論文　高架橋上の地震時車両走行性に関する支配要因分析

後藤　恵一[1]・曽我部正道[1]・徳永宗正[1]・伊藤隼人[2]・小林薫[2]・上半文昭[1]

[1]正会員　（公財）鉄道総合技術研究所　鉄道力学研究部（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）
E-mail:goto.keiichi.90@rtri.or.jp

[2]正会員　東日本旅客鉄道　JR東日本研究開発センター　フロンティアサービス研究所
（〒331-8513 埼玉県さいたま市北区日進町2-479）
E-mail:hayato-ito@jreast.co.jp

本研究では，車両と構造物の動的相互作用を考慮可能な解析手法を用いて，地震時における高架橋上の車両脱線の支配要因となる構造物の振動変位及び構造物境界間の不同変位について，各種パラメータが脱脱線限界値に及ぼす影響を明らかにするとともに，桁式高架橋が多く存在するモデル線区での地震時車両走行シミュレーションを実施し，脱線発生位置を詳細に分析することで，線区内の地震時車両走行性に関する相対的な弱点構造物を特定した．さらに，弱点構造物を含めたモデル線区内の全構造物について，振動変位と不同変位の発生状況が地震時車両走行性に及ぼす影響を分析可能な手法を提案し，提案手法による弱点構造物位置と車両走行シミュレーションによる脱線位置が比較的良い一致を示すことを確認した．

Key Words : *seismic vehicle running safety, dynamic interaction analysis, vibration displacement, differencial displacement, non-linear response*

1.　はじめに

近年の大規模地震動の頻発に対し，特に構造物上の地震時車両走行性への関心が高まっている．今後，既設構造物の耐震補強を行っていく上では，構造物自体の耐力や変形性能の向上はもちろんのこと，地震時車両走行性の向上，即ち，脱線リスク最小化を視野に入れた構造物の補強が重要になること考えられる．

上記のような背景から，筆者らはこれまで数kmオーダーの連続する構造物群全体を対象とした地震時車両走行シミュレーション手法を構築するとともに，その結果を基に脱線・逸脱に関するフラジリティ曲線（地震動指標に対する被害発生確率）を算出することで，地震時車両走行性や各種対策工の効果の定量化を可能にしてきた[1), 2)]．一方で，上記の研究は，構造物群全体を対象としたマクロな視点の評価であり，構造物群中において脱線に対してクリティカルとなる構造物を特定するには至っていなった．今後，地震時車両走行性の向上を目的とした効率的かつ効果的な構造物の補強を実施していく上では，弱点箇所となる構造物を特定するとともに，振動変位や不同変位といった脱線の支配要因[3)]の影響度を把握し，その影響度に応じた適切な補強を行う必要がある．

そこで本研究では，地震時における高架橋上の車両脱線の支配要因となる構造物の振動変位及び構造物境界間の不同変位について，各種パラメータが脱線限界値に及ぼす影響を明らかにするとともに，これまで検討事例が少ない桁式高架橋が多く存在するモデル線区における地震時車両走行シミュレーションを実施し，脱線の発生位置を詳細に分析することで，線区内の地震時車両走行性に関する相対的な弱点構造物を特定する．さらに，弱点構造物を含めたモデル線区内の全構造物について，振動変位と不同変位の発生状況が地震時車両走行性に及ぼす影響を定量的に評価する．

2.　解析手法

本研究では，脱線前後の車両挙動を解析可能な，新幹線車両と鉄道構造物との動的相互作用解析プログラムDIASTARS Ⅲを用いた[4),5),6)]．以下にその概要を述べる．

(1)　車両の力学モデル

図-1に車両の力学モデルを示す．車両は，車体，台車，輪軸の各構成要素を剛体と仮定し，これら剛体をばね，

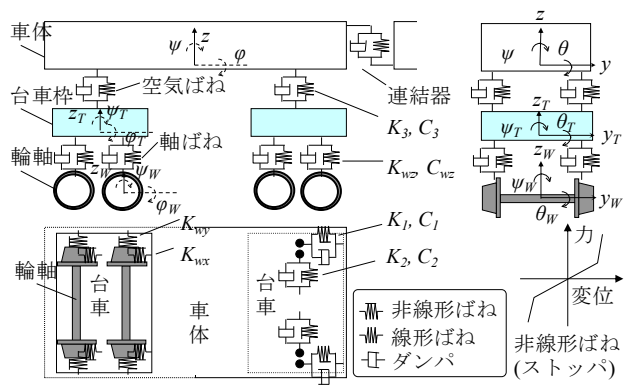


図-1　車両の力学モデル

ダンパで結合した三次元モデルとした．1車両当たりの自由度は31である．また，実車では各構成要素間に著大な相対変位を抑制できるストッパが設けられていることから，これを表現するために，ばねはバイリニア形の非線形ばねとした．なお，力学モデルの妥当性については，実物大車両模型を用いた検証実験[7]や，汎用の機構解析プログラムとの比較・検証が既に実施されている[8]．なお，本研究で用いる車両諸元は，近年の新幹線車両の諸元を参考に仮定した．

