

斜角を有する鉄筋コンクリート壁式橋脚の 急制動加振実験に関する一考察

京田英宏¹・佐藤昌志²・熊谷健一³・三上 隆⁴・西 弘明⁵・石川博之⁶

¹正会員 工修 (株) 構研エンジニアリング 橋梁部 (〒065-8510 北海道札幌市東区北18条東17丁目1-1)

²正会員 工博 国土交通省北海道開発局 建設部道路維持課 (〒060-8510 札幌市北区北8条西2丁目札幌第一合同庁舎)

³正会員 工修 いであ(株) 札幌支店 (〒060-0062 札幌市中央区南2条西9丁目1-2 サンケン札幌ビル)

⁴フェロー 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科北方圏環境政策工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

⁵正会員 工博 (独) 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

⁶正会員 (独) 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

1. はじめに

一般に、河川橋では、河川管理上の制約から幅厚比が3以上の鉄筋コンクリート壁式橋脚（以下、RC壁式橋脚と称す）が数多く建設されている状況にある。また、河川橋ならびに高架橋には、架橋地点における交差条件により下部構造を橋軸方向に対して斜めに配置する斜橋となる場合が少なくない。このような斜橋を支持する橋脚を本論文では斜角を有する橋脚と呼ぶこととする。

斜角を有する橋脚は、橋軸方向および橋軸直角方向と橋脚断面の主軸方向が一致しないため、その地震時挙動が直橋の場合とは異なることが予想される。佐藤・岡田¹⁾は、斜角をパラメーターとする小型のRC壁式橋脚模型を制作して静的単調載荷実験を実施し、斜角の有無による破壊モードの違いについて指摘している。しかしながら、斜角を有する橋脚の動的挙動に関する検討例は皆無に等しい。

そこで、本研究では斜角を有するRC壁式橋脚を対象とした合理的な実験方法、耐震設計法および耐震補強法を確立するための有用な知見を得ることを目的として、斜角の有無をパラメーターとするRC壁式橋脚を用いた急制動加振実験^{2)~5)}を実施し、弾性域における動的挙動について基礎的な検討を行った。本実験法は、橋梁上部構造を模擬した桁とそれを支持する橋脚模型で構成された橋梁全体模型を載せた架台を橋軸方向に滑走させた後、反力壁を利用して急制動をかけることにより橋脚模型を加振するものである。

2. 実験概要

(1) 実験装置および実験方法

図-1には、実験装置の概要図を示している。本装置は、橋梁全体模型を載せた架台をリニアレール上に設置し、コイルばねを用いて橋軸方向に滑走させた後、反力壁を利用して架台に急制動をかけることにより、橋脚模型を加振するものである。なお、架台は、反力壁に到達後、固定チャックによりその移動を拘束される仕組みとなっている。

斜角を有する壁式橋脚は、橋梁の主軸方向である橋軸方向および橋軸直角方向と橋脚断面の主軸方向が異なることから、橋脚を対象とした実験においても上部構造の影響を反映する必要があるものと考えられる。そこで、本実験では橋梁上部構造を模擬した桁とそれを支持する橋脚模型からなる二径間連続桁橋模型を使用することとした。

橋梁模型は、長さ11.0m、総重量22.5kNの上部構造を模擬した桁と、支承を介して桁を支持する橋脚模型からなる。中間支点はピン支承による固定支持とし、面内の回転のみ許容している。ここで、面内とは橋軸直角方向軸に直行する平面を意味している。端支点については、橋軸方向に対してはローラー支承による可動支持、橋軸直角方向に対してはピンローラーによる固定支持としている。

