

鳥取大学大学院 学生会員 ○田添 達也

鳥取大学大学院 正会員 谷口 朋代

鳥取大学大学院 正会員 小野 祐輔

1. はじめに

大規模の地震が起こった場合、橋梁は支承部の破壊に伴う滑動により、橋台や隣接する桁との衝突が起こる。橋軸と支承線のなす角度が直角でない斜橋の場合、斜角が小さくなると、衝突後に橋台から受ける反発力が桁の重心から外れて作用するため、斜橋が回転し、橋台の頂部縁端から外れて落橋する場合がある¹⁾。そこで本研究では、斜橋の回転量を動的解析を行わずに簡易的に推定する方法について検討した。斜橋の桁回転量を簡易的に推定するにあたって、桁端と橋台の衝突速度の近似式と、求めた衝突速度を初期速度として与えた時の斜橋の回転量の近似式の2段階に分けて検討を行った。本稿では衝突速度の近似式について述べる。

2. 滑動する斜橋のモデル化と運動方程式

斜橋は、橋台の頂部を滑動する剛体と考え、図-2.1に示すようにモデル化した。

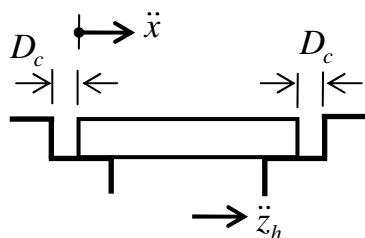


図-2.1 滑動する斜橋のモデル化

ここに、 $\ddot{x}$ ：剛体の地盤に対する相対加速度、 $\ddot{z}_h$ ：地盤の加速度、 D_c ：遊間量である。剛体と橋台の間には摩擦力のみが働くこととし、簡略のため、水平地震加速度のみが作用するとした。ここで、①地震加速度によって物体に働く慣性力が静止摩擦力を超えたときに、剛体は滑動を開始する。②滑動中の剛体には、慣性力と動摩擦力が働き、慣性力が弱まっても地盤に対する相対速度が0になるまで滑動を続ける。③剛体の滑動量が桁遊間に達した時、剛体は橋台と衝突する。これ

らのことから導かれる剛体の運動方程式と滑動開始、停止条件を以下に示す。

$$\text{[滑動時]} \quad \ddot{x} = -\ddot{z}_h - \nu \cdot g \cdot \text{sign}(\dot{x}) \quad (2-1)$$

$$\text{[静止時]} \quad \ddot{x} = 0 \quad (2-2)$$

$$\text{[滑動開始条件]} \quad |\ddot{z}_h| > \mu \cdot g \quad (2-3)$$

$$\text{[滑動停止条件]} \quad \dot{x} = 0 \quad (2-4)$$

$$\text{[衝突条件]} \quad x = D_c \quad (2-5)$$

ここに、 ν ：動摩擦係数、 g ：重力加速度、 μ ：静止摩擦係数、 $\text{sign}(\dot{x})$ ：符号を与える関数である。これらの運動方程式と条件式を用いて、地震加速度の時刻歴を入力し滑動の有無の判断を行い、剛体の加速度を積分して相対速度と相対変位を求め、相対変位が遊間量に達した時の相対速度 v_{eq} を求めた。

3. 正弦波加速度による衝突速度の近似式

桁の衝突速度を簡易的に推定しようとする場合、複雑で不規則に変化する地震波をどのように扱うかが問題となる。桁衝突は、時間的に不連続な現象であるため、同方向の滑動がある程度継続して桁遊間に達しないと生じない。したがって、地震加速度が大きい、あるいは長い周期成分のところのほうが滑動時間が長く、衝突が起こる可能性が高い。そこで、地震波のうち衝突を生じさせるであろう波形を簡易に再現すればよいと考え、本研究では、(3-1)式で与えられる正弦波加速度の振幅 A と周期 T に地震波の最大加速度と卓越周期を用いることとした²⁾。

$$[\text{正弦波加速度}] \quad \ddot{z}_h = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \quad (3-1)$$

