

ドライビングシミュレータを用いた地震時車両走行模擬実験 VIRTUAL TESTS ON DRIVING A VEHICLE DURING AN EARTHQUAKE USING DRIVING SIMULATOR

丸山喜久¹, 山崎文雄²

¹ 東京大学大学院社会基盤工学専攻, 修士(工学)

Yoshihisa Maruyama, Dept. of Civil Engineering, University of Tokyo, maruyama@rattle.iis.u-tokyo.ac.jp

² 東京大学生産技術研究所, 工博

Fumio Yamazaki, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, yamazaki@iis.u-tokyo.ac.jp

SUMMARY

The seismometer network of Japanese expressway system has been enhanced since the 1995 Kobe earthquake. Using earthquake information from the instruments, the expressways are closed. However, recent studies have revealed that expressway structures are not seriously damaged under seismic excitation of the current regulation level. Hence, we may think of relaxing the regulation of expressway closure. Before doing this, we need to examine the effects of shaking to automobiles on expressways. In this study, the control system of the driving simulator was modified so as to apply the seismically induced vehicle motions to its actuators then some virtual tests on driving a vehicle on expressway during an earthquake were conducted.

キーワード: ドライビングシミュレータ, 高速道路, 走行安定性, 地震応答

Key words: driving simulator, expressway, running stability, seismic response

1 はじめに

我が国の高速道路では, 料金所付近に地震計を設置しており, これらの地震計によって記録された最大加速度を指標として, 地震発生後の高速道路構造物の被害有無を確認するために, 地震時通行規制が実施されてきた。

1995年兵庫県南部地震では, 被害情報が早期に把握できなかったために, その後の救助活動や復旧活動に大きな支障をきたした。その反省から, 現在では様々な機関が地震計ネットワークを整備しており, 高速道路にも大幅に地震計が増設された¹⁾。このため, 大きな地震動が記録される確率が高まっている。また, 比較的地盤条件の良くない地点にも地震計が設置されることもあり, その周辺の地震記録と比較して明らかに記録に違いが見られる観測点も幾つか存在する²⁾。このような背景から, 近年では, 通行規制が行われても, その後の点検で通行に支障をきたすような被害が発見されることは稀である。これらのことを踏まえて, 地震時通行止め基準値は従来の最大加速度80cm/s²以上から, 2001年10月12日に計測震度4.5以上に変更された¹⁾。この基準指標の変更は, 最大加速度が短周期成分の影響が大きく, 被害との相関が低い場合がある

という認識に基づくもので, 基準の値そのものを引き上げた訳ではない。また, このレベルの地震動では, 高速道路構造物に被害が発生しないということも近年の研究で明らかになりつつある³⁾。したがって, 高速道路構造物の被害有無という観点から地震時通行規制基準を議論した場合, 基準値の緩和が可能になるものと考えられる。

一方で, 基準の見直しの検討を行うにあたっては, 高速道路走行中の車両の運転者が地震発生時に運転操作を誤り, それを原因として交通事故が発生する可能性についても考慮すべきであると考えられる。このような走行車両の地震時の挙動に関する研究は, 一部鉄道について行われている⁴⁾以外はあまり検討されておらず, むしろ渋滞中の自動車荷重が地震荷重と組み合わせられ, 道路橋にどのような影響を与えるかが検討される⁵⁾ことが多い。そこで, 著者らは6自由度車両モデルを構築し走行車両の地震応答解析を行い⁶⁾地震動が走行車両に与える影響を検討してきた。

近年, 実際の車両走行の様子を高い現実感で再現できるドライビングシミュレータが幾つかの研究機関で導入されている。このような, ドライビングシミュレータを使用することで, 現実感の高い地震時の運転シミュレーショ

ンが可能になり、運転者の反応も定量的に評価できるものと期待される。また、最近、東京大学生産技術研究所にも、このような最新のドライビングシミュレータが導入された⁷⁾。

したがって、本研究では、地震動が車両運転者に与える影響を検討するためにドライビングシミュレータの制御プログラムを改良し車両の地表地震動に対する絶対応答を入力できるようにした。また、数名の被験者を集め実際に地震時走行模擬実験を行った。