上部構造を模擬した桁は、1支承線上に2基の支承を設置可能とする桁幅700mm、桁高274mmの箱桁構造を

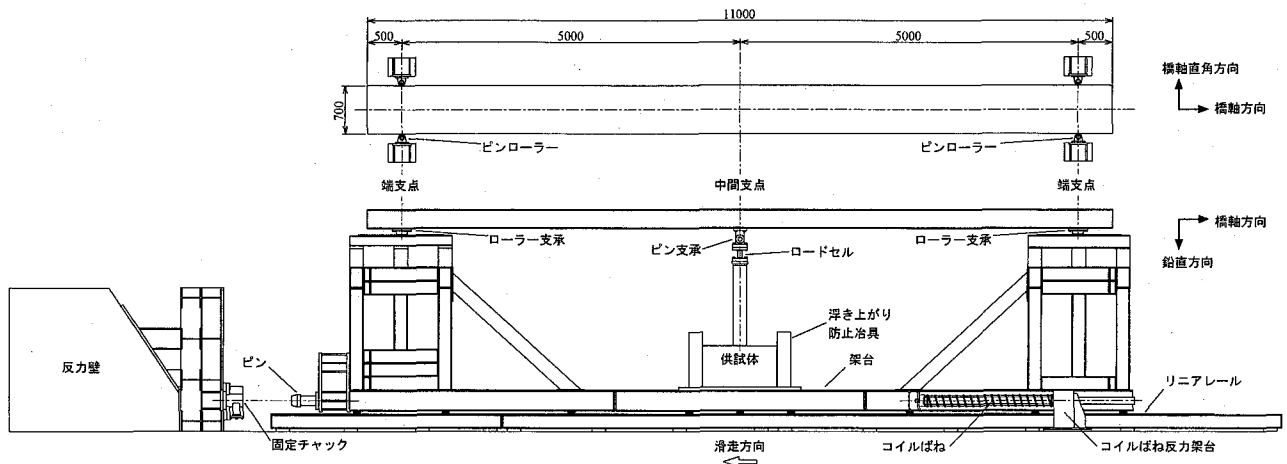


図-1 荷重装置の概要図

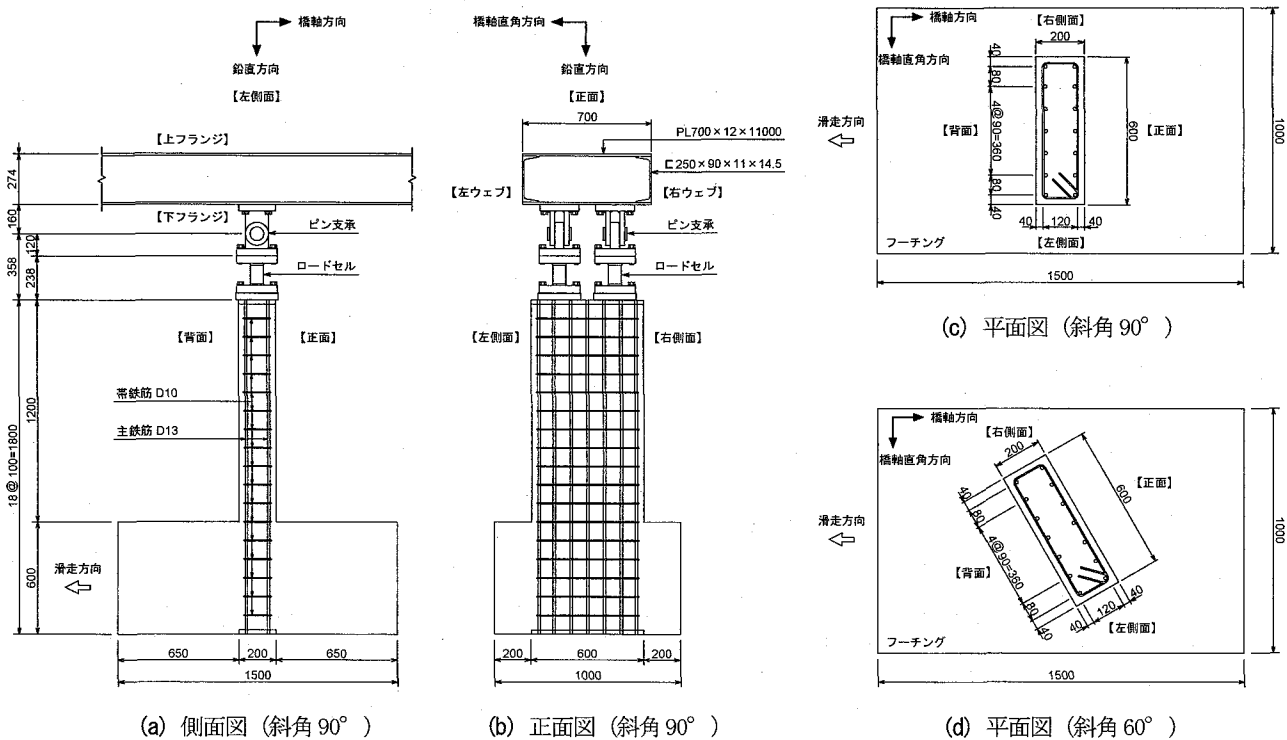


図-2 実験供試体の形状図および配筋図

表-1 実験供試体の諸元

斜角	断面 (mm×mm)	主鉄筋			帯鉄筋			コンクリート 圧縮強度 (MPa)
		種類 ／径	降伏点 (MPa)	鉄筋比 (%)	種類 ／径	降伏点 (MPa)	鉄筋比 (%)	
90°	200×600	SD345	401	1.48	SD295	375	0.24	26.0
60°		D13			D10			26.2

