉄筋および帯鉄筋のひずみ

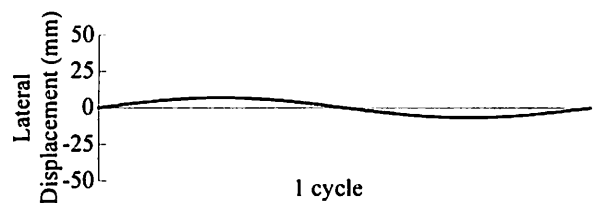
載荷面であるE面とW面のフーチング表面からの高さ25mm、75mmにおける軸方向鉄筋のひずみ、および載荷直角面であるS面のフーチング表面からの高さ150mmにおける帯鉄筋のひずみをそれぞれ図-12および図-13に示す。一定圧縮軸力を作用させているCase 3では、0.5%ドリフト、1.0%ドリフトと載荷が進むに連れて軸方向鉄筋に生じるひずみの大きさはドリフトの大きさに比例している一方で、引張を含む軸力が作用するCase 3以外の載荷条件では、図-12 (a)のCase 2やCase 4において顕著に認められ



(a) 軸方向鉄筋のひずみ

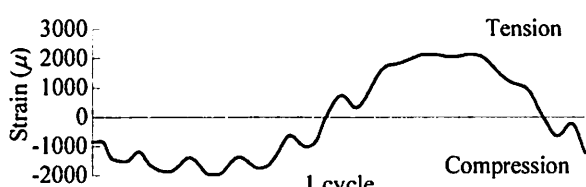


(b) 軸力

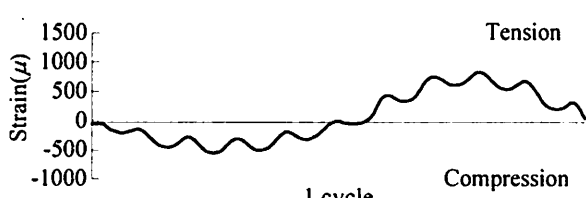


(c) 水平変位

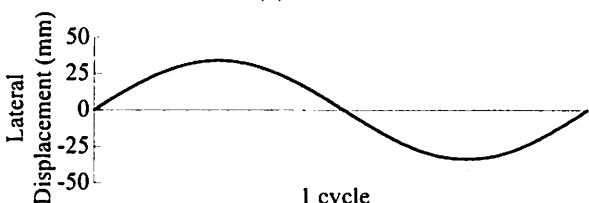
図-14 Case 1 のドリフト 0.5% 載荷における
軸方向鉄筋のひずみと軸力および水平変位の関係



(a) 軸方向鉄筋のひずみ



(b) 軸力



(c) 水平変位

図-15 Case 1 のドリフト 2.5% 載荷における
軸方向鉄筋のひずみと軸力および水平変位の関係

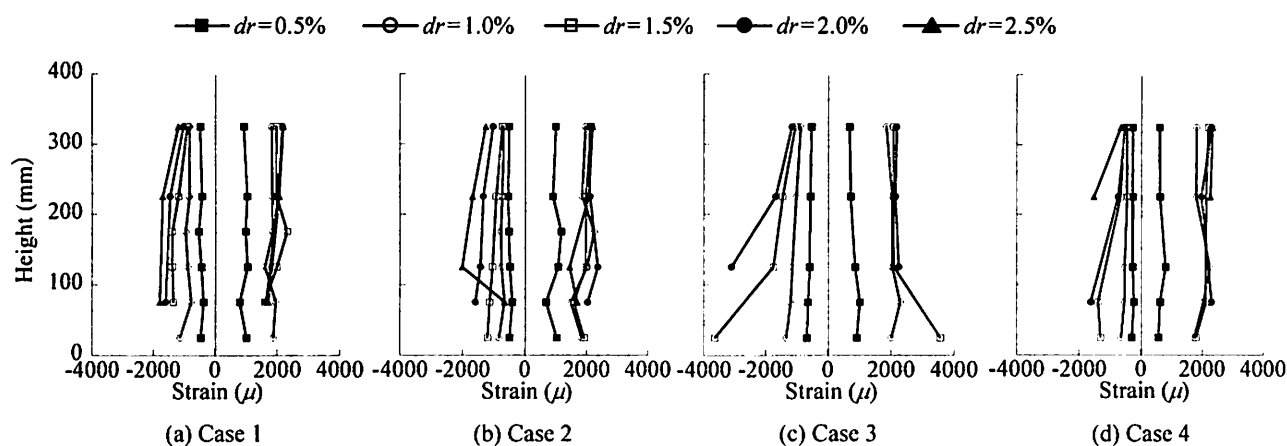


図-16 軸方向鉄筋のひずみの高さ方向分布

るように、軸方向鉄筋に生じるひずみはドリフトの大きさに比例するほどには増加していない。このように軸方向鉄筋のひずみがあまり増加していないのは、引張力を含む軸力変動下では、塑性ヒンジ部にせん断変形が生じることが指摘^{3), 6)}されているように、各載荷ドリフトに対応した水平変位が主に橋脚基部のせん断変形によってもたらされ、曲げ変形による水平変位の割合が減少していることを示している。なお、後述するが、Case 1 および Case 2 の軸方向鉄筋の圧縮側のひずみが水平変位変動の1サイクル中に変動しているのは、軸力変動の影響によるものであり、引張側のひずみについては軸力変動の影響が認められないことに注意されたい。