2 地震動の影響を考慮した車両の運動方程式

Fig. 1 に車両の6自由度基本運動を示す。ここでは、車両の重心位置を原点に車両の前後方向を x 軸、左右方向を y 軸、上下方向を z 軸とする⁸⁾。この座標を基準とすると、運動の自由度はそれぞれの座標軸の並進方向と回転方向の6自由度になる。とくに、 x 軸回りのモーメントをローリング運動、 y 軸回りのモーメントをピッチング運動、 z 軸回りのモーメントをヨーイング運動と呼ぶ。

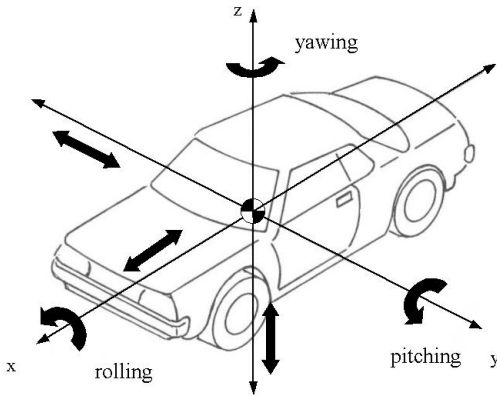


Fig.1. Fundamental motions of a vehicle

著者らは、Fig. 2 に示す上下運動以外を記述する5自由度モデルと Fig. 3 に示す上下運動を記述するための1/4車両モデルの2つのモデルを連成させることでこれらの車両の6自由度運動を記述している⁶⁾。1/4車両モデルでは、上の質点が車体、下の質点が車輪を表している。また、上のバネがサスペンション、下のバネがタイヤの剛性を表している。

式(1)に地震動を考慮した車両の水平成分運動方程式を示す。

$$\begin{aligned}
 m_2(\dot{u} - vr + \ddot{x} \cos \psi + \dot{y} \sin \psi) &= \sum_i \sum_j (F_{xij} \cos \delta_{ij} - F_{yij} \sin \delta_{ij}) = \sum_{i,j} F'_{xij} \\
 m_2(\dot{v} + ur - \ddot{x} \sin \psi + \dot{y} \cos \psi) &= \sum_i \sum_j (F_{xij} \sin \delta_{ij} + F_{yij} \cos \delta_{ij}) = \sum_{i,j} F'_{yij}
 \end{aligned}
 \tag{1a,b}$$

ここで、 m_2 は車体質量、 u は前後速度、 v は横速度、 r は

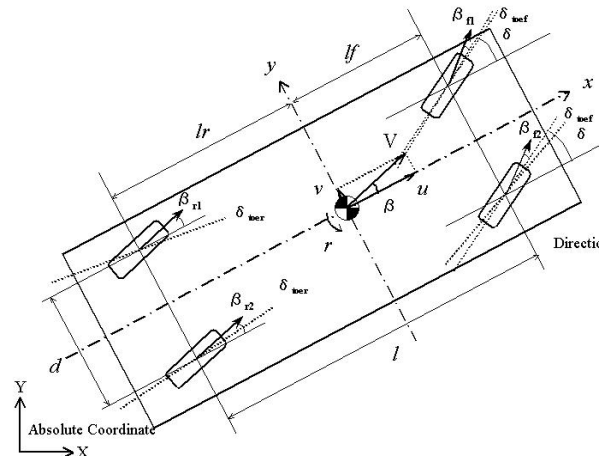


Fig. 2. Two-dimensional coordinate of vehicle motion on X-Y plane

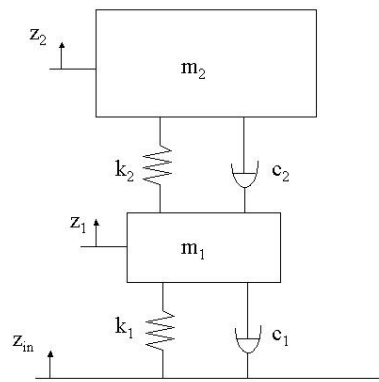


Fig. 3. Quarter vehicle model for vertical motion

ヨー角速度、 ψ はヨー角を表す。 \ddot{x} 、 \dot{y} はそれぞれ Fig. 2 に示す絶対座標系の X 軸、 Y 軸方向の地震動加速度である。また、 F_x 、 F_y はタイヤに発生する前後力、横力でこれらの値を算出するためにマジックフォーミュラモデル⁹⁾を使用している。