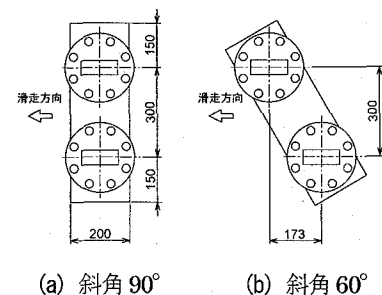


図-3 支承配置図

採用した。また、支点部および支点間中央部の箱桁内空には、局部座屈および断面変形を防止する目的でダイヤフラムを設置している。また、本実験は RC 壁式橋脚の

動的挙動の把握を目的としているため、桁、支承およびフーチングには、橋脚模型に比して十分な耐力を与えている。

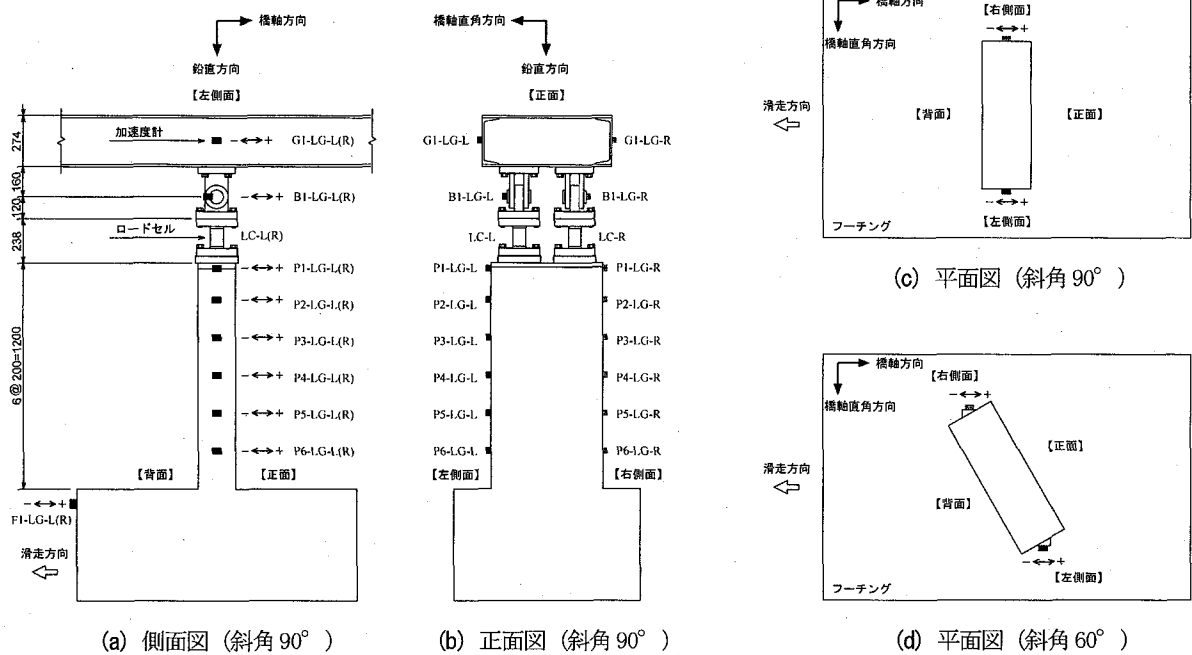


図-4 計測位置図

(2) 実験供試体

道路橋示方書（V耐震設計編）・同解説⁶⁾によれば、橋脚の耐震設計は、直橋（斜角 90° ）の場合には、橋軸方向と橋軸直角方向に対して行い、斜橋（斜角 60° 未満）の場合には、土圧の水平成分の作用方向とその直角方向に対して行う。なお、斜角が大きい斜橋（斜角 60° 以上）の場合には、計算の簡便さを考えて直橋（斜角 90° ）と見なして橋軸方向および橋軸直角方向の慣性力を求め、これをそれぞれ土圧の水平成分の作用方向およびこれに直角方向の慣性力とみなしてよいとされている。本実験は加振方向を橋軸方向に限定していることから、直橋である斜角 90° と直橋と見なして設計が行われる下限値である斜角 60° の2タイプを実験対象とした。

図-2には実験供試体の形状図および配筋図を、また、表-1には実験供試体の諸元を、材料試験結果と併せて示している。実験供試体は斜角以外の仕様をすべて同一としている。形状および配筋については既往の研究^{1),7)}を踏襲し、壁幅600mm、壁厚200mm、脚高1,200mmのRC壁式橋脚（幅厚比3）とした。支点高1,558mm、せん断支間比9.7である。また、支承を介して橋脚模型が支持する桁の重量は13.6kNであり、実橋に比して橋脚模型に作用する軸応力（ 0.11N/mm^2 ）は小さいが、上載重量の調整は特に行ってない。なお、中間支点のピン支承の下には、鉛直反力計測用のロードセルを設置している。

図-3には、中間支点における支承配置図を示している。橋脚模型が支持する中間支点のピン支承および端支点のローラー支承については、支承2基を中心間隔300mmで設置している。また、斜角 60° の場合には、端支点の

ローラー支承およびピンローラーについても中間支点のピン支承と同様に斜角を持たせて設置している。なお、中間支点のピン支承は、斜角 60° の場合についても橋軸方向に正対させて設置し、面内の回転を許容している。

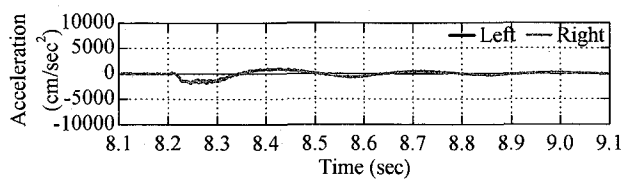
図-4には、加速度計およびロードセルの設置位置図を示している。振動計測には加速度計を使用し、桁、支承、橋脚およびフーチングの左右側面における橋軸方向成分をサンプリング周波数500Hzで記録している。また、中間支点のピン支承の下にはロードセルを設置し、加振時における鉛直反力の変動量を計測している。なお、加速度については架台滑走方向の反対側、鉛直反力については引張を正と定めている。

3. 実験結果および考察

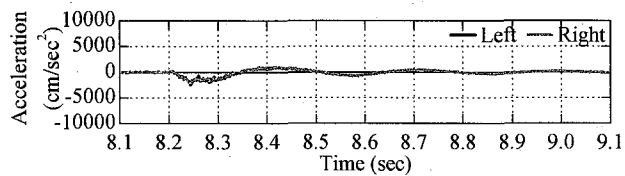
実験は、斜角 90° および斜角 60° の供試体に対して、衝突速度を増加させながら破壊に至るまで繰り返し実施している。本論文では、弾性域における動的挙動に限定して検討するものとし、何れの供試体も架台の衝突速度が1.0m/secのケースを選定した。なお、何れの供試体も本検討ケースの実施前後において、水平ひび割れは認められたが、コンクリートの剥離および剥落は発生していない。

(1) 加速度波形およびフーリエスペクトル

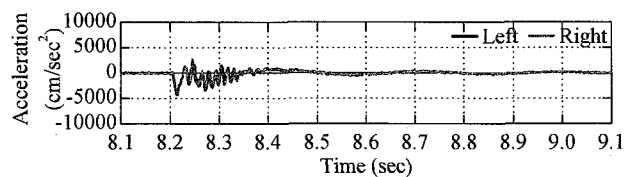
図-5および図-6には、斜角 90° の場合の桁、支承、橋脚およびフーチングにおける加速度波形とそのフーリエスペクトルについて左右両側面の結果を重ねて示して