(2)　線路構造物の力学モデル

DIASTARS IIIでは，梁，シェル，ソリッド，ばね等のの有限要素を用いて，任意形式の構造物や軌道をモデル化することができる．本研究における線路構造物の力学モデルの詳細については別途後述する．

(3)　車輪とレール間の力学モデル

図-2 に脱線前の車輪／レール間の力学モデルを示す．車輪とレールの動的相互作用力は，両者の正確な幾何学形状を考慮して，接触点と接触角から計算する．具体的には，鉛直方向では，車輪のレールからの浮き上がりを考慮するとともに，車輪とレール間の接触力を *Hertz* の接触理論に基づく接触ばねを用いて評価する．水平方向では，車輪フランジとレールとの間に遊間が確保されている場合には，接触面の接線方向にクリープ力が働く．クリープ力は，車輪がレール上を転がりながら進むときのクリープ（すべり）により発生する接線力で，すべり率が大きくなると摩擦力を上限として飽和する．車輪フランジとレールとが接触する場合には，レール小返りばねに基づくフランジ圧が接触面法線方向に働く．ここで，本研究では軌道不整の影響については考慮していない．

脱線後の車輪／軌道間の力学モデルについては，本研究が脱線までの車両挙動の評価を主にすることから詳細は文献6)に譲るが，有限要素法と剛体断面モデルを組み合わせた手法により，脱線車輪と軌道スラブやまくらぎ，逸脱防止ガード，レールなどのさまざまな軌道部材との

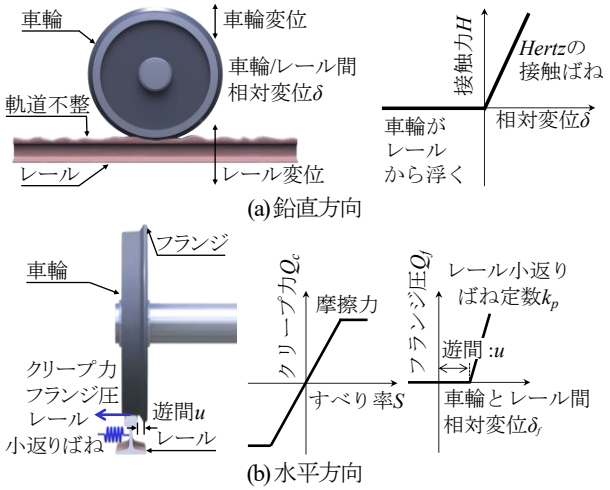


図-2　車輪／レール間の力学モデル

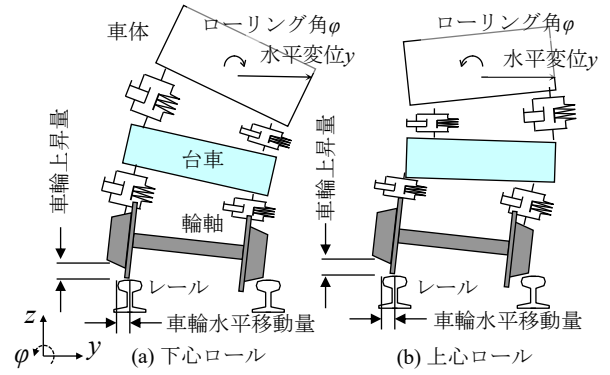


図-3　地震時車両走行性の評価指標と脱線モード

接触を考慮することが可能である．

(4)　数値解析法

DIASTARS IIIでは，車両および線路構造物に関する運動方程式を連立して解くことにより，複数の車両からなる長大な車両と構造物との動的な連成解析を行うことができる．効率的な数値解析を行うために，車両および線路構造物の運動方程式をモーダル変換する．得られる車両および線路構造物のモーダル座標系上での運動方程式を，*Newmark*の平均加速度法により時間増分Δt単位に解いていく．ただし，運動方程式が非線形であることから，不釣合力が十分小さくなるまでΔt内において反復計算を行う．本研究ではΔt=1.0×10^{-4}secを標準とした．

