

E-ディフェンス震動実験におけるロードセルを用いた橋脚作用 曲げモーメントの精度に関する検討

佐々木智大¹・陳紹帥²・川島一彦³

¹学生会員 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 M1-10）

²東京工業大学 工学部土木工学科（同上）

³フェロー 工博 東京工業大学大学院教授 理工学研究科土木工学専攻（同上）

1. はじめに

構造物の耐震性能や動的な破壊特性を解明するため、実際に構造物を揺らして加速度を加え、地震力を作用させる震動台実験を行うことは有効である。RC橋脚の震動台実験を行う場合、その耐力を評価するために橋脚基部に作用した曲げモーメントを求める必要があるが、その方法は一般に2通りある。一つは橋脚のどこかにロードセルを配置し、橋脚に作用する水平力や鉛直力を直接測定し求める方法（以下手法(1)と呼ぶ）と橋脚に生じた絶対加速度を加速度計を用いて測定し、これに質量を乗じて橋脚に作用する慣性力を求め、これから橋脚の曲げモーメントを求める方法（以下手法(2)と呼ぶ）である。

手法(1)を用いて曲げモーメントを求めるにはロードセルの特性が重要である。ロードセルは一般に静的荷重の測定に用いられるが、動の実験に対してどこまで有効なのかは議論が必要なところである。特に複数台のロードセルを組み合わせる3次元加震下の作用力を求める際の有効性については検討が必要である。

一方、手法(2)は橋脚の振動モードを正しく再現できるように加速度計を設置する必要がある。しかし、複雑に変形する橋脚モデルでは、複数箇所で加速度を計測する必要があり、これらが代表する質量分布の評価も含め、難しい問題である。さらに、加速度から慣性力を求め、曲げモーメント～曲率の履歴を求めると、高振動数のノイズの影響によって滑らかな履歴が得られないことが指摘されている¹⁾。

松本・川島は、橋脚の3次元加震実験を対象に、手法(1)、手法(2)の2種類の方法で求めた橋脚の水平力～水平変位の履歴を比較し、手法(1)ではロードセルにより水平2方向と同時に上下方向の作用力を正しく計測できること、手法(2)では模型の変形モードに応じて模型の加速度分布を正しく評価できることが重要であることを指摘している²⁾。

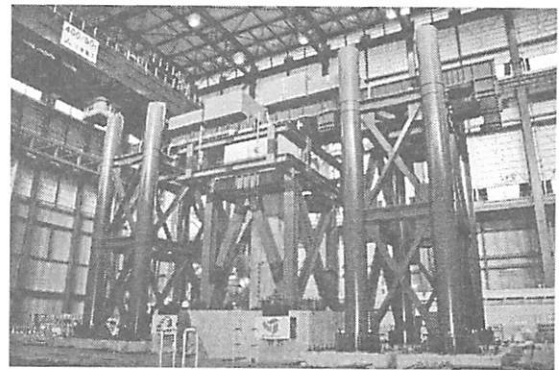


図-1 C1-5実験

本研究では、防災科学技術研究所が有する大型震動台実験施設E-Defenseを用いた現行基準で設計された大型RC橋脚の震動台実験^{3),4)}を対象に手法(1)、手法(2)の2つの方法を用いて橋脚基部に作用する曲げモーメントを求め、これらがどの程度一致するかを検討したものである。

2. 検討に用いる震動台実験

ここでは、図-1に示す2008年に行われた防災科学技術研究所が有する大型震動台実験施設E-Defenseを用いた現行基準で設計された大型RC橋脚の震動台実験（C1-5実験）の結果を対象に曲げ耐力の推定精度を検討する。

図-2は実験のセットアップである。中央のRC橋脚模型（これ以降 C1-5 橋脚と呼ぶ）と左右の端部橋脚が桁1、桁2の2つの桁を支持する2径間単純橋である。桁の質量は22.7tであり、左右それぞれの桁にはRC橋脚の中心から1.65mの位置に78.0tのマスブロック（以下マスLと呼ぶ）が、3.85mの位置に44.6tのマスブロック（以下マスSと呼ぶ）が設置されている。C1-5橋脚は、図-3に示す橋脚高さ7.5m、径2.0mの円形断面RC橋脚である。詳細は参考文献3)、4)に示すとおりである。