式(2)に地震動を考慮した車両の上下成分の運動方程式を示す。

$$\begin{aligned}
 m_1(\ddot{\zeta}_1 + \ddot{z}_{in}) + c_1\dot{\zeta}_1 + c_2(\dot{\zeta}_1 - \dot{\zeta}_2) \\
 + k_1\zeta_1 + k_2(\zeta_1 - \zeta_2) &= 0 \\
 m_2(\ddot{\zeta}_2 + \ddot{z}_{in}) + c_2(\dot{\zeta}_2 - \dot{\zeta}_1) + k_2(\zeta_2 - \zeta_1) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2a,b}$$

ここで、 z_{in} は路面からの上下動変位入力である。 ζ_1 、 ζ_2 は、それぞれバネ下、バネ上の地面に対する相対変位を表す ($z_1 = \zeta_1 + z_{in}$ 、 $z_2 = \zeta_2 + z_{in}$)。

3 ドライビングシミュレータへの地震応答の入力

近年、自動車の安全性能に対する関心の高まりにより、自動車の安全装備開発が盛んとなってきている。このよう

な先進安全装備の研究・開発にはドライビングシミュレータが不可欠な存在になりつつある¹⁰⁾。ドライビングシミュレータとは、運転者の操作に合わせた運転環境の変化をリアルタイムに運転者に提供することで実際に道路で自動車を走らせることなく、台上で運転できるようにする装置である。そのために、台上に設置された運転席から、ドライバーの運転操作量を計測しその操作量に基づき自動車の運動のシミュレーションを行い、運動量に応じた視覚・聴覚・運動感覚についての刺激をリアルタイムに計算し運転者に供給する必要がある。ドライビングシミュレータの構成要素は、先に開発及び運用されているフライトシミュレータの技術の応用として開発が進められてきた。近年、大小非常に多くのドライビングシミュレータが開発されてきたが、固定式と呼ばれる映像模擬装置主体のシステムと、ムービングベースと呼ばれる加速度感覚を模擬する動揺装置を有するシステムに大別される。

本研究で用いるドライビングシミュレータ (Fig. 4) は三菱プレジジョン (株) によって開発された訓練 / 研究用ドライビングシミュレータで 1999 年に東京大学生産技術研究所に導入された⁷⁾。運転者の前方には 3 面のスクリーンが装備され、高速道路の風景を映し出す。さらに、併走車両の挿入も可能である。また、ステアリング反力装置を有した運転模擬席を有しており、非常に現実感に富んだシミュレーションが期待できる。このドライビングシミュレータには電動 6 軸動揺装置が装備されている。Table 1 に動揺装置の仕様を示す。最大加速度で 0.5g、最大変位で 300mm 程度まで発現することが可能である。実環境で車両を走行させることによって実験を行うことは困難かつ危険を伴うので、本研究で行う「地震時車両走行模擬実験」にはこのようなムービングベースのドライビングシミュレータは非常に有用である。

Fig. 5 にドライビングシミュレータの構成を示す。ドライビングシミュレータのホストコンピュータが音響システム、映像システム、ステアリング反力システム、動揺装置制御システムにリンクしている。本研究では、ドライビングシミュレータの制御プログラムを改良し、動揺装置制御システムにホストコンピュータから変位データを送りドライビングシミュレータのモーションを制御することとした。入力する変位データは走行車両の地震応答解析より得られた絶対応答変位である。

地震応答のような複雑波を入力する前に、ドライビングシミュレータの動揺装置に振幅 10mm の正弦波を入力してみた。そのときのモーションをドライビングシミュレータのキャビン上に加速度計を設置し測定した。Fig. 6 に入力正弦波と動揺装置により再現された正弦波の振幅比を示す。これによると、入力正弦波の振動数が大きくなるほど動揺装置のモーションの再現性が低下してくることが分かる。しかしながら、入力しようとしている走行車両の地表地震動に対する絶対応答には高振動数域の成分は車両のサスペンションやタイヤの滑りなどの影響で車両には伝わりにくいことが分かっている⁶⁾。したがって、本