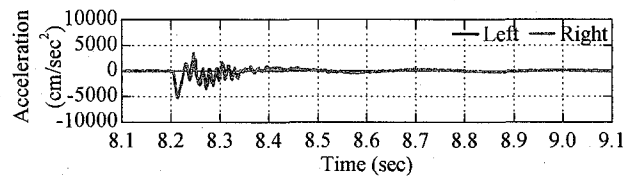
(a) G1-LG-L, -R



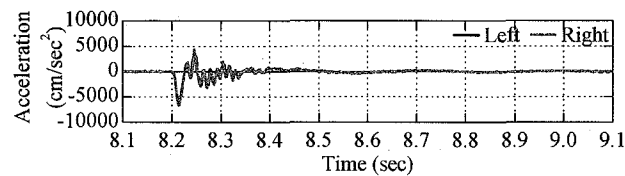
(b) B1-LG-L, -R



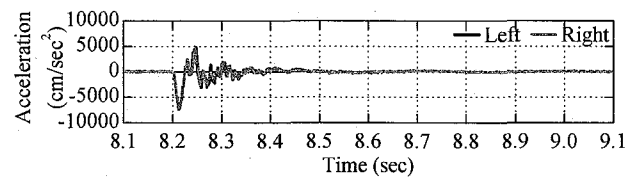
(c) P1-LG-L, -R



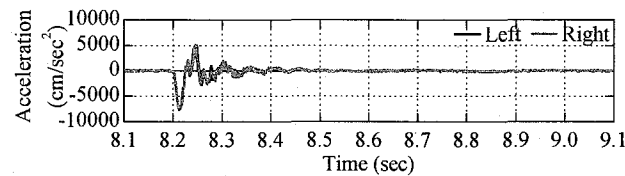
(d) P2-LG-L, -R



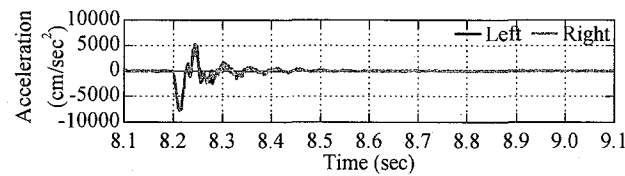
(e) P3-LG-L, -R



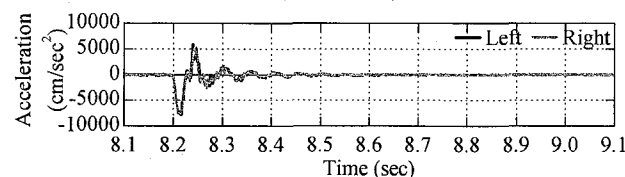
(f) P4-LG-L, -R



(g) P5-LG-L, -R

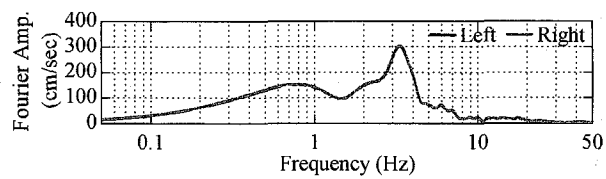


(h) P6-LG-L, -R

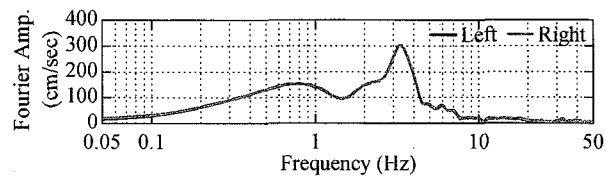


(i) F1-LG-L, -R

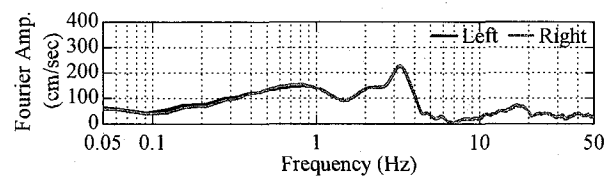
図-5 加速度波形 (斜角 90°)