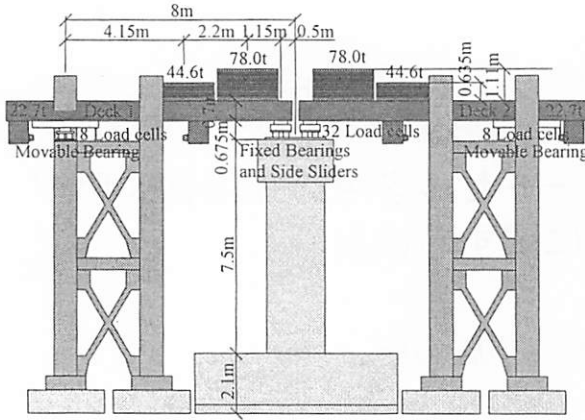


図-2 C1-5実験セットアップ

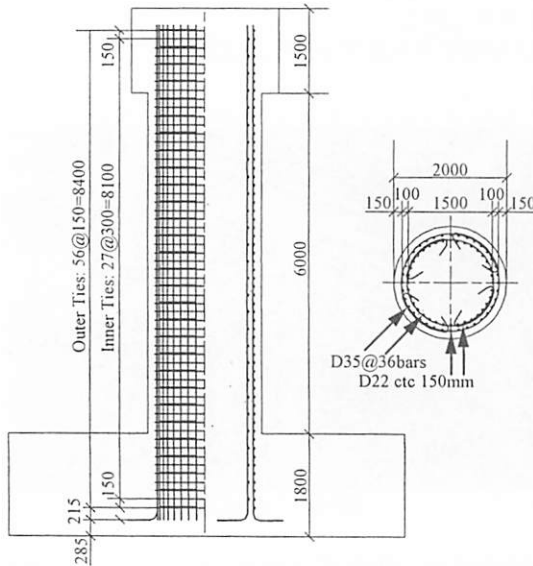


図-3 C1-5橋脚

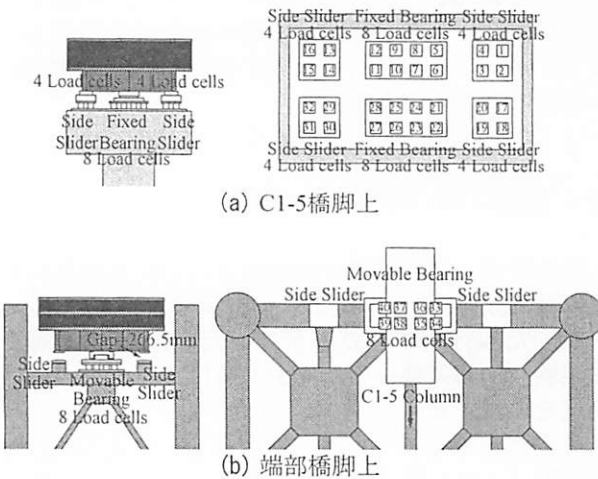


図-4 支承とロードセル

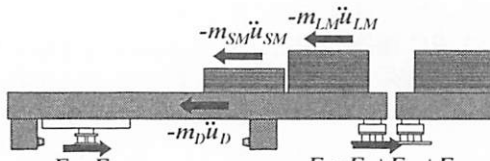


図-5 桁に作用する水平力

図-4に示すように、橋脚上には2個の固定支承と4個のすべり支承が、端部橋脚上には1個の可動支承と2個の転倒防止装置（すべり支承）が取り付けられている。ただし、端部橋脚上の2個の転倒防止装置の上沓と下沓の間には266.5mmの隙間が設けられており、桁が橋軸周りに10度以上回転すると上沓と下沓が衝突することになるが、C1-5実験における桁の回転角は最大でも3.6度であり、加震中に上沓と下沓が接していない、このため、C1-5実験では橋脚に作用する慣性力を算出する場合には、端部橋脚上の転倒防止装置を考慮する必要はない。