Fig. 4. Driving simulator installed to Institute of Industrial Science, the University of Tokyo

Table 1. Specification of the actuators

Component	Range	Max. Velocity	Max. Acceleration
X	+260~300mm	330mm/s	0.5g
Y	±260mm	350mm/s	0.5g
Z	+330~270mm	380mm/s	0.5g
Roll	±20deg	23deg/s	-
Pitch	+21~-18deg	21deg/s	-
Yaw	±17deg	22deg/s	-

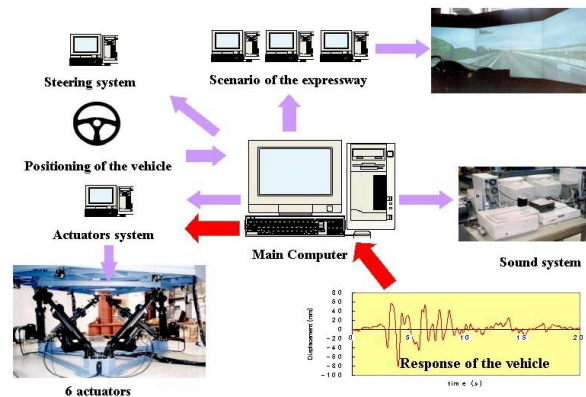


Fig. 5. System configuration of the driving simulator

研究の目的にはこのような動揺装置のモーションの再現性はそれほど影響しないものと判断した。事実、地震応答波形を入力する際に Fig. 6 の逆関数を入力動に乗じたところ、逆に波形の再現性が悪くなった。

次に、実際の地震記録を用いて得られた走行車両の地表地震動に対する絶対応答変位をドライビングシミュレータに入力した。このときも加速度計で再現されたモーションを測定した。Fig. 7 に兵庫県南部地震における JMA 神戸記録の 0.2Hz から 5Hz までのフィルター波を最大加速度 (PGA) 200cm/s² にスケールしたものを入力地震動とした車両の絶対応答変位を入力した場合について、入力

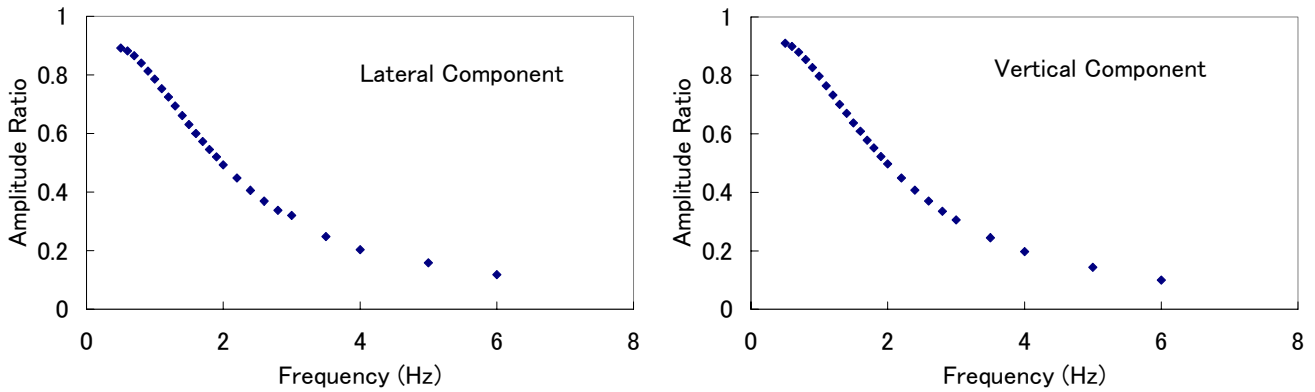


Fig. 6. Amplitude ratio between the applied harmonic wave and the motion produced by the actuators