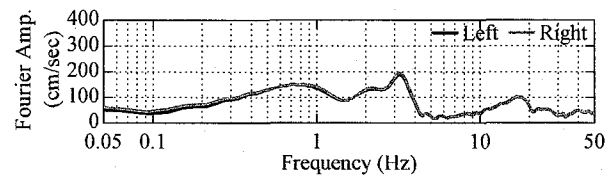
(a) G1-LG-L, -R



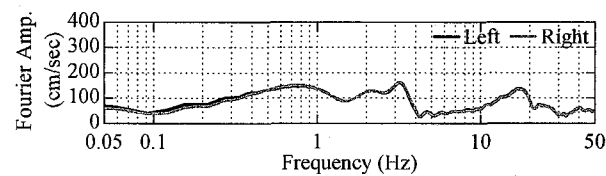
(b) B1-LG-L, -R



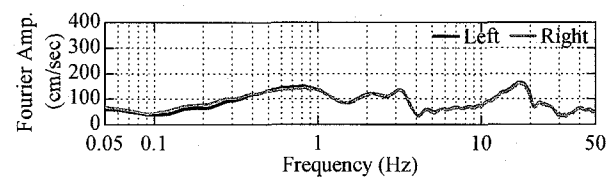
(c) P1-LG-L, -R



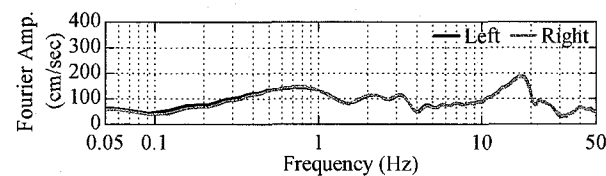
(d) P2-LG-L, -R



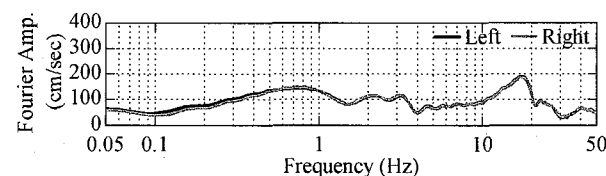
(e) P3-LG-L, -R



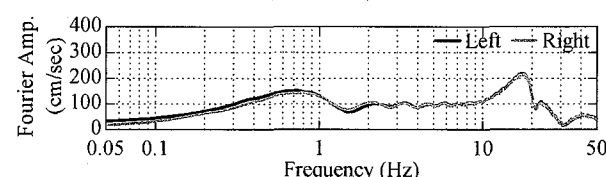
(f) P4-LG-L, -R



(g) P5-LG-L, -R

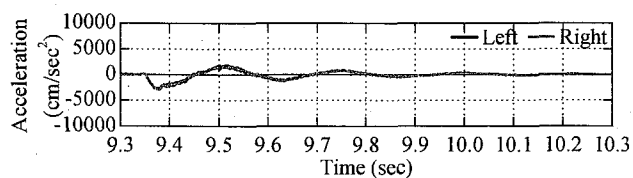


(h) P6-LG-L, -R

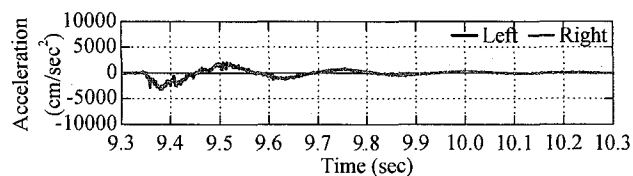


(i) F1-LG-L, -R

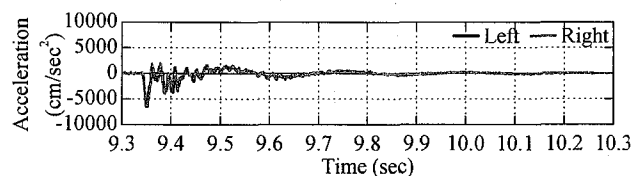
図-6 フーリエスペクトル (斜角 90°)



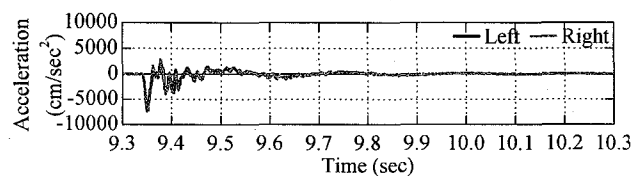
(a) G1-LG-L, -R



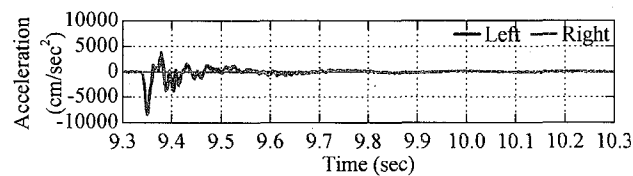
(b) B1-LG-L, -R



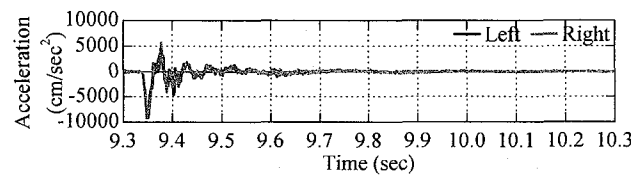
(c) P1-LG-L, -R



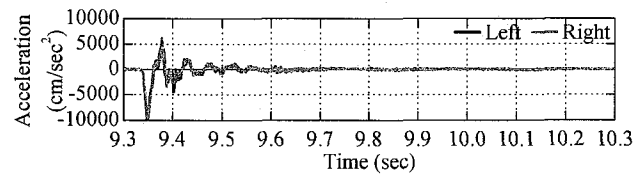
(d) P2-LG-L, -R



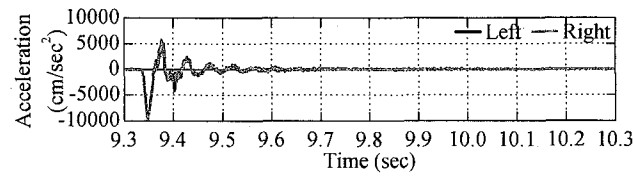
(e) P3-LG-L, -R



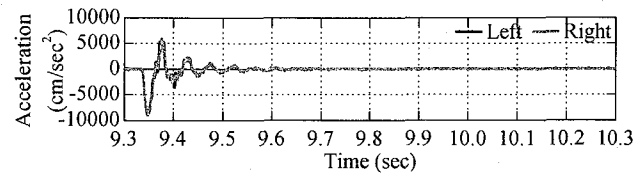
(f) P4-LG-L, -R



(g) P5-LG-L, -R

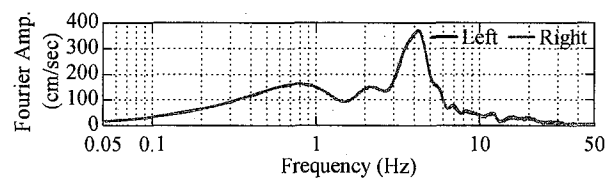


(h) P6-LG-L, -R

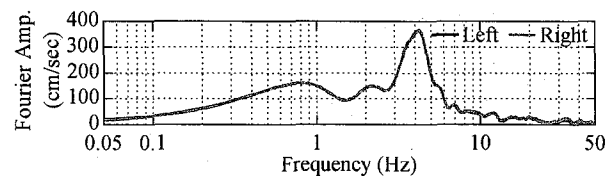


(i) F1-LG-L, -R

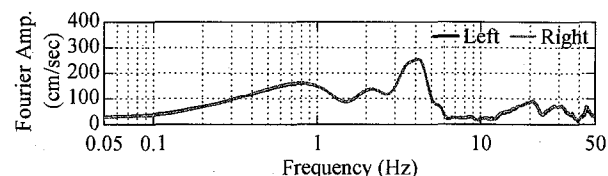
図-7 加速度波形 (斜角 60°)