3. 桁の慣性力

図-5は1つの桁に作用する荷重を模式図で示したものである。 i 番目の桁に作用する慣性力を $F_D^{(i)}$ 、桁を支える各支承に作用する力の合力を $F_B^{(i)}$ とすると、 $F_D^{(i)}$ 、 $F_B^{(i)}$ は次式で表される。

$$F_{D,dir}^{(i)} = -m_{LM}\ddot{u}_{LM,dir}^{(i)} - m_{SM}\ddot{u}_{SM,dir}^{(i)} - \int_0^L \lambda_D \ddot{u}_{D,dir}^{(i)}(x) dx \quad (1)$$

$$\ddot{u}_{D,dir}^{(i)}(x) = \frac{\ddot{u}_{DE,dir}^{(i)} - \ddot{u}_{DC}^{(i)}}{l} x + \ddot{u}_{DC}^{(i)} \quad (2)$$

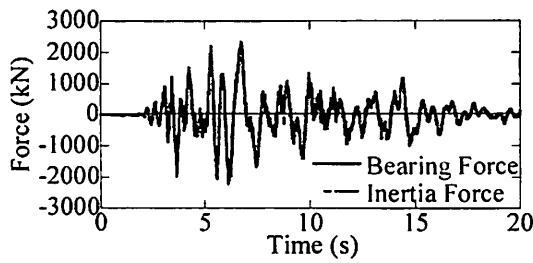
$$F_{B,dir}^{(i)} = F_{F,dir}^{(i)} + F_{LS,dir}^{(i)} + F_{RS,dir}^{(i)} + F_{M,dir}^{(i)} \quad (3)$$

ここで、下添え字 dir はそれぞれ橋軸方向 (LG)、橋軸直角方向 (TR)、上下方向 (UD) の各成分を表す。また、 m_{LM} 、 $\ddot{u}_{LM,dir}^{(i)}$ はそれぞれマス L の質量および重心位置での加速度、 m_{SM} 、 $\ddot{u}_{SM,dir}^{(i)}$ はマス S の質量および重心位置での加速度、 λ_D は桁の単位長さあたり質量、 $\ddot{u}_{D,dir}^{(i)}(x)$ は固定支承から距離 x の位置における桁の加速度、 $\ddot{u}_{DC,dir}^{(i)}$ 、 $\ddot{u}_{DE,dir}^{(i)}$ はそれぞれ固定支承位置および可動支承位置における桁の加速度、 L は桁の長さ、 l は固定支承から可動支承までの距離、 $F_{F,dir}^{(i)}$ 、 $F_{LS,dir}^{(i)}$ 、 $F_{RS,dir}^{(i)}$ 、 $F_{M,dir}^{(i)}$ はそれぞれ i 番目の桁の下にある固定支承、右側すべり支承、左側すべり支承、可動支承に作用する荷重であり、各支承の下に取り付けられたロードセルに作用する荷重の合力で求められる。

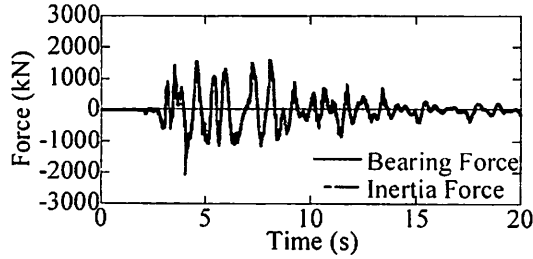
力の釣合いより、 $F_D^{(i)}$ と $F_B^{(i)}$ には次式の関係が成り立つ。

$$F_{B,dir}^{(i)} = -F_{D,dir}^{(i)} \quad (4)$$

図-6は加速度計に基づいて桁に作用する慣性力 $F_D^{(i)}$ とロードセルに基づいて $F_B^{(i)}$ を各時刻で求めた結果の比較である。ただし、ここでは、桁1およ

