車両-乗員系連成振動シミュレーションシステムの開発*

(第4報, 乗員挙動に及ぼす道路橋伸縮装置段差の影響)

西 山 修 二^{*1}

Development of Simulation System of Vehicle-Occupant Dynamic Interaction (4th Report, Influence of Expansion Joint of Highway Bridge on Human Dynamics)

Shuji NISHIYAMA

This paper presents an application of the simulation system of the vehicle-occupant dynamic interaction which was developed by the author. During the application of this system, the effects of bridge expansion joint and vehicle speed on human dynamic behavior were investigated using this computer simulation system. The expansion joint of highway bridge is modeled by Fourier series function. The random roughness of an actual highway surface has been taken into account in the simulation system. It was found that projection of expansion joint and the shape of obstacle exert a serious influence upon human ride comfort. Some results are presented in the form of parametric plots. Allowable height of expansion joint in the vehicle speed range of 40 to 160 km/h, and a standard of maintenance are presented.

Key Words: Simulation, Human Dynamics, Vehicle Dynamics, Ride Comfort, Coupled Vibration, Bridge Expansion Joint

1. ま え が き

道路橋伸縮装置は橋の温度変化, 荷重, コンクリートのクリープおよび乾燥収縮などによる橋の変位に対して, 自動車が支障なく走行できるように設けられた装置である。装置の部分で凹凸はさけがたく, 現在でも最も適した形式が定まっておらず, 改良が行われている。伸縮装置を通過する車両の衝撃を小さくする構造が望まれている⁽¹⁾。路面上に段差が発生すると, この部分を通過する車両は激しい衝撃を受け, 車両内の乗員の乗り心地を低下するばかりでなく交通騒音・振動等の公害の原因となる。この種に関連した研究として, 単一突起を乗り越える場合の車両運動の研究が報告されている^{(2)~(4)}。車両が衝撃を受けると車両内の乗員は複雑な振動系を構成するため, 車両の運動のみを考慮したのでは乗員挙動の詳細な予測がたない。伸縮装置等が乗員の挙動に及ぼす影響について検討された報告例はほとんど見当たらない。

段差の定量的な規制値あるいは段差が生じた場合の

定量的な保守基準等も定められていないのが現状である。車両が伸縮装置段差を通過する場合の乗員の振動特性を明らかにし, 段差が生じた場合の保守基準を定量的に定めることは乗り心地向上をはかると同時に道路橋の損傷, 交通騒音・振動等の公害を防止するうえにおいても極めて重要である。

本研究は激しい交通流, あるいは地震, 地盤沈下等により, 発生が予測される道路橋伸縮装置段差が乗員の挙動に及ぼす影響を検討する。手法としては著者ら⁽⁵⁾⁽⁶⁾によって開発された車両-乗員系連成振動計算システムを適用する。検討結果から道路橋伸縮装置段差の許容値を定め, 段差が生じた場合の保守基準について定量的に検討する。さらに, 段差の形状による影響についても検討する。

記 号 の 説 明

添字 f, r, e はフロント, リア, エンジンを示す。

m_i : 乗員各部の質量 ($i=1, \dots, 4$)

I_i : 乗員各部の慣性モーメント ($i=1, \dots, 4$)

β : フットレスト角度

k_i : 乗員支持点のばね定数 ($i=1, \dots, 5$)

c_i : 乗員支持点の粘性減衰係数 ($i=1, \dots, 5$)

T_i : 関節のフリクションモーメント ($i=1, \dots, 3$)