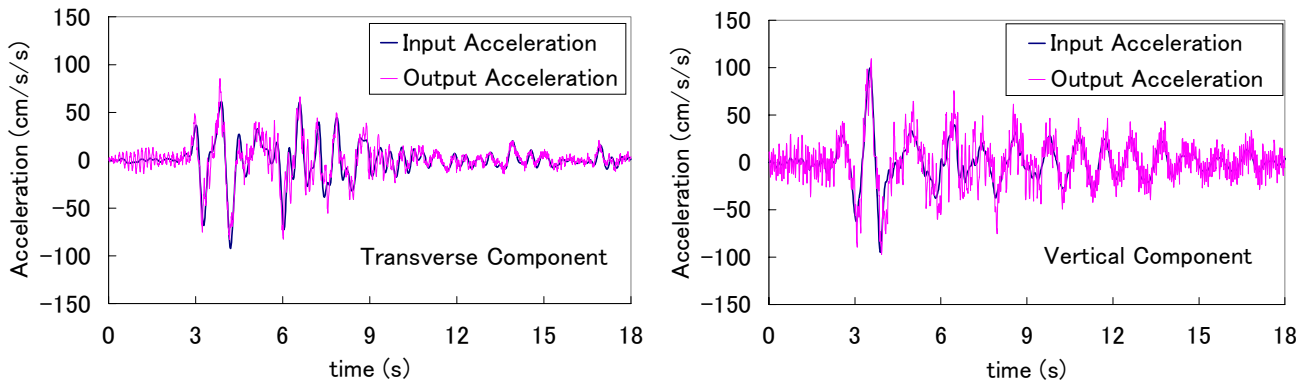


Fig. 7. Comparison between the input acceleration and output acceleration by the driving simulator (JMA Kobe record scaled to $PGA=200 \text{ cm/s}^2$)

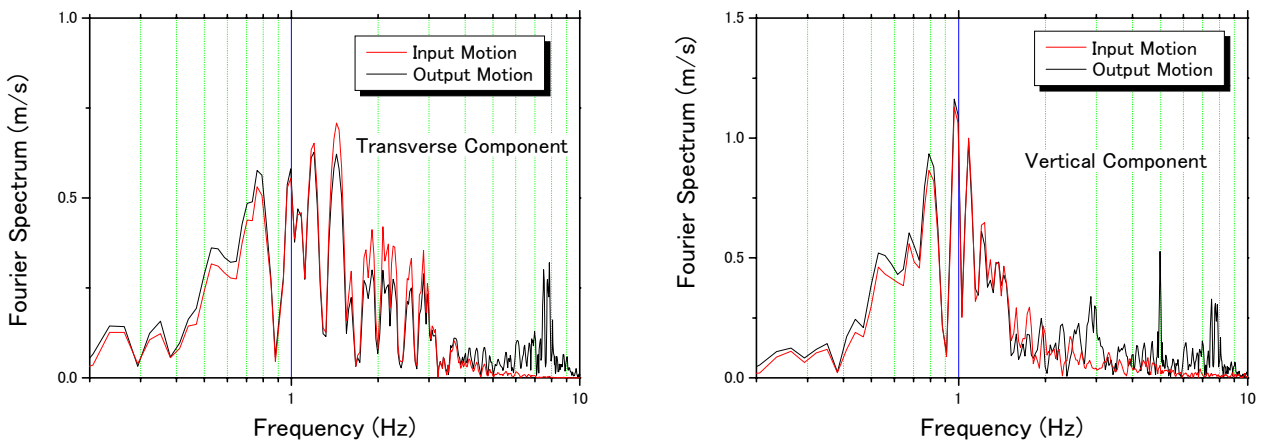


Fig. 8. Comparison between the Fourier spectrum of input acceleration and output acceleration by the driving simulator (JMA Kobe record scaled to $PGA=200 \text{ cm/s}^2$)

加速度と出力加速度の時刻歴波形を比較する。Fig. 8 にフーリエスペクトルで比較する。これによると、動揺装置を変位レベルで制御していることを考えると、加速度レベルでもある程度の精度でシミュレータを制御できているものと考えられる。ただし、ドライビングシミュレータが再現した加速度波形には 7-8Hz の入力加速度には含まれていない高振動成分が見られる。この振動数はドライビングシミュレータの固有振動数と一致しており、シミュレータ