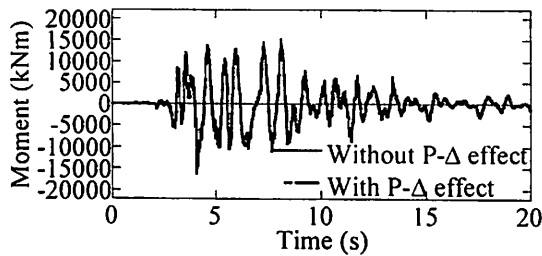


(a) 橋軸方向

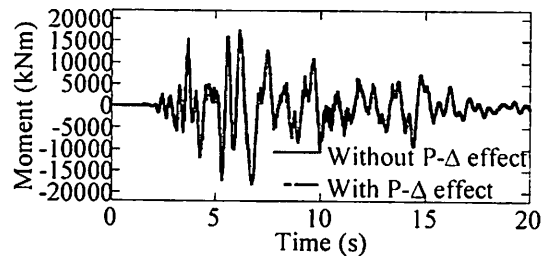


(b) 橋軸直角方向

図-6 桁に作用する慣性力



(a) 橋軸周り



(b) 橋軸直角軸周り

図-7 P-Δ効果の影響

び桁2の求められた慣性力 $F_D^{(1)}$, $F_D^{(2)}$ の和と桁1および桁2の水平力 $F_B^{(1)}$, $F_B^{(2)}$ の和によって比較している。これによれば、橋軸、橋軸直角方向ともに、全体の波形形状はほぼ一致している。最大値で比較すると、ロードセルの測定値に基づく支承作用力は橋軸方向には2,346kN、橋軸直角方向には2,078kNであるのに対して、加速度計に基づく桁作用力は、橋軸方向には2,168kN、橋軸直角方向には1761kNとなり、ロードセルに基づく作用力は加速度計に基づく作用力より8.2～18%大きい。

4. 曲げモーメントの算出

(1) ロードセルの測定値を用いる場合 (手法(1))

橋脚基部に作用する橋軸直角軸周りの曲げモーメント $M_{LC,TR}$ 、橋軸軸周りの曲げモーメント $M_{LC,LG}$ は次式で求められる。

$$M_{LC,TR} = F_{LC,LG} \times h_{LC} - \sum_{i=1}^{32} F_{i,UD} x_{LCi,LG} \quad (4)$$

$$M_{LC,LG} = F_{LC,TR} \times h_{LC} - \sum_{i=1}^{32} F_{i,UD} x_{LCi,TR} \quad (5)$$

$$F_{LC,dir} = \sum_{i=1}^2 F_{F,dir}^{(i)} + F_{LS,dir}^{(i)} + F_{RS,dir}^{(i)} \quad (6)$$

ここで、 h_{LC} は橋脚基部からロードセル中心までの高さ、 $(x_{LCi,LG}, x_{LCi,TR})$ は C1-5 橋脚の中心を原点としたときの i 番目のロードセルの中心点位置、 $F_{LC,dir}$ は橋脚天端に作用する荷重である。

また、橋脚天端の橋軸および橋軸直角方向の応答変位 u_{LG} , u_{TR} による P-Δ効果によって橋脚基部にはモーメントが生じる。この影響を考慮すると、橋脚基部に作用する曲げモーメント $\tilde{M}_{LC,TR}$, $\tilde{M}_{LC,LG}$ は次式のようなになる。

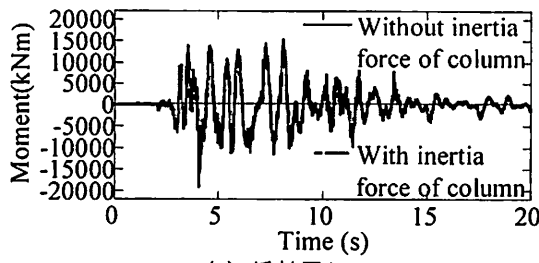
$$\tilde{M}_{LC,TR} = M_{LC,TR} - F_{LC,UD} u_{LG} \quad (7)$$

