

構造物の減衰が車両の走行性に与える影響の解析的検討

豊岡 亮洋¹・飯田 浩平²

¹正会員 博（工）（公財）鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

²非会員 博（工）（公財）鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

1. はじめに

橋梁・高架橋上を走行する鉄道車両の地震時挙動を考える場合、車両の動的挙動は、地震動自体の特性に加えて構造物の振動挙動の影響を大きく受ける。このため、地震時の車両の挙動、特に脱線に至るような挙動を評価する際には、構造物の周期特性や降伏震度、減衰定数などの影響を適切に考慮する必要がある。このうち、構造物の周期特性および降伏震度については、「鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計」¹⁾（以下、耐震標準）および「鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限」²⁾（以下、変位制限標準）において線形構造を対象としたSI値による照査が規定されているとともに^{2),3)}、非線形構造物に対しても、構造物の振動卓越周期と脱線限界速度の関係を表すノモグラムが提案されている⁴⁾。

一方、構造物の減衰定数についても、この設定により構造物の振動挙動が大きく異なることは振動論の教えるところであり、線形構造物において単一振動数の基盤加振を想定した場合、共振応答は減衰定数に逆比例して増大する。また、構造物が非線形挙動を示す場合においても、応答が減衰の設定方法やその値に大きく依存することが既往の研究結果等において指摘されている^{例え(5),6),7)}。このことから、減衰定数は構造物の振動特性のみならず、この上を走行する車両の走行安全性に対しても影響を及ぼすと考えられる。実際、低減衰の構造物上を車両が走行する場合、地震動により構造物に選択共振が生じ、車両の走行安全性が低下する可能性が指摘されている⁸⁾。しかし、車両走行性に関する既往の検討では、減衰定数として5%以上を想定した場合が主となっており^{1)~4)}、5%よりも低い減衰定数を有する構造物上を走行する車両の地震時走行安全性について定量的に評価しておく必要があると考えられる。

そこで本論文では、橋梁・高架橋上を走行する鉄

道車両に地震動が作用した状態を想定した動的解析を実施し、脱線に対する安全余裕度が構造物の減衰によりどのような影響を受けるかを定量的に把握することを目的として解析的検討を行った。

2. 解析の概要

地震動は構造物の振動を介して鉄道車両に作用するため、この振動の流れに沿って解析を実施する。すなわち、まずある諸元を有する構造物の地震応答解析を行い、得られた構造物天端の応答波形を車両の加振入力とした車両挙動解析を実施する。ここで、車両と構造物を一体でモデル化し、同時加振解析を行うことも可能ではあるが、本研究ではRC橋梁・高架橋のように、車両と構造物の質量比が大きく、構造物と車両の連成挙動の影響が無視できる条件を想定し、構造物と車両の解析を分離して実施した。この場合、4章で述べる車両挙動解析コードの制約から、構造物の動的解析により天端の絶対変位応答を算定し、これを車両挙動解析の入力として使用する。また、対象構造と隣接構造の振動に位相差が生じる場合、走行タイミングによっても車両挙動は変化するが、ここでは主に構造物の減衰が車両応答に与える影響に着目するため、車両挙動解析では横方向（線路直角方向）に一様に振動する構造物上を車両が走行する状態を想定して実施した。すなわち、本研究では、地震時の横方向の振動変位に対して車両走行安全性の評価を行うものであり、不同変位の影響については考慮していない。以下、構造物の応答解析および車両の走行性解析について概説する。

3. 構造物の地震応答解析

構造物の動的解析においては、図1に示すように、橋梁・高架橋を1自由度モデルにより表現し、このモデルに地表面地震動を作用させることで構造物天

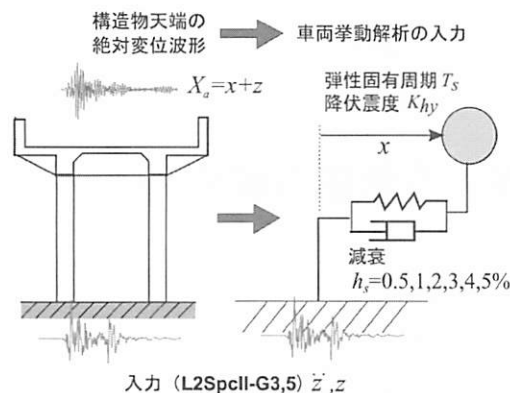


図1 構造解析モデルの概要

端の応答を算定する。構造物モデルは、線形モデル、およびClough型バイリニアモデルを有する非線形モデルの2種類を用いた。

この応答値算定において、構造物の減衰定数をパラメータとして与え、減衰定数ごとの応答波形を計算するが、鉄道車両の地震時応答は構造物の振動特性に大きく影響を受けることから、各減衰定数に対して、弾性固有周期 T_s および降伏震度 K_{hy} についてもパラメータとして解析を行った。減衰係数は、減衰定数 h_s と弾性固有周期 T_s により与えた。パラメータの設定条件を表1に示す。また、Clough型バイリニアモデルに必要な二次剛性倍率、剛性低下倍率については、耐震標準でRC橋梁・高架橋の所要降伏震度スペクトルを算定する際に用いる値として、それぞれ0.1、0.2を設定した¹⁾。