* 平成5年10月2日 第71期全国大会において講演, 原稿受付 平成5年12月27日。

^{*1} 正員, 広島市工業技術センター (〒730 広島市中区千田町3-8-24)。

F_p : 乗員が車両に及ぼす作用力
 v : 車両走行速度(車速)
 z : 車体重心変位
 z_f, z_r : ばね下質量の変位
 m : 車体質量
 m_f, m_r : ばね下質量
 m_e : エンジン質量
 I, I_e : ピッチング方向慣性モーメント
 θ, θ_e : 車体, エンジンピッチング角
 k_{1f}, k_{1r} : 懸架装置のばね定数
 c_{1f}, c_{1r} : 懸架装置の粘性減衰係数
 k_{ef}, k_{er} : エンジンマウントのばね定数
 c_{ef}, c_{er} : エンジンマウントの粘性減衰係数
 f_f, f_r : サスペンション系フリクション力
 k_{2f}, k_{2r} : タイヤのばね定数
 c_{2f}, c_{2r} : タイヤの粘性減衰係数
 l_f, l_r : 前軸, 後軸と重心間距離
 l_{eg} : 前軸とエンジン重心間距離
 l_{ef} : エンジンのフロント支持点間距離
 l_{er} : エンジンのリア支持点間距離
 F_{1f}, F_{1r} : 懸架装置作用力
 F_{2f}, F_{2r} : タイヤ接地点作用力
 F_{3f}, F_{3r} : エンジン支持点作用力
 z_{f1}, z_{r1} : 車体側軸位置変位
 z_{ef}, z_{er} : エンジン支持点位置変位
 $z_0(t)$: 路面表面の上下変位
 $z_{0i}(t)$: 路面表面の凹凸
 w_f, w_r : $z_0(t) + z_{0i}(t)$

2. 車両-乗員-路面系モデル

2.1 車両-乗員系モデル⁽⁵⁾⁽⁶⁾ 図1に本報で適用

図1 車両-乗員系モデル

するシステムの振動モデルを示す。

乗員系は、頭部と頸部、胴体部、大腿部、下腿部の四つの剛体としてモデル化されている^{(5)~(8)}。車両系は、車体、エンジン、フロントとリアのばね下質量からなるモデルである。タイヤ接地点は常に路面から離れないものと仮定する。本研究で取扱う車両-乗員系の解析モデルは12自由度のモデルである。人間の動的挙動を精度よく検討できるものであり高度性・新規性・信頼性のあるモデルと言える⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

2.2 路面系モデル 路面系モデルとして、路面

の凹凸の上に道路橋伸縮装置段差が周期的に配置されているものとする。図2に路面系モデルを示す。伸縮装置段差はフーリエ級数⁽⁹⁾を用いて表示すると式(1)となる。数値解析では路面の変位と変位速度を算出する必要があり、走行区間にわたって路面形状を一つの関数形で表示すると便利である。

$$z_0(x) = 4ab/l_s + (4a/\pi) \sum_{n=1}^{N_{\max}} (1/n) \times \cos \{2\pi n(x - 0.5l_s)/l_s\} \cdot \sin(2\pi nb/l_s) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $2a$ は伸縮装置段差、 $2b$ は伸縮装置幅、 N_s はスパン数、 l_s は支間長を示す。路面の凹凸は高速道路の実測データ⁽¹⁰⁾を使用する。道路橋の動的たわみは考慮しないものとする。

式(1)の級数の項を多くとればとるほど形状を精度よく表すことが可能である。しかし、項数を ∞ までとることは現実的に不可能である。そこで、級数の項を何項まで考慮すればよいかを検討する必要がある。 $N_{\max}$ を種々変化させて計算した結果を図3に示す。 $N_{\max}=100$ まで考慮すれば十分な精度で路面形状を表示することが可能である。したがって、本報では式(1)の $N_{\max}$ は100とする。