$$\tilde{M}_{LC,LG} = M_{LC,LG} - F_{LC,UD} u_{TR} \quad (8)$$

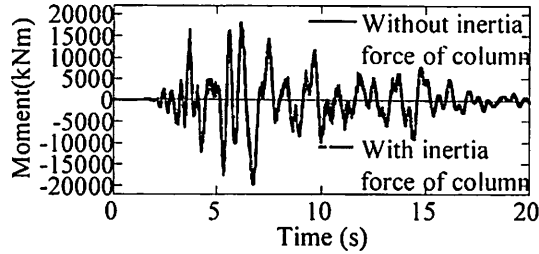
式(7)、式(8)を用いて P-Δ効果影響を考慮した場合の橋脚基部に作用する曲げモーメントを求め、これを P-Δ効果を見做した場合の曲げモーメントと比較すると、図-7 のようになる。橋軸周りの曲げモーメントは P-Δ効果を考慮すると 16,239kNm であるが、P-Δ効果を見做すると 16,216kNm となり、P-Δ効果を考慮すると曲げモーメント 0.14%増加する。また、橋軸直角軸周りの曲げモーメントの最大値は P-Δ効果を考慮すると -18,303kNm であるのに対して P-Δ効果を見做すると -18,157kNm でとなり、P-Δ効果を考慮する場合と、これを無視した場合に比較しての 4%増加する。

以上の方法により求めた曲げモーメントに加えて、橋脚基部には橋脚自身の慣性力による曲げモーメントが作用する。橋脚の慣性力はロードセルの測定結果からは求められないため、橋脚基部より 2m, 4m, 6m, 7.5m の 4 点において測定された加速度を用いて求める。橋脚の慣性力により生じる橋軸直角及び橋軸まわりの曲げモーメントを $M_{C,TR}$, $M_{C,LG}$ とすると、

$$M_{C,TR} = - \int_0^6 \lambda_C \ddot{u}_{C,LG}(x) z dz - \int_6^{7.5} \lambda_B \ddot{u}_{C,LG}(x) z dz \quad (9)$$



(a) 橋軸周り



(b) 橋軸直角軸周り

図-8 橋脚に作用する慣性力の影響

$$M_{C,LG} = -\int_0^6 \lambda_C \ddot{u}_{C,TR}(x) z dz - \int_6^{7.5} \lambda_B \ddot{u}_{C,TR}(x) z dz \quad (10)$$

ここで、 λ_C 、 λ_B は橋脚躯体および梁部の単位長さ当たりの質量、 $\ddot{u}_{C,dir}(z)$ は橋脚の加速度であり、次式で求める。

$$\ddot{u}_{C,dir}(x) = \begin{cases} \frac{\ddot{u}_{4,dir} - \ddot{u}_{2,dir}}{2} (x-2) + \ddot{u}_{2,dir} & (0 < x < 6) \\ \frac{\ddot{u}_{7.5,dir} - \ddot{u}_{6,dir}}{1.5} (x-6) + \ddot{u}_{6,dir} & (6 < x < 7.5) \end{cases} \quad (11)$$

ここで、 $\ddot{u}_{2,dir}$ 、 $\ddot{u}_{4,dir}$ 、 $\ddot{u}_{6,dir}$ 、 $\ddot{u}_{7.5,dir}$ はそれぞれ橋脚基部から 2m、4m、6m、7.5m における絶対加速度である。

橋脚に作用する慣性力によって生じる曲げモーメントを式(9)、式(10)によって求め、これを見込んだ橋脚基部の曲げモーメントを示すと、図-8 のようになる。橋脚の慣性力を考慮した場合の橋脚基部に作用する曲げモーメントの最大値は、橋軸周りには -20,079kNm、橋軸直角軸周りには -19,600kNm となり、橋脚の慣性力を無視した場合と比較して 7.1～23.5%増加する。橋脚に作用する慣性力が基部に作用する曲げモーメントに与える影響は大きい。