表1 構造解析パラメータ

パラメータ	設定範囲
弾性固有周期 T_s (s)	0.1~2.0
降伏震度 K_{hy}	0.3, 0.6, 線形
減衰定数 h_s (%)	0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0

入力地震動は、耐震標準に規定されるL2地震動スペクトルIIを用いるが、地盤条件の影響を考慮するため、G3地盤（普通地盤：地盤周期0.25~0.5 (s)、最大加速度872gal）およびG5地盤（軟弱地盤：地盤周期0.75~1.0 (s)、最大加速度665gal）用の地表面地震動波形を設定した¹⁾。

以上の解析により、図1のように構造物天端の絶対変位応答 X_g を算定し、以降の車両挙動解析における入力として設定した。なお、構造条件によっては構造物に残留変位が生じる可能性もあることから、絶対変位応答の算定にあたっては、あらかじめ地表面地震動の変位波形 z を算定しておき、これに構造物の地盤からの相対変位 x を加えることで算定した。

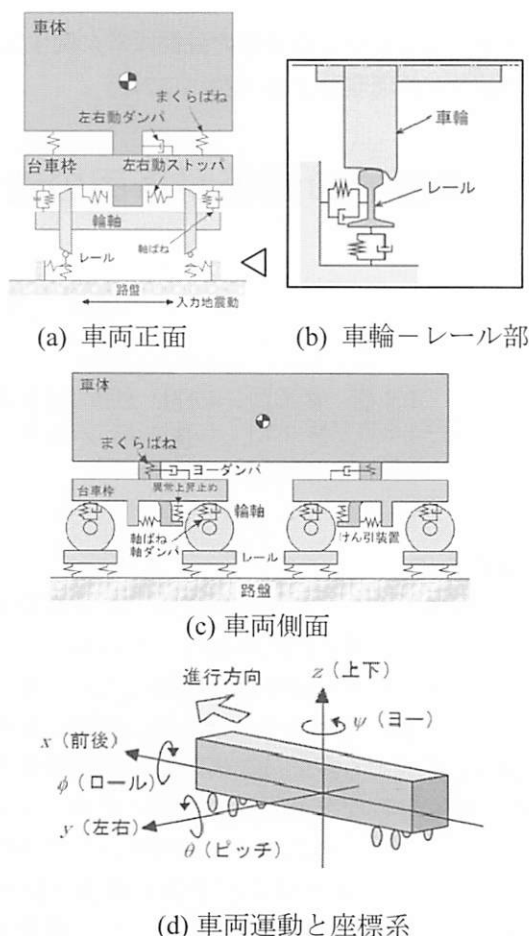
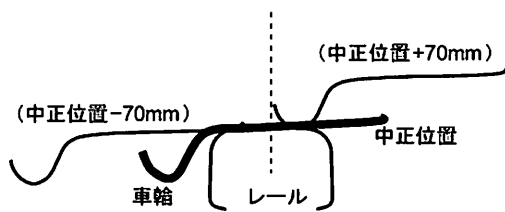


図2 車両解析モデルの概要

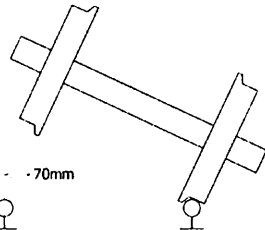
4. 地震時の車両挙動解析

次に、構造物天端の絶対変位波形を入力とした地震時車両挙動解析を実施する。この解析には、鉄道総研で開発した車両運動シミュレータ（Vehicle Dynamics Simulator、以下VDS）⁹⁾を用いた。VDSは、通常車両走行シミュレーション機能に加えて、レール下から列車の進行方向に対して上下・左右・前後の並進振動を入力できる機能を備え、車輪がレール上でジャンプする挙動や、車両が大きくロール変位する挙動を解析可能である。このプログラムによる解析については、実台車を用いた加振実験による精度の検証も行われている¹⁰⁾。

解析対象車両は、変位制限標準における地震時車両走行安全性解析で用いている高速新幹線の1車両モデルにより行った²⁾。車両モデルの概要を図2に示す。本車両モデルは、車体1個、台車2個、輪軸4個の合計7つの剛体で車両を構成し、各剛体が6自由度を持ち、車両の8車輪を支えるレールが独立に各2自由度を持つ、合計58自由度を有している。また、車体—台車枠間と台車枠—輪軸間に設ける結合要素については、ばね・ダンパ要素として、まくらばね