(5)　地震時の車両走行性の評価指標

図-3 に地震時車両走行性の評価指標と脱線モードを示す．評価指標には，車輪とレールの相対水平移動量（以下，車輪水平移動量という）を用い，その限界値は±70mm とした．これは，車輪がレールから外れて落ちる直前の状態を表している [3]．また，地震時の車両の脱線モードは，概ね 0.8Hz 以下で卓越する下心ロールと概ね 1.3Hz 以上で卓越する上心ロールに大別され，車体の水平動とローリング動の位相により判別される．

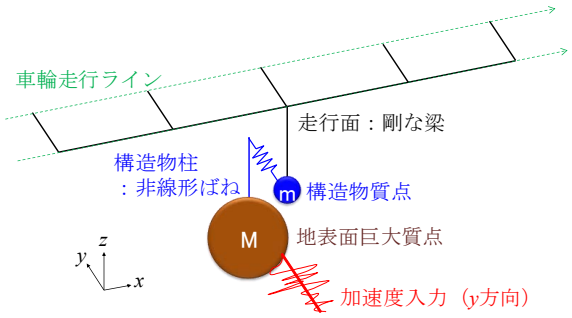


図-4　振動変位の検討に用いる構造物の力学モデル

3.　振動変位・不同変位に対する脱線限界値

本章では，振動変位及び不同変位を対象に，各種パラメータが脱線限界値に及ぼす影響を検討する．また，不同変位には角折れと目違いが存在するが，本検討では角折れのみに着目する．

(1)　検討方法

a)　振動変位に関する検討

図-4に振動変位の検討に用いる構造物の力学モデルを示す．構造物はトリリニア型の骨格曲線，標準型の履歴特性を持つ1自由度系でモデル化した．骨格曲線は，等価固有周期T_{eq}，降伏震度k_{hy}，最大震度k_{hmax}をパラメータとして設定し，2次勾配を1次勾配の1/10，3次勾配を1次勾配の1/100とした．構造物質点の質量は，車両質量（1両分）の20倍で一定とし，構造物柱ばねの初期勾配を変化させることで所定の等価固有周期とした．また，加速度入力用の地表面巨大質点は構造物質量の1000倍とした．減衰は，構造物の各モードに対して5%のモード減衰比ζとして与えた．

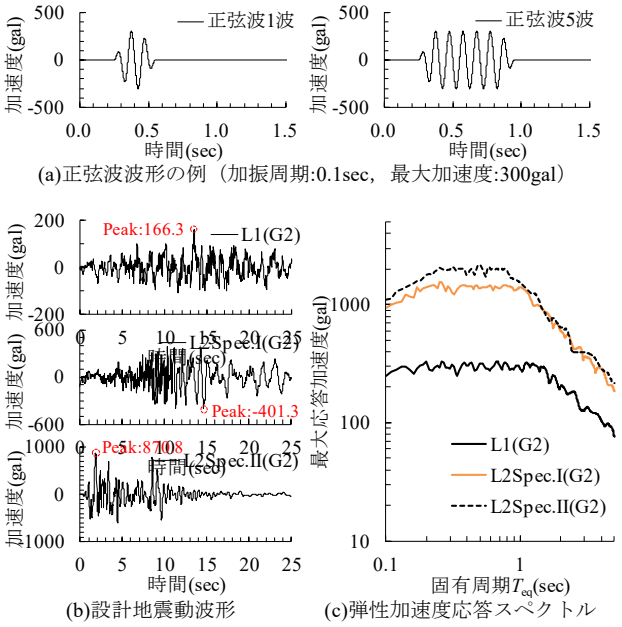
表-1に振動変位の検討パラメータを示す．入力波形には緩衝区間付きの正弦波（1波，5波）及び設計地震動であるG2地盤用のL2スペクトルI地震動，L2スペクトルII地震動[9]（以下，「L2Spec.I(G2)，L2Spec.II(G2)」）を用いた．また図中には参考にG2地盤用のL1地震動[9]についても示す（以下，「L1(G2)」）．ここで，正弦波による加振は加振周期と脱線限界の関係を把握するために，設計地震動による加振は構造物の振動特性が脱線限界に与える影響を検討するためのものである．図-5に，各入力波形及び設計地震動による1質点系の弾性加速度応答スペクトルを示す．正弦波加振時には構造物柱ばねは剛と仮定した．車両は1両編成とし，車両速度は320km/hとした．

b)　不同変位に関する検討

図-6に不同変位（角折れ）の基本形状及び緩衝区間のモデルを示す．角折れは，剛軌道上の左右方向の軌道不整によりモデル化した．角折れ形状は，設計標準[3]に準じて定めた．この角折れ形状は空間中に固定されている．また，角折れが生じる桁端前後には，曲率の不連続性を