(2) 加速度の測定値を用いる場合（手法(2)）

加速度計を用いて慣性力を求める場合には、次式のように橋軸方向では橋脚天端に作用する橋軸方向の慣性力 $F_{Acc,LG}$ から可動支承の摩擦力を差し引かなければならない。

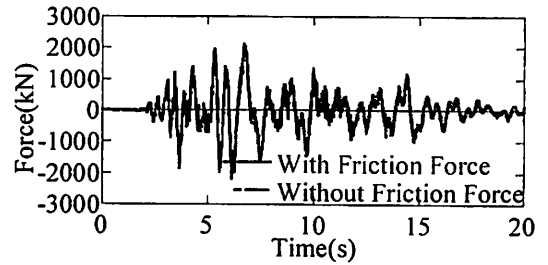


図-9 可動支承に作用する摩擦力が橋軸方向慣性力に与える影響

$$F_{Acc,LG} = \sum_{i=1}^2 -m_{LM} \ddot{u}_{LM,LG}^{(i)} - m_{SM} \ddot{u}_{SM,LG}^{(i)} - \int_0^L \lambda_I \ddot{u}_{D,LG}^{(i)}(x) dx - F_{M,LG}^{(i)} \quad (12)$$

可動支承に作用する摩擦力を差し引いて求めた場合の橋軸方向の慣性力を、摩擦力を差し引かなかった場合と比較すると、図-9 のようになる。摩擦力を考慮した場合の慣性力の最大値は -2,025kN であるに対して、摩擦力を無視した場合には -2,168kN になる。摩擦力を考慮すると橋脚に作用する慣性力は 7.1%減少する。

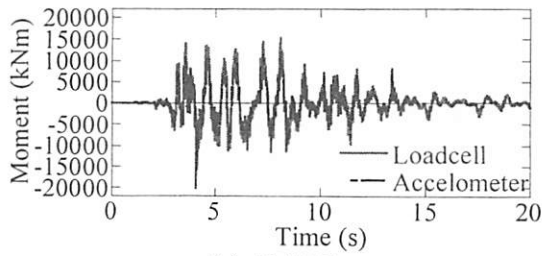
一方、橋軸直角方向および上下方向には、桁に作用する慣性力は、端部橋脚と C1-5 橋脚が分担することになる。そのため、力とモーメントの釣合いから橋脚に作用する橋軸直角方向および上下方向の慣性力 $F_{Acc,TR}$ 、 $F_{Acc,UD}$ は次式のように求める。

$$F_{Acc,TR} = \sum_{i=1}^2 -m_{LM} \ddot{u}_{LM,TR}^{(i)} \frac{l-a_{LM}}{l} - m_{SM} \ddot{u}_{SM,TR}^{(i)} \frac{l-a_{SM}}{l} - \frac{1}{l} \int_0^L \lambda_D \ddot{u}_{D,TR}^{(i)}(l-x) dx \quad (13)$$

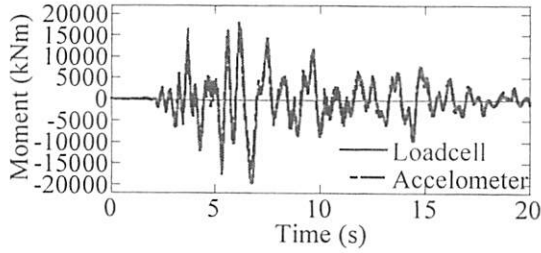
$$F_{Acc,UD} = \sum_{i=1}^2 -m_{LM} \ddot{u}_{LM,UD}^{(i)} \frac{l-a_{LM}}{l} - m_{SM} \ddot{u}_{SM,UD}^{(i)} \frac{l-a_{SM}}{l} - \frac{1}{l} \int_0^L \lambda_D \ddot{u}_{D,UD}^{(i)}(l-x) dx \quad (14)$$

ここで、 a_{LM} 、 a_{SM} はそれぞれ固定支承からマス L およびマス S までの距離である。

以上により求めた水平力を用いて、橋脚基部に作用した橋軸直角軸周りおよび橋軸軸周りの曲げモーメント $M_{Acc,TR}$ 、 $M_{Acc,LG}$ を求めることができるが、この際、支承条件の違いを考えなければならない。橋軸直角軸周りの曲げモーメントを求める場合には、支承は桁の橋軸直角軸周りの回転を拘束しないため、桁に生じたモーメントは橋脚には伝わらない。その