(a) 車輪－レール相対変位による判定



(b) 輪軸ロール変位が大きい場合の判定

図3 脱線状態の定義

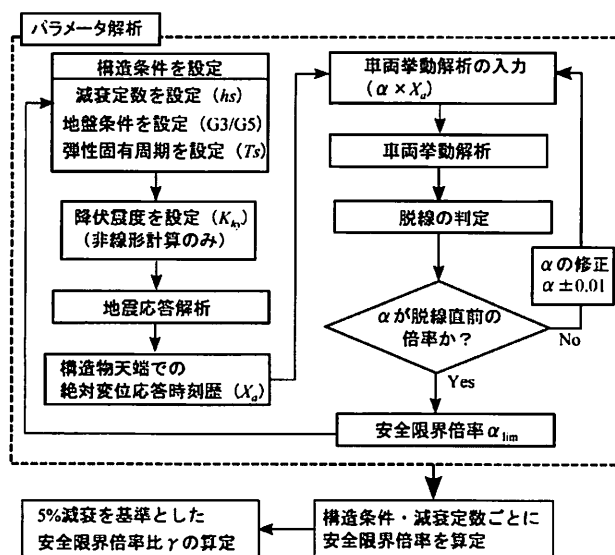


図4 構造物および車両挙動解析のフロー

および軸ばね、左右動ストッパ、軸箱上下動ストッパ、車体異常上昇止め、左右動ダンパを配置している。車輪・レール間作用力には Kalker理論に基づいたモデルを使用するが、車輪がレールから離れて運動する状態も計算可能である。なお、軌道条件は直結軌道とし、軌道不整のない直線区間とした。

以上の車両モデルに対して、3章で作成した構造条件ごとの絶対変位応答波形を入力して解析を実施した。なお、加振は入力波を各軸に同時、同波形で入力する、4軸同相加振により行った。

5. 車両走行安全性の評価

以上の解析により車両の地震時応答が得られると、これをもとに脱線の有無を判定することができる。脱線判定は、変位制限標準の基準を参考として²⁾、

車輪～レール相対左右変位、すなわち車輪踏面中心とレール頭頂面中心との左右方向の距離により行い、図3(a)に示すように、この変位が静止時の車輪の中正位置から±70 mm以上生じた際、および輪軸ロール変位が大きい場合は図3(b)のようにレール頭頂面中心と車輪の中正位置の変位差が±70 mm以上生じた際に脱線と判定した。

ただし、上記の解析では、単一の地震動に対して脱線の有無を判定することができるが、ある構造条件および地震動入力に対して、脱線に至るまでの程度の余裕度を有しているかを定量的に評価することができない。そこで本研究では、構造物の応答解析によって得られた絶対変位波形 X_a に対して、倍率 α を乗じて車両挙動解析を実施して脱線の有無を判定するとともに、この α を0.01刻みで変えて解析を繰り返した。これにより、脱線が生じる直前の倍率である安全限界倍率 α_{lim} を求め、脱線に対する安全余裕度の指標とした。これは、構造物天端位置での応答を基準入力とした漸増動的解析(IDA)を実施していることに相当し、安全限界倍率が高いほど相対的に走行安全性が高いことを示している。この安全限界倍率を構造物の減衰定数、弾性固有周期、降伏震度、入力地震動（地盤条件）ごとに算定し、減衰の大小と車両の走行安全性の関係を定量化した。

最後に、以上により求めた安全限界倍率を用いて、1章で述べたように、一般的な走行安全性の評価に用いられている5%減衰時の車両応答が、減衰定数によりどの程度変化するかを把握する。このため、減衰定数5%の場合の安全限界倍率 $\alpha_{lim}(5\%)$ を基準とし、これより低いある減衰定数 h_s (=0.5～4.0%)の構造物における安全限界倍率 $\alpha_{lim}(h_s\%)$ に対する比を、安全限界倍率比 γ として次式により定義した。

$$\gamma(h_s\%) = \frac{\alpha_{lim}(h_s\%)}{\alpha_{lim}(5\%)} \quad (1)$$

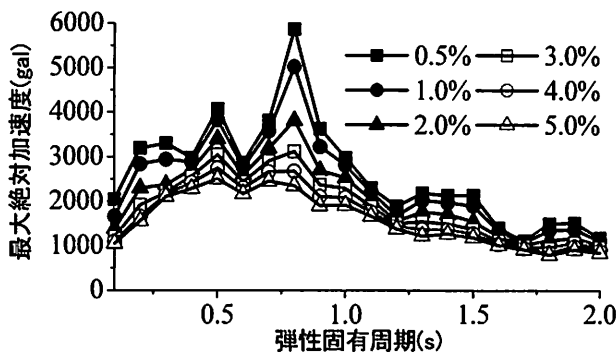
すなわち、 γ が1を下回るほど、構造物の減衰が車両の走行安全性に及ぼす影響が大きく、5%減衰の場合と比較して車両脱線に対する余裕度が相対的に低下することを表している。本研究では、この安全限界倍率比により、減衰が車両走行安全性に与える影響を評価した。以上述べた、構造物および車両挙動解析の一連のフローをまとめて図4に示す。