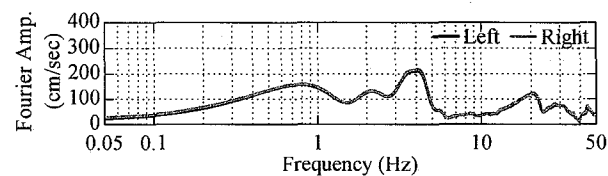
(a) G1-LG-L, -R



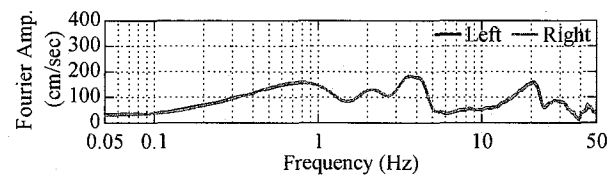
(b) B1-LG-L, -R



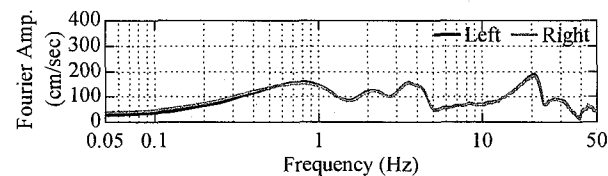
(c) P1-LG-L, -R



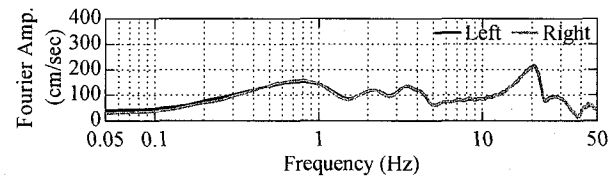
(d) P2-LG-L, -R



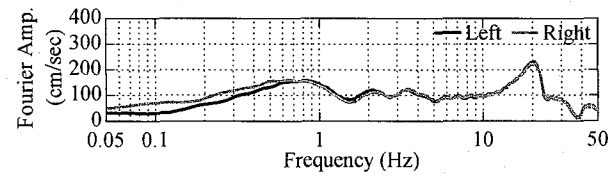
(e) P3-LG-L, -R



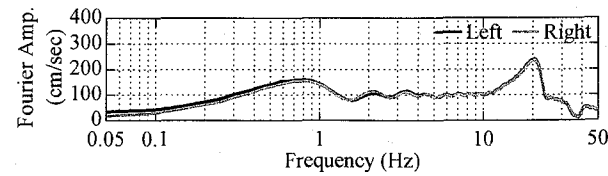
(f) P4-LG-L, -R



(g) P5-LG-L, -R

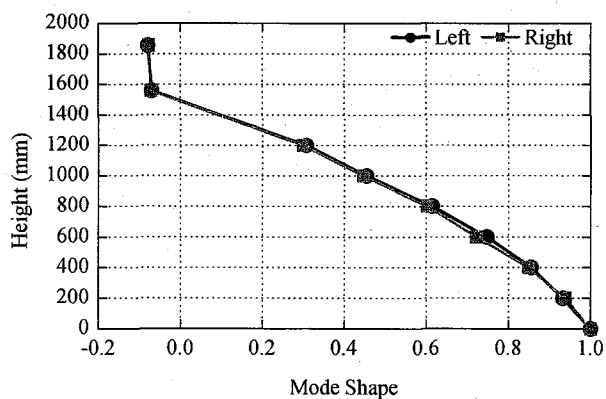


(h) P6-LG-L, -R

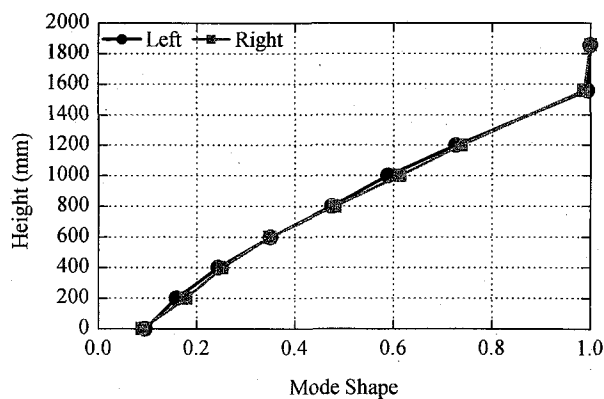


(i) F1-LG-L, -R

図-8 フーリエスペクトル (斜角 60°)

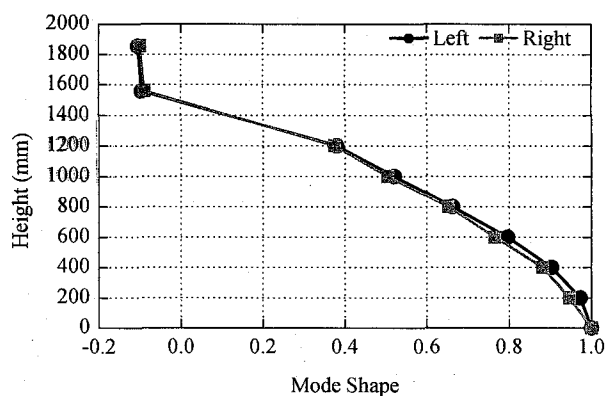


(a) フーチングにおける卓越周期 (17.6Hz)