3. 解析結果および考察

3.1 数値解析 出力値の評価は試験区間を走行する間の各部の加速度の値の二乗平均平方根(rms値)およびピーク値で評価する。計算きざみ幅については、

図2 路面系モデル

伸縮装置の上を車両が高速で通過する場合においても伸縮装置を十分サンプリング可能な値とする。シミュレーションに使用する計算諸元として、道路橋は広島市に所在する高瀬大橋を想定している。高瀬大橋は8支間からなる橋長330 mの単純支持合成けた橋である。幅員は10.3 mで歩道と二車線の車道からなる。支間の両端以外は支間長は46 mで、幅は約0.4 mのくし状目地⁽¹⁾の伸縮装置が橋長にわたって9個設置されている。本報における検討は、 $l_s=46$ m、 $N_s=7$ の場合について検討する。車両および乗員系の計算諸元および初期値はすべて前報⁽⁵⁾⁽⁶⁾のとおりとする。

3.2 計算結果 図4は突起乗越しの場合の実測結果⁽¹¹⁾と計算結果を比較したものである。実験車とシミュレーションでの車両諸元は同一車種である。突起は平板状単一突起で高さ15 mm、幅200 mmの場合である。単一突起の形状を式(1)で表し、 $N_{\max}=100$ とした。計算結果と実測値はよく一致し、路面形状のモデル化およびシステムの精度の良さを示すことができる。

図3 $N_{\max}$ と伸縮装置段差形状

図4 計算結果と実測値との比較

図5から図7は伸縮装置段差を15 mmとし、車速が22 m/sで走行する場合の計算結果を示す。

図5はフロントおよびリアのばね下質量の上下方向加速度と走行距離の関係を示す。図6はフロア(フロントおよびリア)の上下方向加速度と走行距離の関係を示す。図7は乗員各部の上下加速度と走行距離の関係を示す。伸縮装置の中心位置はスタート点から23 m、69 m、115 m、161 m、207 m、253 m、299 mの位置にある。図5、図6に示すように、伸縮装置を通過するときに、ばね下質量およびフロアの加速度は高い値を示す。計算結果の妥当性を示すことができる。乗員系の加速度は複雑な波形を示し、車両系の波形からは予測がつかず、乗員系を考慮する必要性が認められる。

3.3 rms値とクレストファクタ 図8、図9は $N_s=1(46$ m) $\sim 7(322$ m)の場合について乗員各部の上

図5 ばね下質量の加速度と走行距離の関係

図6 フロア加速度と走行距離の関係

下加速度(rms 値)とクレストファクタ(ピーク値/rms 値)⁽¹²⁾の関係を示す。図8の縦軸は乗員各部の上下加速度(rms 値)を示す。横軸は考慮したスパン数を示す。 $N_s=7$ は道路橋の橋長のほぼ全域を考慮することに相当する。図8(a)~(c)は車速がそれぞれ16, 22, 28 m/s の場合の計算結果を示す。 N_s の変化は加速度(rms 値)にはあまり影響を及ぼさないようである。車速が22 m/s のとき、下腿部の変化がいちばん大きく、最大値は最小値の約9%の増加が認められる。車速が16, 22 m/s の場合は、加速度(rms 値)は下腿部がいちばん高く、続いて大腿部、胴体部、頭部と低くなる。車速が28 m/s の場合は逆に頭部の加速度が高く、続いて胴体部、大腿部、下腿部と低くなる。

図9はクレストファクタと N_s の関係を示す。図9(a)~(c)は車速が16, 22, 28 m/s の場合についての結果を示す。車速が16, 22 m/s の場合は N_s による影響はあまり認められず、 N_s が増すと値はやや高くなる。 $v=28$ m/s の場合は下腿部の最大値は最小値の68%増加する。 N_s が3以上では各部のクレストファクタはほぼ一定値となる。 $N_s=1$ のみの計算でも加速度(rms 値)およびクレストファクタなどの大まかな特性を把握することが可能である。しかし、詳細な検討を

行う場合は橋長全域を考慮することが望ましい。衝撃性の振動ではクレストファクタで評価したほうがよい場合がある。クレストファクタがおよそ6を超す場合には、ISO規格で規定されたrms 値の手法によって生ずる不快さを過少評価することがある⁽¹³⁾。このよう