6. 解析結果および考察

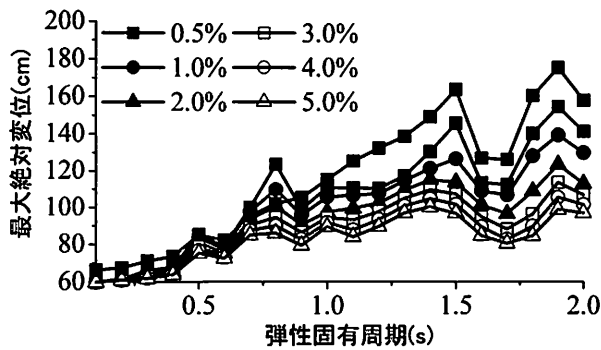
6. 1 構造物の応答解析

(1) 構造物が線形の場合

図5には、G3地盤について、最大絶対加速度およ

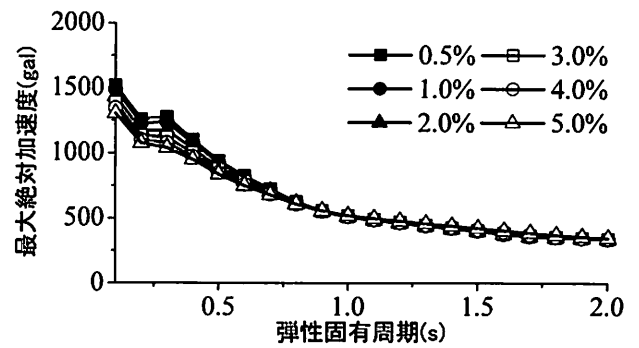


(a) 最大絶対加速度応答

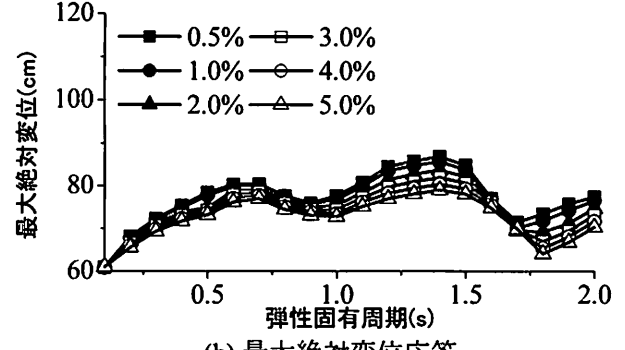


(b) 最大絶対変位応答

図5 減衰別の最大応答 (線形: G3 地盤)

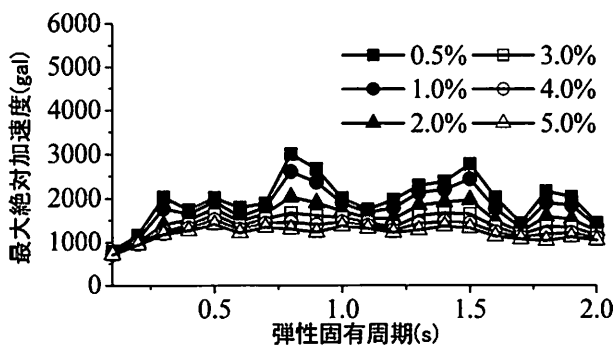


(a) 最大絶対加速度応答

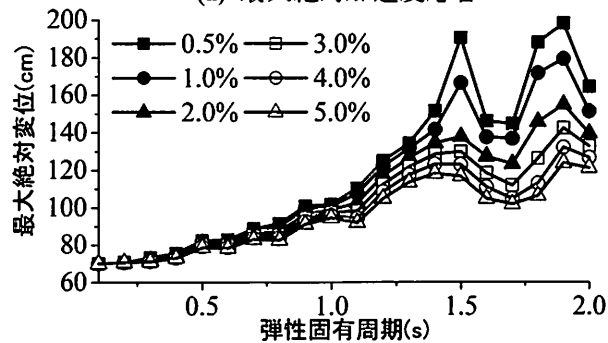


(b) 最大絶対変位応答

図7 減衰別の最大応答 ($K_{ty}=0.3$: G3 地盤)

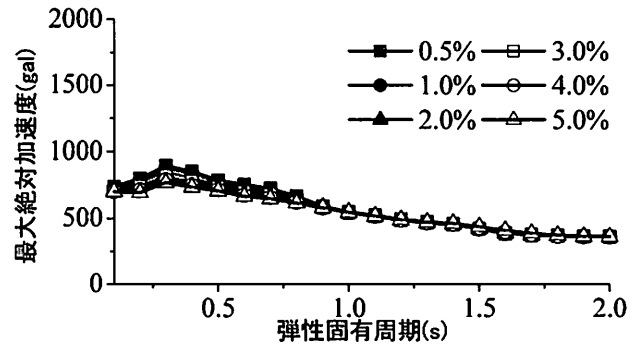


(a) 最大絶対加速度応答

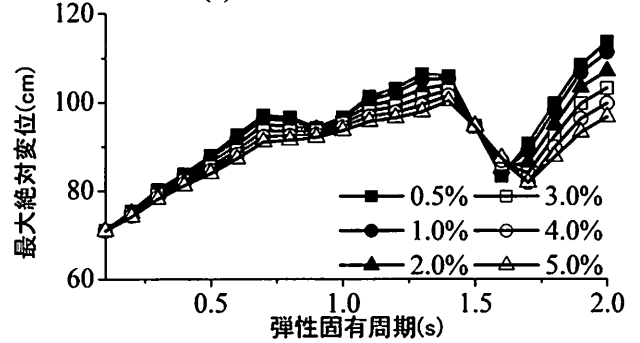


(b) 最大絶対変位応答

図6 減衰別の最大応答 (線形: G5 地盤)