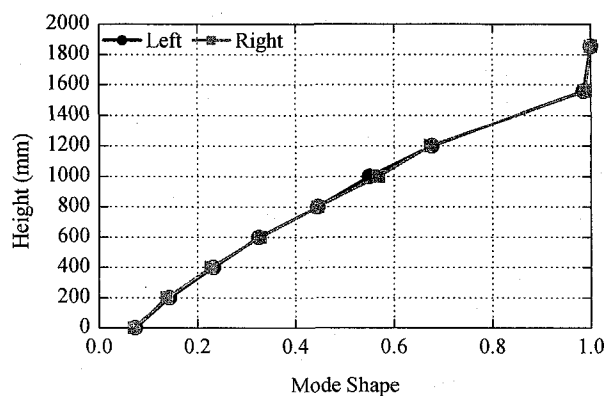


(b) 桁における卓越周期 (3.3Hz)

図-9 振動モード (斜角 90°)



(a) フーチングにおける卓越周期 (20.6Hz)



(b) 桁における卓越周期 (4.2Hz)

図-10 振動モード (斜角 60°)

いる。同様に、図-7 および図-8 には、斜角 60° の場合の加速度波形とそのフーリエスペクトルを示している。なお、加速度波形については、計測時間 17.0 秒間のうち急制動直前から応答が収束するまでの 1.0 秒間について表示している。また、フーリエスペクトルの算出には、計測時間 17.0 秒間のデータをすべて使用している。

a) 斜角 90°

まず、各計測位置における左右両側面の加速度波形とそのフーリエスペクトルを比較すると、両者は良く一致しており橋軸方向に対して左右対称に振動していることが分かる。したがって、本計測結果は妥当なものと判断できる。

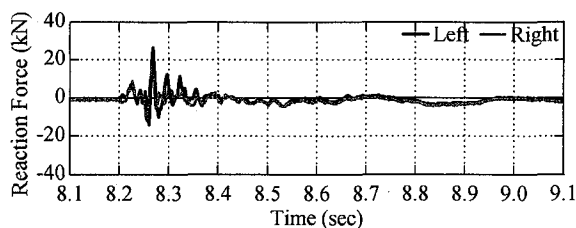
次に、急制動直後の加速度波形について着目すると、フーチングにおける入力加速度が橋脚上方へ応答加速度として推移している状況が確認できる。これはフーリエスペクトルの 17.6Hz のピーク性状と符合することから、急制動による入力波の周期は 17.6Hz と推察される。この急制動による入力波が半波長を経過した後、桁の加速度は最大に達し、その応答が橋脚下方へと推移している。したがって、橋脚が自由振動状態に移行したものと推察

される。また、フーリエスペクトルのピーク性状から、自由振動時の周期は 3.3Hz と判断できる。

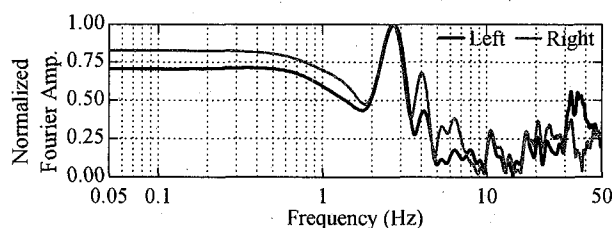
b) 斜角 60°

まず、各計測位置における左右両側面の加速度波形とそのフーリエスペクトルを比較すると、斜角 90° の場合と同様に両者は良く一致しており斜角の有無による明瞭な差は見られない。

次に、急制動直後の加速度波形について着目すると、斜角 90° の場合と同様、フーチングにおける入力加速度が橋脚上方へ応答加速度として推移しており、フーリエスペクトルのピーク性状から急制動による入力波の周期は 20.6Hz と推察される。この急制動による入力波が半波長を経過後、桁の加速度は最大に達し、その応答加速度が橋脚下方へと推移していることから、橋脚が自由振動状態に移行したものと推察される。なお、自由振動時の周期については斜角 90° の場合のように明瞭ではなく、フーリエスペクトルには 4.2Hz と斜角 90° の場合と同じ 3.3Hz の 2 つのピークが存在しており、そのピークが桁から橋脚基部に向かって 4.2Hz から 3.3Hz へと推移している。このような現象は、斜角を有することにより橋軸

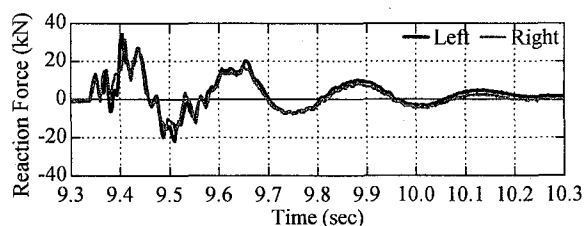


(a) 鉛直反力波形

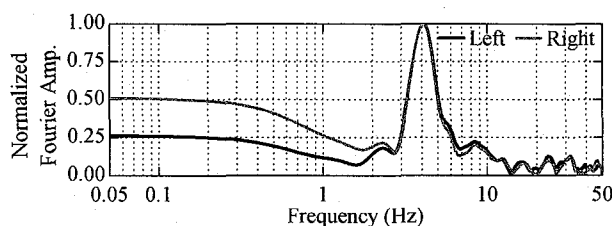


(b) 正規化フーリエスペクトル

図-11 中間支点における鉛直反力 (斜角 90°)