Case 1 の0.5%ドリフト載荷および2.5%ドリフト載荷の各1サイクル目におけるW面の軸方向鉄筋のひずみ履歴を図-14～図-15に示す。まず、ドリフト0.5%載荷の場合に着目すると、この載荷段階では曲げ変形が小さいわけだが、図-14(a)に示されるように、軸方向鉄筋のひずみは、圧縮側であっても引張側であっても、同様に軸力変動に対応してひずみが増加している。一方で、同じCase 1で水平変位が大きいドリフト2.5%載荷の場合に着目すると、図-15(a)に示されるように、水平変位によって引張ひずみが生じている際には、軸力が変動しているにもかかわらず、軸方向鉄筋のひずみはそれに対応した変動を示していない。図-12からも確認されるように、

この現象は、他のドリフトやCase 2でも共通に認められた。

各ドリフト1回目の最大変位時におけるE面の軸方向鉄筋のひずみに関する高さ方向の分布を図-16に示す。正の値のひずみは正載荷時の引張ひずみ、負の値のひずみは負載荷時の圧縮ひずみに対応する。一定圧縮軸力下のCase 3では、ドリフトが大きくなるのに連れて、圧縮側、引張側ともに、ひずみが大きくなっているが、引張を含む軸力変動を与えたCase 3以外の載荷条件に着目すると、ドリフトが大きくなっても軸方向鉄筋のひずみは圧縮側、引張側ともに増加してなく、また高さ方向にほぼ一定のひずみ分布となっている。このことは、前述したように、引張軸力作用下では、各載荷ドリフトに対応した水平変位が主に橋脚基部のせん断変形によってもたらされ、曲げ変形によって生じる水平変位の割合が減少していることを示している。

4. 結論

本研究では、水平変位の変動に比べて短周期かつ引張力を含む大振幅の軸力変動が断層近傍の上下方向地震動によって生じることを模擬し、引張 1N/mm^2 ～圧縮 3N/mm^2 および引張 2N/mm^2 ～圧縮 3N/mm^2 の範囲での軸力変動が水平変位1サイクル当たり10回生じる載荷条件でRC橋脚の静的正負交番繰返実験を行い、短周期かつ大振幅の軸力変動がRC橋脚の履歴復元力特性に及ぼす影響を検討した。本研究により得られた結論は以下の通りである。

- 1) 水平変位の変動と同位相で変動軸力が作用した場合に比べて、短周期成分が卓越した地震動により水平変位変動の1サイクルに複数回の引張を含む変動軸力を受ける結果、引張力を受けることによって曲げ復元力が低下し、またコアコンクリートの損傷がより大きく進展する。その結果、水平変位の変動と同位相の変動軸力が作用した場合に比べて、上下方向地震動による変動軸力が作用した場合には、履歴吸収エネルギーが約1割小さな値となっている。
- 2) 変動軸力の最大応力を 1N/mm^2 から 2N/mm^2 へと増加させた場合、ひび割れの発生区間が高さ方向に大きくなるとともに、コアコンクリートの損傷は更に大きく進展した。また、本実験の範囲の変動軸力では、曲げ復元力の大きさは、軸力の大きさに応じてM-N相互作用図の包絡線上をほぼ線形に変化する。

- 3) ワイヤ式変位計を活用して、橋脚基部における水平変位の計測を試みたが、特に、軸方向鉄筋の座屈が生じたドリフト4.0%以降では、水平変位量が急増した。これは、コアコンクリートの損傷進展に伴うせん断変形の影響であると考えられる。
- 4) 引張力を含む変動軸力下での降伏後の軸方向鉄筋のひずみ履歴を見ると、圧縮側では、軸力変動に対応してひずみの変動が生じているが、引張側では、軸力変動に伴うひずみの変動が認められない。また、軸方向鉄筋の高さ方向の分布については、ドリフトが大きくなっても軸方向鉄筋のひずみはそれほど大きくならず、せん断変形の影響が指摘される。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金(課題番号22760338、研究代表者：松崎裕)により実施しました。載荷実験に際しては東京工業大学川島研究室のメンバーに御助力を頂きました。また、(独)防災科学技術研究所のKiK-netによる強震記録を使用致しました。ここに記して厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) Aoi, S., Kunugi, T. and Fujiwara, H. : Trampoline Effect in Extreme Ground Motion, *Science*, 322, pp. 727-730, 2008.
- 2) Ohmachi, T., Inoue, S., Mizuno, K. and Yamada, M. : Probable Causes of Extreme Acceleration Recorded at the KiK-net Iwth25 during the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku, Japan, Earthquake, *Proceedings of 3rd Asia Conference on Earthquake Engineering*, P-017, Bangkok, Thailand, 2010.
- 3) 堺淳一, 川島一彦 : 引張軸力を含む軸力変動が RC 橋脚の変形性能に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol. 48A, pp. 735-746, 2002.
- 4) Kim, S. J., Holub, C. J. and Elnashai, A. S.: Experimental Investigation of the Behavior of RC Bridge Piers Subjected to Horizontal and Vertical Earthquake Motion, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol. 33, No. 7, 2011.
- 5) 松崎裕, 川島一彦 : 短周期成分が卓越した上下方向地震動が橋梁の地震応答に及ぼす影響, 土木学会地震工学論文集, 第 30 巻, pp. 499-506, 2009.
- 6) Kim, S. J., Holub, C. J. and Elnashai, A. S.: Analytical Assessment of the Effect of Vertical Earthquake Motion on RC Bridge Piers, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 137, No. 2, 2011.
- 7) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002.