(a) 最大絶対加速度応答

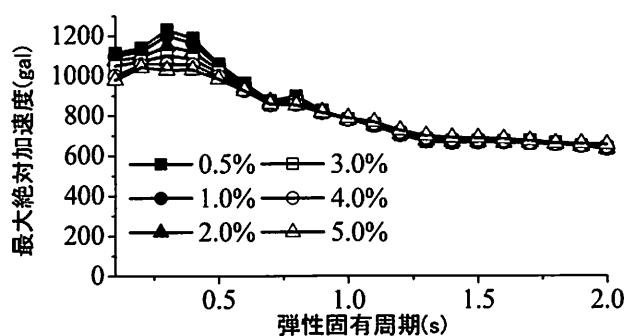


(b) 最大絶対変位応答

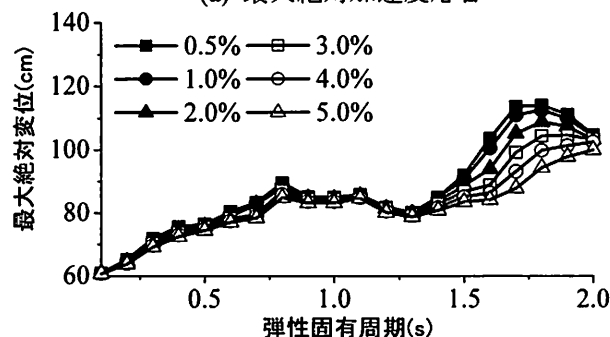
図8 減衰別の最大応答 ($K_{ty}=0.3$: G5 地盤)

び最大絶対変位と減衰定数の関係を、弾性固有周期ごとに示す。図6はG5地盤における同様の関係を示す。このように、今回使用した地震動では、いずれの地盤条件においても弾性固有周期が長くなるほど絶対加速度の変動がほぼ一定となり、この影響で絶

対変位が増大する傾向がある。地盤条件別で比較すると、図5(a)と図6(a)の比較から、G3地盤では弾性固有周期1秒程度以下の領域でG5地盤よりも大きな加速度応答を示しているが、これはG3地盤波の方が同周期帯域での入力成分が大きいことが影響してい

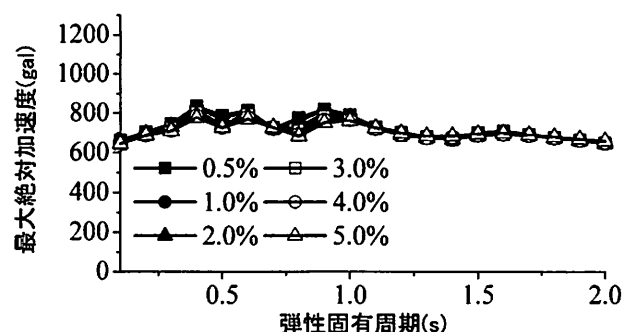


(a) 最大絶対加速度応答

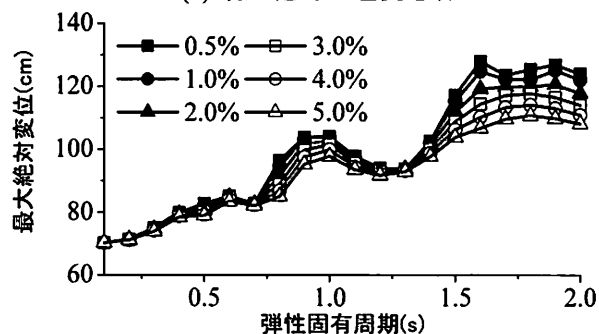


(b) 最大絶対変位応答

図9 減衰別の最大応答 ($K_{hy}=0.6$: G3 地盤)



(a) 最大絶対加速度応答



(b) 最大絶対変位応答

図10 減衰別の最大応答 ($K_{hy}=0.6$: G5 地盤)

る。ただし、周期が低い領域であるため、図5(b)と図6(b)の比較から、1秒程度以下の周期帯域において、この絶対加速度の差が絶対変位応答に与える影響はそれほど顕著には生じていない。

減衰定数の影響については、減衰定数を5%よりも低くするほど、絶対加速度、絶対変位いずれも増

加していることが分かる。特に長周期領域では絶対変位の絶対量が成長することから、減衰定数の低下に伴う応答の増加割合が各周期でほぼ同じであったとしても、減衰定数の低下による応答の絶対量の変化は弾性固有周期が長い領域ほど大きく生じ、長周期領域では減衰定数の影響がより明確に生じている。また、減衰定数が低い場合、特に長周期領域において絶対変位応答に局所的な変動が生じるが、減衰定数が高くなると相対変位応答が低減・平滑化されるため、この変動の程度は相対的に低下している。