(2-1) 式の地盤の加速度に (3-1) 式を代入し、剛体の滑動の運動方程式と滑動開始条件、衝突条件を用いて導出した正弦波による衝突速度の近似式を以下に示す。

$$V_{\sin} = \mu g t_1 + \frac{AT}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t_1\right) + D_1 \quad (3-2)$$

$$D_1 = -\mu g t_0 - \frac{AT}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t_0\right) \quad (3-3)$$

$$t_0 = \frac{T}{2\pi} \sin^{-1} \frac{\mu g}{A} \quad (3-4)$$

$$t_1 = \frac{-\left(\frac{AT}{4} + C_1\right) - \sqrt{\left(\frac{AT}{4} + C_1\right)^2 - 2(\mu g - A)\left(\frac{AT^2}{4\pi^2} - \frac{AT^2}{32} + C_2 + D_c\right)}}{\mu g - A} \quad (3-5)$$

$$C_1 = -\frac{AT}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t_0\right) - \mu g t_0 \quad (3-6)$$

$$C_2 = -\frac{AT^2}{4\pi^2} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t_0\right) - \frac{1}{2} \mu g t_0^2 + C_1 t_0 \quad (3-7)$$

ここに、 $V_{\sin}$: 正弦波加速度による衝突速度、 t_0 : 滑動開始時刻、 t_1 : 衝突時刻、 C_1, C_2 : 積分定数である。

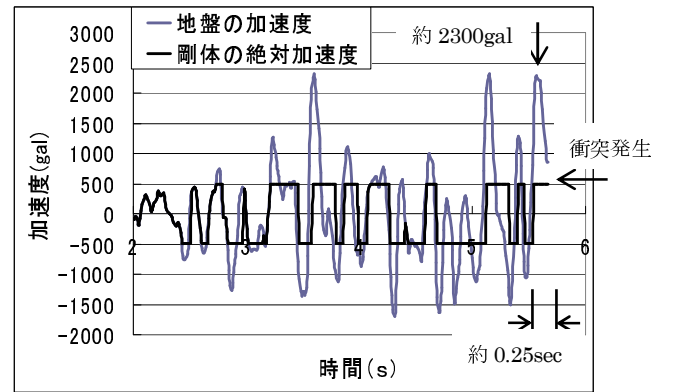
4. 解析に使用する地震波と摩擦係数、遊間量について

本論文では K-NET と Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) の Strong Ground Motion Database の強震記録から、El Centro, Northridge, Taft, Kobe 等の代表的な地震動を含む計 78 個の地震波をダウンロードし、収集したデータの絶対最大加速度を 5 種類の加速度 1000gal、1500gal、2000gal、2500gal、3000gal に揃え、3 種類の摩擦係数 $\mu = 0.5, 0.6, 0.7$ と 3 種類の桁遊間量 $D_c = 10\text{cm}, 15\text{cm}, 20\text{cm}$ を組み合わせて 3510 ケースの解析を行った。ただし、実地震波を用いた解析ではパラメータの組み合わせによっては、衝突しない場合があるため、得られたデータは 1471 ケースとなった。近似式に用

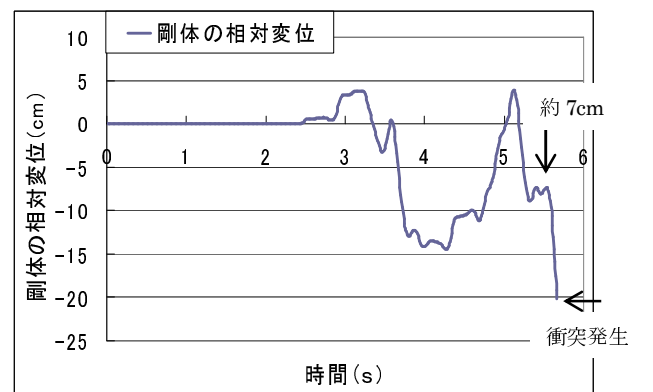
いる地震動の卓越周期は、収集した地震加速度のデータをフーリエ変換して卓越する周期を抽出し、道路橋示方書³⁾に記されている地盤種別の分類に基づいて、第Ⅰ種地盤に分類される地震波を 11 個、第Ⅱ種地盤に分類される地震波を 39 個、第Ⅲ種地盤に分類される地震波を 38 個と分類した。

5. 正弦波と実地震波による衝突速度

近似式による衝突速度は正弦波加速度を地動として与えたものであるため、実地震波による衝突速度とは異なる。近似式と実地震波による衝突速度の差が生じる原因を以下に考察する。実地震波（最大地震加速度 3000gal、摩擦係数 0.5、遊間量 20cm）によって桁衝突が生じるまでの解析結果の一例を図-5.1(a),(b)に示す。