(a) 橋軸周り



(b) 橋軸直角軸周り

図-10 橋脚基部に作用する曲げモーメント

ため、橋軸直角方向周りの曲げモーメント $M_{Acc,TR}$ は次式のようなになる。

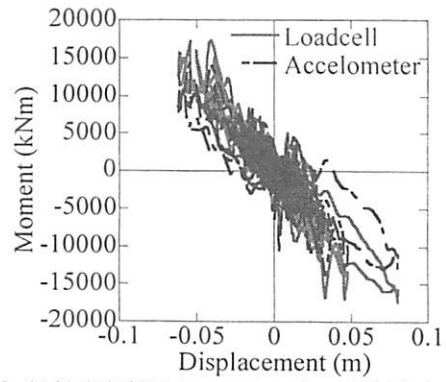
$$M_{Acc,TR} = F_{Acc,LG} h_{LG} - F_{Acc,UD}^{(1)} d_F + F_{Acc,UD}^{(2)} d_F \quad (15)$$

$$F_{Acc,UD}^{(1)} = -m_{LM} \ddot{u}_{LM,UD}^{(1)} \frac{l - a_{LM}}{l} - m_{SM} \ddot{u}_{SM,UD}^{(1)} \frac{l - a_{SM}}{l} - \frac{1}{l} \int_0^L \lambda_D \ddot{u}_{D,UD}^{(1)} (l - x) dx \quad (16)$$

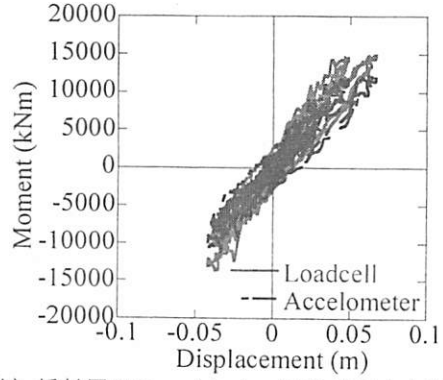
$$F_{Acc,UD}^{(2)} = -m_{LM} \ddot{u}_{LM,UD}^{(2)} \frac{l - a_{LM}}{l} - m_{SM} \ddot{u}_{SM,UD}^{(2)} \frac{l - a_{SM}}{l} - \frac{1}{l} \int_0^L \lambda_D \ddot{u}_{D,UD}^{(2)} (l - x) dx \quad (17)$$

ここで、 h_{LG} は橋脚基部から支承の回転中心までの高さ、 d_F は橋脚中心から固定支承までの距離、 $F_{Acc,UD}^{(i)}$ は i 番目の桁から橋脚に作用する上下方向の慣性力である。

一方、橋軸周りの曲げモーメントを求める場合には、固定支承と2つのすべり支承により桁の橋軸周りの回転が拘束されるため、桁に生じるモーメントは橋脚基部に伝達される。したがって、橋脚基部に作用する橋軸周りの曲げモーメントは次式により表される。



(a) 橋軸直角軸周りモーメント～橋軸方向変位



(b) 橋軸周りモーメント～橋軸直角方向変位

図-11 橋脚基部に作用する曲げモーメントと橋脚天端の変位の履歴

$$M_{Acc,LG} = -F_{Acc,TR} h_{TR} + \sum_{i=1}^2 -J_{LM} \ddot{\theta}_{LM,LG}^{(i)} - J_{SM} \ddot{\theta}_{SM,LG}^{(i)} - J_D \ddot{\theta}_{D,LG}^{(i)} \quad (18)$$