(2) 構造物が非線形の場合

非線形構造における最大絶対加速度および最大絶対変位と減衰定数の関係について、降伏震度0.3におけるG3地盤の結果を図7、G5地盤の結果を図8に示す。同様に、降伏震度0.6におけるG3地盤の結果を図9、G5地盤の結果を図10に示す。構造物の非線形応答を考慮した場合、弾性固有周期が長いほど絶対変位応答が増加する傾向を示すことは線形構造と同様であり、地盤条件による差異については、G5地盤の方がG3地盤よりも絶対変位量がやや大きい。ただし、図7(a)～図10(a)の絶対加速度応答の傾向から分かるように、構造物の塑性化により、減衰定数によらずほぼ絶対加速度応答が頭打ちとなっていることが分かる。これに加えて、構造物自体の塑性エネルギー吸収が卓越して初期減衰定数の影響が相対的に低下すると考えられることから、図7(b)～図10(b)に示すように、減衰定数が絶対変位に与える影響は線形系ほど顕著には生じていないことが分かる。このことは、降伏震度0.6の方が0.3の場合よりも大きな絶対変位量を示し、減衰定数による感度がより大きいことから推測される。なお、0.5秒より低い周期領域では、特にG3地盤において図7(a)、図9(a)のように応答加速度が入力加速度と比べて増幅しているが、これは低周期領域では弾性限界変位が小さく塑性応答が大きいこと、および初期剛性や二次剛性が相対的に大きいことが要因である。

以上の傾向から、最大応答値のみに着目すると、構造物の降伏震度が高く線形系に近くなるほど、また構造物の弾性固有周期が大きいほど、絶対変位応答に与える減衰定数の影響がより大きく生じており、車両挙動もこうした構造条件下でより減衰定数の影響を受けることが推測される。

6. 2 車両走行安全性の評価

(1) 構造物が線形の場合

図11には、G3地盤およびG5地盤について、線形

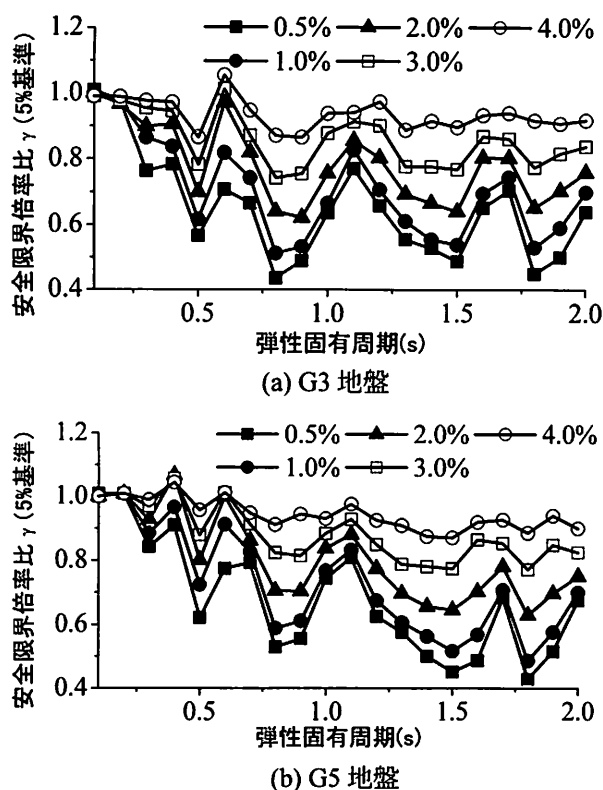


図11 減衰別の安全限界倍率比
(線形：減衰 5%=1.0)

構造の応答を用いた車両挙動解析により得られた安全限界倍率比 γ (5%減衰時の車両応答を基準)を、減衰定数および弾性固有周期ごとに示す。

この図から、まず全体的な傾向としては、いずれの減衰定数および地盤条件においても、構造物の弾性固有周期が大きいほど安全限界倍率比 γ は相対的に低下する傾向がみられ、これは図5(b)、図6(b)でみたように、長周期領域において構造物の絶対変位応答の絶対量が増加する傾向と一致している。地盤条件別では、弾性固有周期1秒以下の領域で、同一の減衰定数においてG5地盤の方が相対的にやや高い安全限界倍率比を示しているものの、全体的な傾向としてはほぼG3地盤の結果と同様であり、今回使用した地震動においては、地盤条件の影響は小さい結果となった。

次に、減衰定数の影響については、図11のように、減衰定数により結果に明確な差が生じており、5%よりも低い減衰定数を設定した場合、ほぼ全ての周期帯域で相対的に車両走行安全性が低下することが分かる。全体的には、長周期領域の方が減衰定数による γ の低下割合が大きいことが、これは6.1(1)でみたように、減衰定数の違いによる絶対変位応答の絶対量の差が長周期側でより大きいことが影響していると考えられる。また、局所的な周期における γ の増