(a) 実地震波の加速度時刻歴の一例



(b) (a)の加速度により生じる相対変位

図-5.1 実地震波の解析結果の一例

図-5.1(a)から桁衝突を生じさせた加速度は 2300gal 程度であることが分かる。このように、実地震波による衝突は必ずしも絶対最大加速度が生じる時に衝突す

るとは限らない。また、実地震波は正弦波加速度のように正負の加速度が同じ大きさで繰り返すとは限らず、正負のどちらか一方が発達していることが多い。この場合、正と負の方向で滑動する時間の割合が異なることから、正負のどちらか一方の相対変位が徐々に蓄積されていく。図－5.1(b)の 5.5 秒付近を見ると相対変位は約 7cm となっており、近似式に用いる遊間量よりも小さい値となっていることから、衝突までの滑動時間が短くなり衝突速度の結果に影響を与えられと考えられる。また、図－5.1(a)の例を見ると近似式で用いた地震波の卓越周期の半周期は 0.85 秒であるのに対し、桁衝突を生じさせた実地震波の半周期は 0.25 秒程度であることがわかる。このように、必ずしも地震動の卓越周期と同じ周期で衝突しないことも衝突速度の近似に影響していると考えられる。

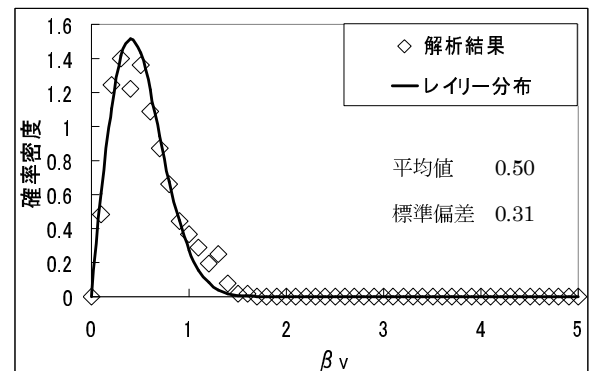
6. 確率論を用いた近似式による衝突速度の補正

上述した近似式と実地震波による衝突速度の差はランダムに発生すると考えられるので、確率論を用いて補正することとし、(6-1) 式に示す実地震波による衝突速度 v_{eq} と正弦波加速度による衝突速度 v_{sin} の比を衝突速度の推定誤差として定義した。

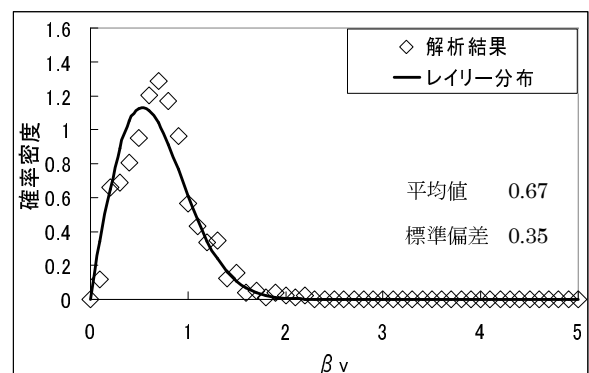
$$[\text{推定誤差}] \quad \beta_v = \frac{|v_{eq}|}{|v_{sin}|} \quad (6-1)$$

ここで、第 I 種地盤のデータについては、ほぼすべての実地震波で衝突しないという結果が得られた。これは第 I 種地盤で観測される地震波は、周期が短いため滑動時間が短く、大きな変位が発生しないため衝突が起こらなかったと考えられる。そこで、第 II 種、第 III 種地盤で観測される地震波を対象とすることとした。まず、絶対最大加速度、摩擦係数、遊間量、地盤種別の組み合わせが β_v の確率密度分布の形状に及ぼす影響について調べたところ、絶対最大加速度、摩擦係数、遊間量の組み合わせによらず、ある特定の分布形状を示すことが分かった。しかし、第 II 種地盤と第 III 種地盤で β_v の確率密度分布の分布形状が異なったため、地盤種別毎に補正を行うこととした。地盤種別によって分類した β_v の確率密度分布は図－6.1(a),(b)に示すよ

うにレイリー分布を用いて近似することができた。



(a) 第 II 種地盤



(b) 第 III 種地盤

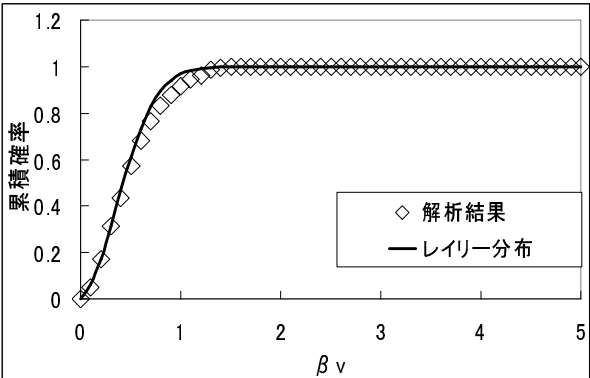
図－6.1 β_v 確率密度分布

ここで、対数正規分布を用いた近似についても検討したが、レイリー分布のほうが適合度が高かったためレイリー分布を用いることとした。近似したレイリー分布を用いて図－6.2 に示す累積確率分布を求め、指定した累積確率のしきい値より、表－6.1 に示す非超過確率に基づく補正係数を決定した。正弦波加速度による衝突速度に補正係数を乗じた値を衝突速度の推定値と定義する。