(a) 鉛直反力波形



(b) 正規化フーリエスペクトル

図-12 中間支点における鉛直反力 (斜角 60°)

方向に対する橋脚の剛性が擬似的に上がり、斜角 90° の場合よりも高い周期が生じているとも推察し得るが、本検討内容のみで判断することは困難と考えられる。

(2) 振動モード

図-9 および図-10 には、それぞれ斜角 90° および斜角 60° の場合のフーチングならびに桁における卓越周期の振動モードを示している。ここでは、図-6 および図-8 に示しているフーリエスペクトルからフーチングおよび桁における卓越周期を特定し、フーリエ振幅および位相スペクトルを用いて振動モードを算出している。なお、各振動モードは最大振幅を示す計測位置を基準に正規化して表示している。

a) 斜角 90°

各計測位置における左右両側面の振幅を比較すると、何れの卓越周期においても良く一致しており、その対称性が確認できる。次に、振動モードについて着目すると、フーチングにおける卓越周期では橋脚基部を最大とする急制動時と考えられるモード形状が確認できる。また、桁における卓越周期では、支承を慣性力の作用点とする明瞭な 1 次モードを呈していることが分かる。

b) 斜角 60°

各計測位置における左右両側面の振幅は、何れの卓越周期においても概ね良く一致しており、斜角による影響は見られない。また、振動モードについても斜角 90° の場合と同様、フーチングにおける卓越周期では橋脚基部を最大とする急制動時と考えられるモード形状を、桁における卓越周期では支承を慣性力の作用点とする明瞭な

1 次モードを呈していることが分かる。

(3) 鉛直反力波形および正規化フーリエスペクトル

図-11 および図-12 には、それぞれ斜角 90° および斜角 60° の場合の橋脚が支持する中間支点における鉛直反力波形とその正規化フーリエスペクトルを示している。なお、鉛直反力波形については、加速度波形と同様に、計測時間 17.0 秒間のうち急制動直前から応答が収束するまでの 1.0 秒間について表示している。また、フーリエスペクトルの算出には計測時間 17.0 秒間のデータを使用し、最大振幅値で正規化している。

a) 斜角 90°

中間支点における鉛直反力波形について着目すると、左右の最大振幅に差は認められるもののその振動性状は良く一致しており、正負異なる反力変動が繰り返し発生している状況が確認できる。また、フーリエスペクトルの卓越周期は 2.7Hz であり、桁における加速度波形の卓越周期 3.3Hz と比較的近いことから、桁の応答に起因して発生しているものと推察される。

b) 斜角 60°

中間支点における鉛直反力波形について着目すると、応答が収束まで大きな反力変動を継続しており、また、その振動性状については図-7 に示している桁における加速度波形と良く対応していることが分かる。このことは、フーリエスペクトルの卓越周期 4.1Hz が桁における加速度波形の卓越周期 4.2Hz と一致することからも確認できる。したがって、斜角を有する場合には、支点反力は桁の応答による影響を強く受けるものと推察される。

4. まとめ

本研究では、斜角を有する RC 壁式橋脚を対象とした合理的な実験方法、耐震設計法および耐震補強法を確立するための有用な知見を得ることを目的として、斜角の有無をパラメーターとする RC 壁式橋脚模型を用いた急制動加振実験を実施し、弾性域における動的挙動について基礎的な検討を行った。

本検討結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 斜角の有無に関わらず、橋軸方向に対する振動モードは、自由振動時には支承位置を慣性力の作用点とする明瞭な 1 次モードを呈している。
- 2) 斜角を有する場合には、自由振動時に 2 つの卓越周期が存在し、卓越周期は桁から橋脚基部に向かって 2 つの周期の間を推移する。
- 3) 斜角の有無に関わらず、橋脚が支持する支点には正負異なる鉛直反力が繰り返し発生する。
- 4) 斜角を有する場合には、橋脚が支持する支点における鉛直反力は桁の応答による影響を強く受ける。

なお、斜角を有する場合には、橋軸方向に対する橋脚の剛性が擬似的に上がり動的挙動に影響を及ぼすことを推察し得る結果も得られており、その保有耐力も含めて今後の検討課題と考えられる。

参考文献

- 1) 佐藤 京, 岡田慎哉, 張 広鋒, 岸 徳光: 斜角を有する壁式 RC 橋脚模型の静的耐荷性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.343-348, 2003.
- 2) 佐藤昌志, 小山田欣裕, 谷本俊充, 岸 徳光: 衝撃的載荷重を受ける RC 柱の動的挙動に関する実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.2, pp.969-974, 1997.
- 3) 吉田紘一, 佐藤昌志, 谷本俊充, 今野久志: RC 橋脚模型基部に衝撃的加速度が作用する場合の動的応答性状に関する実験研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.3, pp.991-996, 1998.
- 4) 吉田紘一, 佐藤昌志, 谷口直弘, 岸 徳光: 急速加振を受ける実規模二径間連続桁 RC 橋脚の動的応答性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1195-1200, 1999.
- 5) 池田憲二, 吉田紘一, 三上 浩, 佐藤昌志: AFRP シート巻き付けされた段落しを有する実規模 RC 橋脚の動的プッシュオーバー実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.3, pp.1573-1578, 2000.
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書 (V 耐震設計編)・同解説, 2002.
- 7) 京田英宏, 佐藤昌志, 熊谷健一, 三上 隆: 二径間連続桁橋における RC 壁式橋脚の耐荷性状に関する基礎的な実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1027-1032, 2006.