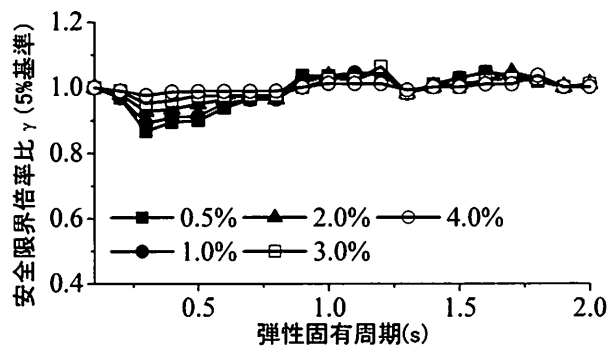
減傾向についても、図5(b)、図6(b)における低減衰のケースでの増減傾向とほぼ逆の傾向で生じている。構造物の減衰が5%から低減衰となるほど絶対変位応答の変動が局所的に生じることは先に述べたが、この構造応答の変動が車両の走行性にも影響していると考えられる。地盤条件別では、G5地盤の方が弾性固有周期1秒以上の領域でややG3地盤よりも影響が大きく見られるが、全体的には安全限界倍率の低下割合は両地盤条件においてほぼ同等となっており、今回設定した入力地震動においては、地盤条件よりも減衰定数の設定値、および弾性固有周期の方が車両走行安全性に及ぼす影響が大きい結果となった。

(2) 構造物が非線形の場合

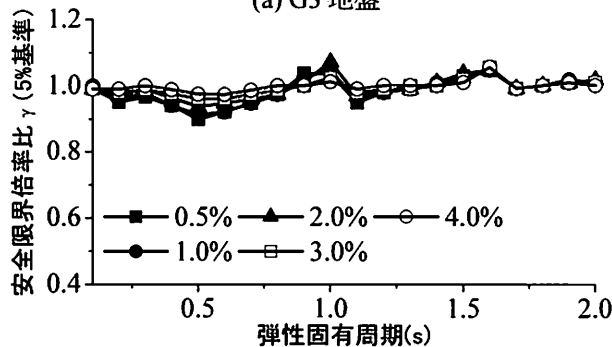
構造物の非線形応答を考慮した場合の安全限界倍率比 γ について、降伏震度0.3におけるG3地盤およびG5地盤の結果を図12に、降伏震度0.6におけるG3地盤およびG5地盤の結果を図13にそれぞれ示す。

これらの図から、全体的な傾向として、いずれの降伏震度においても、弾性固有周期に対する安全限界倍率の低下割合は線形構造物の場合と比較して限定的である。これは、図7～図10に示したように、構造物の塑性化の影響で絶対加速度が頭打ちになり、弾性固有周期に対する絶対変位応答の増加の絶対値および増加割合が線形構造物と比較して限定的であることに起因していると考えられる。このように、構造物の塑性化により、横方向の振動変位に対する走行安全性が向上する傾向は、減衰定数5%における非線形構造を対象とした既往の検討でも得られている¹¹⁾。また、地盤条件による影響については有意な差はみられないが、これについても、構造物の塑性化の方が入力波の特性に対する依存性よりも応答に与える影響が大きいと考えられる。

次に、減衰定数の影響については、いずれの降伏震度、地盤条件においても、弾性固有周期が0.5秒より低い領域でわずかに減衰定数による差異が見られるものの、減衰定数の感度は線形系よりも大幅に低下しており、減衰定数の違いによる車両走行安全性の低下割合は、弾性固有周期によらずほぼ1.0に近い値を示している。この理由としては、6.1(2)で述べたように、構造物の塑性化により絶対加速度の頭打ちが生じること、および構造物の履歴吸収エネルギーによる減衰が支配的となること等から、減衰定数が構造物応答に与える影響が相対的に小さく、こうした構造物の振動特性が車両挙動にも影響しているためと考えられる。このように、構造物が非線形応答を示す場合、減衰定数の設定値が車両走行性

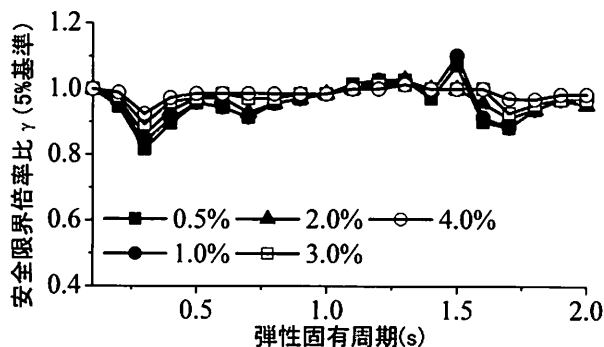


(a) G3 地盤

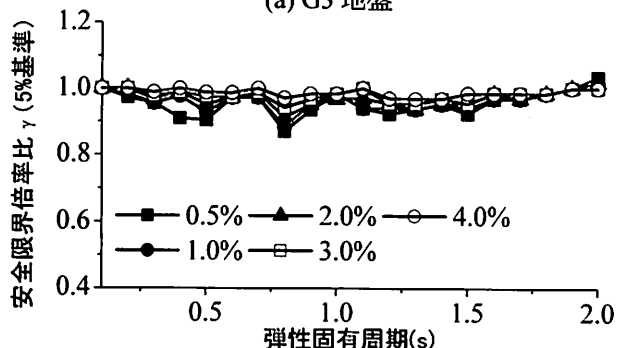


(b) G5 地盤

図 12 減衰別の安全限界倍率比
($K_{hy}=0.3$: 減衰 5%=1.0)