が自動的に振動したものと考えられる。Fig. 9 に千葉県東方沖地震における東京大学生産技術研究所千葉実験所記録、メキシコ地震における SCT 記録を入力地震動としたときの車両絶対応答をドライビングシミュレータに入力した際の入力の車両横方向加速度フーリエスペクトルと出力の加速度フーリエスペクトルの比較を示す。ただし、入力地震動は 0.2-5Hz のフィルター波であり、千葉波は $PGA200 \text{ cm/s}^2$ 、メキシコ波は 50 cm/s^2 にスケールした。

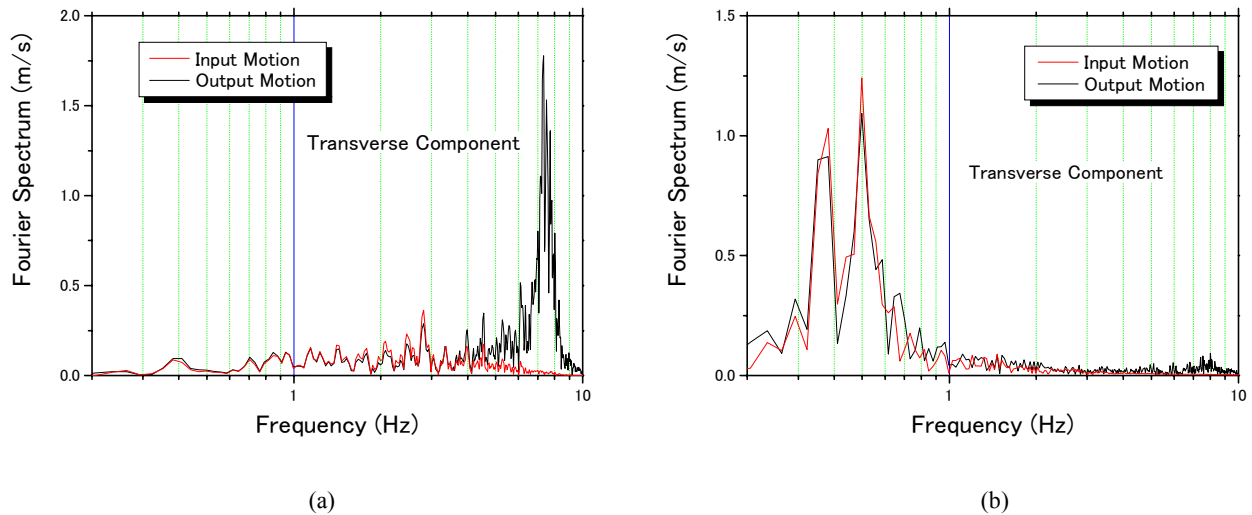


Fig. 9. Comparison between the Fourier spectrum of input acceleration and output acceleration by the driving simulator
 (a) Chiba Experimental Station record scaled to $PGA=200 \text{ cm/s}^2$ (b) SCT Mexico record scaled to $PGA=50 \text{ cm/s}^2$