(a) 車速 16 m/s の場合

(b) 車速 22 m/s の場合

(c) 車速 28 m/s の場合

図7 乗員各部の加速度と走行距離の関係

図8 走行区間と加速度(rms)

な状態に対しては、運動の root-mean-square が不快さをより正しく評価すると思われる⁽¹³⁾。rmq は次式で表すことができる評価量である。

$$rmq = \left((1/T) \cdot \int_0^T \dot{x}^4 dt \right)^{1/4} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\dot{x}$: 着目応答量, T : 時間。

車速が 16 m/s~28 m/s, 伸縮装置段差が 0~30 mm の範囲において、クレストファクタは、ばね上質量で 2.0~4.6, ばね下質量で 4.4~8.3, 乗員系前後加速度で 2.0~2.5, 乗員系上下加速度で 1.9~2.2, フロア上下加速度で 2.3~5.5 エンジン上下加速度で 2.4~4.8

(a) 車速 16 m/s の場合

(b) 車速 22 m/s の場合

(c) 車速 28 m/s の場合

図 9 走行区間とクレストファクタ

図 10 乗員上下方向加速度

程度である。したがって、本報で対象としている現象は rms 値で評価してよいものと思われる。

3・4 伸縮装置段差と車速の影響 伸縮装置段差は 0~30 mm, 車速は 16, 22, 28 m/s に対して, 乗員挙動に及ぼす伸縮装置段差と車速の影響について計算を実施した。評価は試験区間での各部の加速度の rms 値で評価する。

図 10 は乗員各部の上下方向加速度に及ぼす車速と伸縮装置段差の影響についての計算結果を示す。図 10 の上段から頭部, 胴体部, 大腿部および下腿部を各々示す。いずれの場合においても, 伸縮装置段差が約 10 mm くらいまでは段差による影響はあまり認められず, 車速が大きいくほど加速度は高くなる。段差が約 10 mm 以上では段差による影響が大きくなり, 車速が小さいほど加速度は高くなる。乗員各部の前後方向加速度についても同様の傾向を示す。

3・5 伸縮装置段差の許容値 ISO⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾ によれば人体への振動の影響は作用時間によって, 快適性減退境界, 作業能率減退境界, 暴露限界の三段階で表わされている。K 値⁽¹⁴⁾を使用すると, 走行中の車両内の乗員が感じる乗り心地を定量的に評価できる。K 値は振動数で重みづけされた加速度への変換も可能である⁽¹⁴⁾。一日の暴露時間が 1, 2, 4, 8 時間の場合の快適性減退境界に対する K 値はそれぞれ 7.442, 5.119, 3.435, 2.085 となる⁽⁸⁾。上下方向加速度に変換⁽¹⁴⁾すると, 0.003 79g, 0.002 61g, 0.017 5g, 0.010 6g となる⁽⁸⁾。

図 11 は各車速において乗員の加速度の rms 値が各暴露時間の境界加速度に対する段差の許容値を示す。乗員の上下方向と前後方向加速度を比較すると上下方向のほうが早く境界値に達する。段差は乗員の頭部, 胴体部, 大腿部および下腿部のいずれかが境界値に達したときをその車速に対する許容限界とした。車速が

40 km/h, 振動暴露時間が 1 h, 2 h, 4 h, 8 h の場合, 快適性が保持できる段差の最大許容値は 11 mm, 9 mm, 8 mm, 2 mm となる。車速が増加し, 60 km/h では暴露時間が 4 h, 8 h の場合の許容値は 6 mm, 0 mm となる。車速がさらに増加すると快適性を保持するために, 段差があってはならない。暴露時間が 1 h, 2 h の場合は車速の増加につれて最大許容値がやや緩和され増加する。