(a) G3 地盤



(b) G5 地盤

図 13 減衰別の安全限界倍率比
($K_{hy}=0.6$: 減衰 5%=1.0)

に与える影響は線形構造物の場合と比較して相対的に小さい結果となった。

(3) 結果のまとめ

以上の結果から、今回設定した地震動および構造条件においては、構造物が非線形挙動を示す場合、減衰定数の設定値が横方向の振動変位に対する車両走行安全性に及ぼす影響は小さい結果となった。一方で、構造物が線形挙動を示す場合、車両走行安全性は弾性固有周期の他に減衰定数に大きく影響を受ける結果となった。なお、構造物が非線形挙動を示す場合においても、塑性化程度が弾性範囲付近に留まり、ほぼ線形挙動と見なせるような場合には、この線形構造物における傾向が成立すると考えられる。

7. 結論

本研究では、構造物の減衰定数が車両走行安全性に及ぼす影響を構造条件、地盤条件との関係で定量的に評価するため、構造物の地震応答解析、および得られた構造物応答を用いた車両挙動解析を実施した。本研究により得られた結論を以下に示す。

- (1) 線形構造物を対象として、車両挙動に与える減衰定数の影響を、5%減衰時の安全限界倍率を基準とした低下割合である安全限界倍率比で定量化した。その結果、5%よりも低い減衰定数を設定した場合、ほぼ全ての弾性固有周期帯域で相対的に車両走行安全性が低下し、特に弾性固有周期の長い領域で相対的に低下割合が増加する傾向が生じた。すなわち、今回の解析で設定した地震動に対しては、構造物の弾性固有周期に加えて、減衰定数についても車両の動的挙動に及ぼす影響が大きい結果となった。この傾向は、構造物が線形挙動を示す場合の他、構造物の塑性化程度が弾性範囲付近に留まるような場合にも成立すると考えられる。
- (2) 構造物が非線形挙動を示す場合の安全限界倍率比を減衰定数ごとに比較した結果、減衰定数の設定が車両走行安全性に及ぼす影響は、線形構造物の場合と比較して限定的となる結果となった。これは構造物が塑性化することで絶対加速度の頭打ちが生じること、および構造物の履歴吸収エネルギーによる減衰が支配的となること等が要因として考えられる。

なお、今回の解析は、線形および非線形構造いずれにおいても、地盤条件、すなわち地震動の違いが車両挙動に及ぼす影響は限定的となる結果となったが、車両の脱線挙動は地震動の卓越周期や経時特性

にも大きく影響を受けることから^{2),4)}、今後様々な特性を有する地震動を対象に同様の検討を行う予定である。また、本研究と並行して実構造を対象とした固有周期および減衰定数の実測を行っており、これらの成果と本研究を関連づけることで、鉄道路線内の多数の構造物を対象に、減衰の影響で走行安全性が相対的に低下する構造条件を抽出する手法を構築する予定である。

8. 謝辞：本研究は、国土交通省の技術開発費補助金を受けて実施したものである。ここに記して関係各位に謝意を示す次第である。

参考文献

- 1) 国土交通省鉄道局監修、鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，2012.
- 2) 国土交通省鉄道局監修、鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限，2006.
- 3) 羅休，宮本岳史：地震時の構造物振動変位に対する列車走行性の照査法，鉄道総研報告 Vol.20，No.12，pp.19-24，2006.
- 4) 室野剛隆，野上雄太，宮本岳史：簡易な指標を用いた構造物および走行車両の地震被害予測法の提案，土木学会論文集A，Vol. 66，No. 3，pp. 535-546，2010.
- 5) 室野剛隆，滝沢聡，畠中仁，棚村史郎：構造物の非線形動的解析における減衰マトリクスの設定に関する検討，第4回地震時保有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講演論文集，pp.115-122，2000.
- 6) 堺淳一，運上茂樹：非線形動的解析における応答せん断力の評価と粘性減衰の影響，第11回地震時保有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講演論文集，pp.189-196，2008.
- 7) 大越靖広，藤田亮一，森敦：減衰の設定方法と橋梁の形式が非線形動的解析結果に及ぼす影響，第11回地震時保有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講演論文集，pp. 197-202，2008.
- 8) 運輸安全委員会：鉄道事故調査報告書RA2013-1-1，2013.
- 9) 宮本岳史，石田弘明，松尾雅樹：地震時の鉄道車両の挙動解析，日本機械学会論文集C編，Vol.64，No.626，pp.1236-1243，1998.
- 10) 宮本岳史，松本信之，曾我部正道，下村隆行，西山幸夫，松尾雅樹：大変位軌道振動による実物大鉄道車両の加振実験，日本機械学会論文集C編，Vol.71，No.706，pp.1849-1855，2005.
- 11) 松本信之，曾我部正道，涌井一，田辺誠：構造物上の車両の地震時走行に関する検討，鉄道総研報告Vol.17，No.9，pp.33-38，2003.
- 12) 日本建築学会：建築物の減衰，日本建築学会，2000.