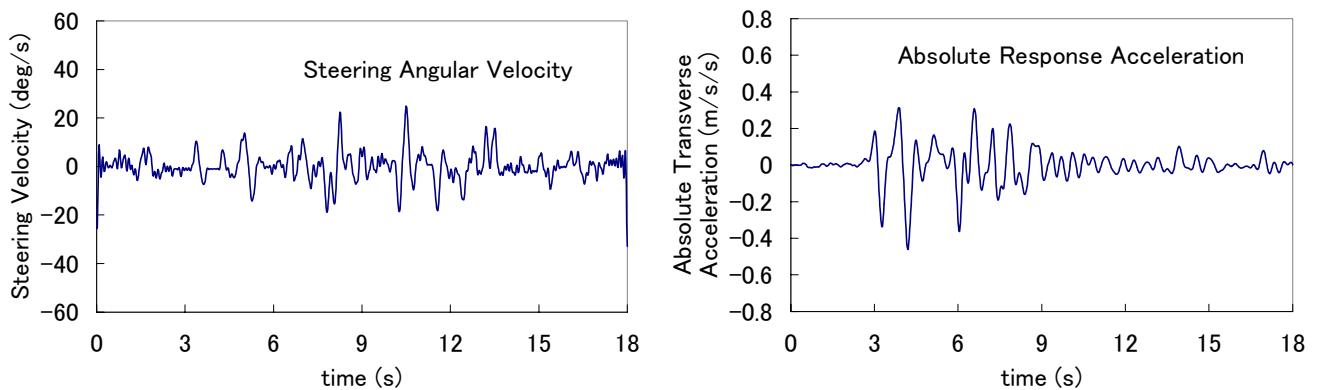


Fig. 10. Steering angular velocity of a driver and absolute response acceleration applied to the transverse direction to the vehicle
 (JMA Kobe record scaled to $PGA=100 \text{ cm/s}^2$)

神戸波よりも地震記録に高振動数域が卓越している千葉波の場合、シミュレータの自励振動と見られる 7-8Hz の振動の影響が非常に大きい。このため、入力と比較して変位レベルでは再現できているが、加速度時刻歴波形で入力との比較を行うと再現性の精度が非常に悪かった。一方、低振動数域が卓越している SCT メキシコ記録については 7-8Hz の自励振動はほとんど見られない。このように、入力地震動に高振動数域が卓越するにつれて、入力には含まれていない 7-8Hz の振動をドライビングシミュレータが励起してしまう可能性がある。しかしながら、3Hz 程度までの振動数域では動揺装置を変位制御しているが加速度レベルでも精度良くモーションが再現できることが分かった。

4 地震時車両走行模擬実験

以上までの検討の結果から、地震時車両走行模擬実験を行うにあたり、入力地震動には千葉波は適当でないと判断した。そこで、JMA 神戸記録、SCT メキシコ記録を用いて地震時車両走行模擬実験を行った。

被験者にはあらかじめ実験の趣旨は伝え、ドライビングシミュレータの走行コースの左車線を車速 100km/h で走行するように指示をした。地震発生時にブレーキ等で走行を中止することは認めなかった。ただし、アクセルをゆるめ徐々に減速させることは認めた。また、自車の前方、後方、右車線後方に併走車両を挿入し、少しでもシミュレーションに現実感が高まるように工夫した。地震入力位置はシミュレータ走行コースの直線部分を利用した。

実験には、東京大学生産技術研究所の学生 10 名にご協力いただいた。各被験者に 3 回ずつ乗車してもらい 3 パターンの地震動を入力した。被験者の慣れの影響は否定できないが、同一被験者の異なる地震動に関するデータを取得する方に実験の重きをおいた。実験中の被験者の地震動に対する反応をドライビングシミュレータの記録用 PC を用いて測定した。測定項目は、車両の X 座標、Y 座標、車速など全 19 項目である。Fig. 10、Fig. 11 にある被験者に関する JMA 神戸記録、SCT メキシコ記録をそれぞれ $PGA100 \text{ cm/s}^2$ にスケーリングしたものを入力地震動としたときのハンドル操舵角速度を示す。ここでの、ハンドル操舵角速度は記録用 PC で記録したハンドル操舵角をフー