ここで、 h_{TR} は橋脚基部から慣性力作用位置までの高さ (C1-5 実験では 7.3m) であり、 $\ddot{\theta}_{LM,LG}^{(i)}$ 、 $\ddot{\theta}_{SM,LG}^{(i)}$ 、 $\ddot{\theta}_{D,LG}^{(i)}$ はそれぞれマス L、マス S、桁の橋軸方向周りの回転角加速度、 J_{LM} 、 J_{SM} 、 J_D はそれぞれマス L、マス S、桁の回転慣性質量である。

また、手法(1)と同様に橋脚天端の応答変位 u_{LG} 、 u_{TR} により生じる P-Δ効果を考慮すると、橋脚基部の曲げモーメントは次式のようなになる。

$$\tilde{M}_{Acc,TR} = M_{Acc,TR} - P_{Acc,UD} u_{LG} (h_{LG}) \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \tilde{M}_{Acc,LG} = & M_{Acc,LG} \\ & + \sum_{i=1}^2 m_{LM} \ddot{u}_{LM,UD}^{(i)} \frac{l - a_{LM}}{l} u_{TR}(h_{LM}) \\ & + m_{SM} \ddot{u}_{SM,UD}^{(i)} \frac{l - a_{SM}}{l} u_{TR}(h_{SM}) \\ & + \int_0^L \lambda_D \ddot{u}_{D,UD}^{(i)}(x) u_{TR}(h_l) \frac{l - x}{l} dx \end{aligned} \quad (20)$$

ここで、 $u_{dir}(h)$ は高さ h における応答変位の dir 方

向 (dir=LG,TR) 成分であり、次式で表される。

$$u_{dir}(h) = \frac{u_{7.5,dir} - u_{6,dir}}{7.5 - 6} (h - 6) + u_{dir}^6 \quad (22)$$

ここで、 $u_{6,dir}$ 、 $u_{7.5,dir}$ はそれぞれ橋脚基部から 6m、7.5m における応答変位である。

以上のようにして求めた橋脚基部に作用する曲げモーメントを手法(1)を用いて求めた場合と比較すると、図-10 のようになる。手法(2)を用いて求めた曲げモーメントの最大値は、橋軸周りでは -16,211kNm、橋軸直角周りでは -15,715kNm となり、手法(1)で求めた曲げモーメントと比較して、17.3～21.7%小さい。

また、図-11 は両手法を用いて求めた曲げモーメント～橋脚天端の応答変位の履歴を比較したものである。上述したように両手法で求めた曲げモーメントの一致度が低いため、曲げモーメント～変位の履歴の一致度は十分とはいえない。手法(2)で求めた場合には、手法(1)と比較して、剛性が小さくなった。なぜ、このような違いが生じるか、今後さらに検討したい。

5. 結論

E-ディフェンスを用いた加震実験結果に基づいて橋脚の履歴特性を評価する際に、2つの方法を検討

した。本解析から得られた結論は、以下の通りである。

- 1) 橋脚基部に生じる曲げモーメントを求める場合には、橋脚天端の応答変位によって生じる P-△効果が影響するため、これらを正しく評価する必要がある。
- 2) 橋脚の基部に作用するモーメントを手法(1)と手法(2)で比較すると、両者の位相は一致するが、振幅の一致度は十分ではない。手法(2)で求めた曲げモーメントの方が手法(1)で求めた曲げモーメントよりも小さくなった。今後、さらに検討が必要とされる。

参考文献

- 1) Sakai, J., Mahin, A. S., Espinoza, A.: Earthquake Simulation Tests on Reducing Residual Displacements of Reinforced Concrete Bridge Columns, PEER Report University of California, Berkeley, 2006.
- 2) 松本崇志, 川島一彦: 震動台加震実験に基づく橋脚の曲げ耐力の推定精度, 土木学会地震工学論文集, pp. 961-970, 2007.
- 3) 右近大道, 梶原浩一, 川島一彦: E-Defenseを用いた実大RC橋脚 (C1-5橋脚) 震動破壊実験報告, 第12回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム, 2009.
- 4) 佐々木智大, 川島一彦, 松崎裕, 右近大道, 梶原浩一: E-ディフェンスを用いた現行基準で設計されたRC橋脚の破壊特性に関する検討, 第12回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム, 2009.