3・6 段差の形状による影響 図 12 は, 乗員の頭部の上下方向加速度に及ぼす段差形状の影響についての計算結果を示す。段差の形状が平板状および正弦波状について, 高さが路面から正方向に凸状になる場合と, 負方向に凹状になる場合についての計算結果である。車速は 16 m/s とする。段差は単一の場合である。同一形状の段差でも凸形状より凹形状の段差を通過する場合が乗員加速度への影響は小さくなる傾向を示す。

4. ま と め

本研究により, 明らかになった事柄をまとめると次のとおりである。

(1) 道路橋伸縮装置段差を有する道路橋の路面形状をフーリエ級数を用いて関数表示した。級数の項数は 100 項以上考慮すれば収束する。路面系の数学モデルとして, 十分な精度であることが確認できた。

(2) 試験区間が出力値に及ぼす影響を検討した。試験区間により, 出力値に多少の差異が生じる。N_s=1 のみの計算でも, 特性が近似的に把握できる。詳細な検討を行うには道路橋全域を考慮することが望ましい。

(3) 乗員系に及ぼす車速および伸縮装置段差の影響について定量的に検討した。段差が小さいときは車

図 11 車速と伸縮装置段差の許容値

図 12 段差の形状による影響

速が大きいほど、加速度は高くなる。段差が大きくなると、車速が小さいほど、加速度は高くなる。前後方向加速度についても同様の傾向を示す。

(4) 振動暴露時間が1 h, 2 h, 4 h, 8 hの場合について乗員が不快を感じる伸縮装置段差の許容値を示した。車速が40 km/hの場合、最大許容値はそれぞれ11 mm(1 h), 9 mm(2 h), 8 mm(4 h), 2 mm(8 h)となる。

(5) 段差の形状による影響について検討した。同一の形状でも凸形状と凹形状の段差ではその上を走行する車両内の乗員に及ぼす影響度合が異なり、凸形状より凹形状のほうが乗員系に及ぼす影響が小さい。

本報による検討結果は道路橋の設計・施行あるいは保守に際し、有益な技術資料となるものと考ええる。さらに、一般路面上のマンホール蓋等の設置あるいは路面の補修等に際しても本研究結果は適用可能である。今後の課題として、車両が段差を高速で通過する場合、タイヤが路面から非接地状態となることが予測される。タイヤの跳躍現象を考慮に入れた解析も必要である。また変位が急変する路面では実現象をさらに詳細

に把握するためにはタイヤ接地圧分布⁽¹⁶⁾等を考慮に入れたタイヤモデルの開発も必要であろう。

終わりに、本研究を実施するに際しお世話になった関係各位に感謝の意を表する。

文 献

- (1) 小堀, 橋梁工学, (1993), 48, 朝倉書店.
- (2) 大亦・岩田・大塚, 自動車技術会論文集, No. 24(1982), 82.
- (3) 大野・ほか3名, 機論, 54-498, C(1988), 432.
- (4) 石塚・井上, 自動車研究, 7-11(1985), 481.
- (5) 西山, 機論, 59-568, C(1993), 3613.
- (6) Nishiyama, S., *Proc. ASIA-PACIFIC VIBRATION CONFERENCE '93*, 2(1993), 825.
- (7) 西山, 機論, 59-568, C(1993), 3622.
- (8) 西山, 機論, 59-565, C(1993), 2613.
- (9) 平尾・ほか3名, 理論自動車工学, (1960), 217, 山海堂.
- (10) 西山, 東大工井口研究報告, (1983-3), 120.
- (11) 土居・ほか4名, 機講論, No. 920-98(1992-11), 267.
- (12) 江島, 地盤振動と対策, (1979), 31, 集文社.
- (13) 松井, 分科会報告, No.335(1984), 201.
- (14) H.デュピイ・G.ツェレット, 全身振動の生体反応, (1989), 32, 名大出版会.
- (15) ISO2631/1-1985(E), 11.
- (16) 安部, 自動車の運動と制御, (1992), 10, 山海堂.