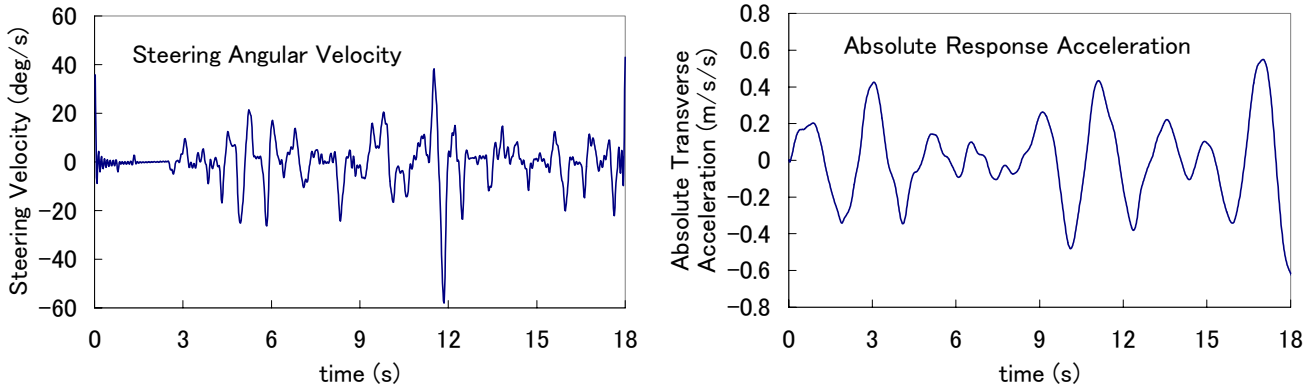


Fig. 11. Steering angular velocity of a driver and absolute response acceleration applied to the transverse direction to the vehicle (SCT Mexico record scaled to $PGA=100\text{cm/s}^2$)

リエ微分したものである。また、参考までにそれぞれのケースで車両横方向に入力された車両絶対応答加速度も併せて示す。実験走行中のブレーキ操作は禁じているのでハンドル操舵角に地震動による影響が表れやすいものと考えられ、とくに横方向の車両絶対応答との何らかの相関が強く出るものと考えられる。

5 結論

本研究では、ドライビングシミュレータを用いた地震時車両走行模擬実験を行うためにシミュレータに走行車両の地震応答を付加できるように制御プログラムを改良し、走行車両の絶対地震応答を入力した。加速度計を用いてモーションの再現性を検討したところ、入力地震動として用いた地震動に高振動数域が卓越している場合、7-8Hz 付近に見られるシミュレータの自励振動の影響が大きくなり、加速度時刻歴波形で比較したとき波形の再現性の精度の低下が見られた。しかしながら、低振動数域の卓越している地震動や高振動数域がそれほど卓越していない地震動を入力地震動として選んだ場合、変位波形で動揺装置を制御しているが、加速度レベルでも特に 3Hz 以下の振動数域で比較的精度良く波形が再現できることが確認できた。このような検討を踏まえ、シミュレータの自励振動の影響があまり見られない、JMA 神戸記録と SCT メキシコ記録を入力地震動とし地震時車両走行模擬実験を行い、地震時の運転者の反応を測定した。今後は、数多くの走行模擬実験を行い運転者の反応と地震動強さの関係について定量的に評価していく予定である。

謝辞

本研究は笹川科学研究助成より援助を受けている。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 後藤順治：地震時における道路通行規制基準の変更 - 安全性・信頼性の高い道路を目指して - , EXTEC No. 59, pp. 21-23, 2001.
- 2) 丸山喜久, 山崎文雄, 本村均, 浜田達也：常時微動の H/V スペクトル比を用いた地震動推定法の提案, 土木学会論文集, No.675/I-55, pp.261-272, 2001.
- 3) 山崎文雄, 大西淳一, 田山聡, 高野辰雄：高速道路構造物に対する地震被害推定式の提案, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol. 3, pp.3491-3496, 1998.
- 4) 松浦章夫, 富田健司, 涌井一：鉛直フランジ付き 3 次元車両モデルによる振動軌道上車両の走行性に関する研究, 土木学会論文集, No.556/I-38, pp.169-178, 1997.
- 5) 亀田弘行, 室野剛隆, 南荘淳, 佐々木伸幸：橋梁 - 車両連成系による道路橋の地震応答解析, 土木学会論文集, No.626/I-48, pp.93-106, 1999.
- 6) 丸山喜久, 山崎文雄, 山之内宏安：高速道路走行車両の地震応答解析, 土木学会論文集, No. 696/I-58, pp. 249-260, 2002.
- 7) Yamazaki, F.: Seismic monitoring and early damage assessment systems in Japan, Progress in Structural Engineering and Materials, 3, pp. 66-75, 2001.
- 8) 安部正人：自動車の運動と制御, 山海堂, 1991.
- 9) Bakker, E., Pacejka, H. B. and Linder, L.: A New Tire Model with an Application in Vehicle Dynamics Studies, Society of Automotive Engineers (SAE) paper No. 890087, 1989.
- 10) Hiramatsu, K., Satoh, K., Uno, H. and Soma, H.: The First Step of Motion System Realization in the JARI Driving Simulator, Symposium on Advanced Vehicle Control '94, pp.99-104, 1994.