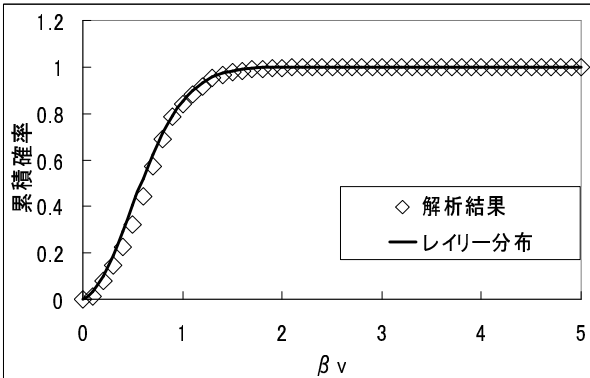
$$[\text{衝突速度の推定値}] \quad V_c = \beta_v^{\text{Prob}} \cdot V_{sin} \quad (6-2)$$

非超過確率 90%の補正係数を用いて衝突速度を推定した場合、同じ最大加速度と卓越周期を持つ実地震波が 100 波来襲し、全ての場合で桁端衝突が生じたとしても、この内 90 波で生じる衝突速度は (6-2) 式による推定値を超えないことを意味する。この非超過確率に基づく補正係数を斜橋の重要度によって使い分け、

(6-2) 式により推定した桁衝突速度を用いて、回転量の推定を行うことが可能である。



(a) 第Ⅱ種地盤



(b) 第Ⅲ種地盤

図－6.2 βv 累積確率分布

表－6.1 補正係数 β_v^{Prob}

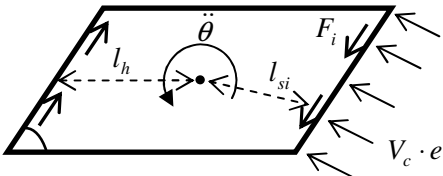
β_v^{Prob}	第Ⅱ種地盤	第Ⅲ種地盤
90%	0.86	1.15
95%	0.98	1.31
97%	1.06	1.42
99%	1.21	1.63

7. 結論

本論文では、地震時の斜橋の桁衝突による回転量を簡易的に推定するために用いる桁衝突速度を、地震動の特性を考慮した正弦波加速度を用いて簡易的に推定する方法について提案した。

8. 今後の課題

衝突後の斜橋の回転量の近似式については、斜橋は推定した衝突速度で橋台と衝突することとし、衝突後は支承部からの摩擦力を受けながら回転すると考え、図－8.1 に示すようなモデル化を行った。



図－8.1 回転する斜橋のモデル化

回転系の運動方程式から導出した回転停止時の回転角 θ の近似式を以下に示す。

[回転角]

$$\theta = -\frac{Fl_s}{2I}t_{stop}^2 + \frac{V_c \cdot e \cdot \cos \bar{\theta}}{l_h}t_{stop} \tag{8-1}$$

[回転停止時刻]

$$t_{stop} = \frac{V_c \cdot e \cdot I \cdot \cos \bar{\theta}}{F \cdot l_s \cdot l_h} \tag{8-2}$$

ここに、 F ：摩擦力、 e ：橋台の反発係数、 l_s ：回転中心から支承までの距離、 l_h ：回転中心から桁端までの水平距離、 I ：桁と床版を考慮した慣性モーメント、 V_c ：衝突速度の推定値、 $\bar{\theta}$ ：斜角である。今後はこの式の適用性について FEM との比較などを行い検討していく。

9. 参考文献

(1)渡邊 学歩:地震時の桁間衝突が斜橋の応答に及ぼす影響について, 第 63 回 土木学会中国支部研究発表会 2011

(2)Tomoyo Taniguchi and Takuya Miwa : A simple procedure to approximate slip displacement of freestanding rigid body subjected to earthquake motions. *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 2007 ; 36 : 481-501

(3)道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 日本道路協会