表-1　振動変位の検討パラメータ

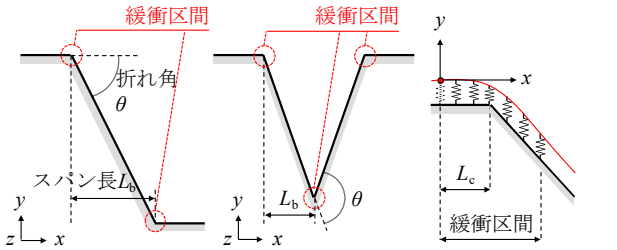
波形種別	入力波形	最大加速度 (gal)	T_{eq} (sec)	k_{hy}	k_{hmax}
正弦波	・1波，5波（加振周期）0.1～2.0sec	300～2280（20刻み）	（剛）	（剛）	（剛）
設計地震動	・L2Spc.I(G2) ・L2Spc.II(G2)	20～2000（20刻み）	0.1～2.0（0.1刻み）	0.3，0.7，∞（弾性）	$1.2k_{hy}$



(a)正弦波波形の例（加振周期:0.1sec，最大加速度:300gal）

(b)設計地震動波形　(c)弾性加速度応答スペクトル

図-5　入力波形と弾性加速度応答スペクトル



(a) 平行移動　(b) 折れ込み　(c) 緩衝区間モデル

図-6　不同変位（角折れ）の基本形状

表-2　不同変位の検討パラメータ

角折れ形状	スパン(m)	折れ角(rad)	連数(連)	車両速度(km/h)
・平行移動 ・折れ込み	10～50（10刻み）	1～30（1刻み）	1, 3, 5	100～400（1両編成）

解消するために，式(1)に示す緩衝区間を設けた．

$$
\begin{aligned}
&0 \le x \le L_c \\
&\quad y = \frac{\theta}{4\beta} e^{\beta(x-L_c)}\{cos\beta(x-L_c) + sin\beta(x-L_c)\} \\
&L_c < x \le 2L_c \\
&\quad y = \frac{\theta}{4\beta} e^{-\beta(x-L_c)}\{cos\beta(x-L_c) - sin\beta(x-L_c)\} \\
&\qquad\qquad + \theta(x-L_c)
\end{aligned}
\tag{1}
$$

ここに，L_cは緩衝区間の長さの1/2，θは桁端部の角折れ量，xは緩衝区間開始点からの距離，βは式(2)に示す弾性床上の梁の相対曲げ剛度である．

$$\beta = \sqrt[4]{k/4EI} \tag{2}$$

ここに，kは単位長さ当たりの横方向の軌道支持ばね定

数，EIは横方向の軌道の曲げ剛性である．軌道構造は，スラブ軌道（60kgレール）を想定した（k=480N/mm/mm, EI =1.02MN×m^2）[3]．

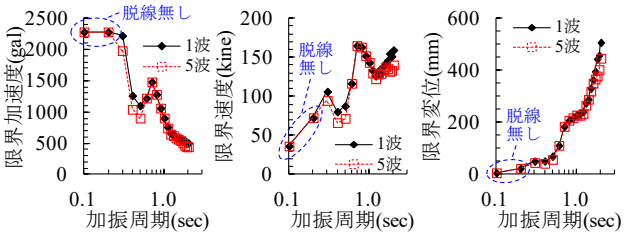
表-2に不同変位の検討パラメータを示す．平行移動及び折れ込みについて，スパン，折れ角，連数及び車両速度を変化させた．また，車両は1両編成とした．

(2) 検討結果

a) 振動変位に関する検討

図-7に正弦波に対する車両の脱線限界を示す．限界加速度に着目すると，加振周期が長くなるほど限界値が低下していく傾向が確認できる．また，上心ロールと下心ロールの遷移領域である0.7sec程度においては限界加速度が極大値を持つことも分かる．正弦波の波数による違いに関しては，上心ロール及び下心ロールをより励起しやすい5波が1波と比較して最大15%限界値が低下した．

図-8に各設計地震動に対する構造物の振動特性と脱線限界加速度（脱線が発生する限界の地表面入力加速度（以降，「PGA$_L$」）の関係を示す．図から，各設計地震動の地表面入力加速度（以降，「PGA」）に対して，ある等価固有周期を有する構造物の応答範囲（弾性領域，降伏領域など）とPGA$_L$の関係を読み取ることができる．図より，構造物の降伏震度が低くなるにつれて，車両の脱線よりも構造物の降伏が先行するため，車両側に地震力が伝わらず，見掛け上，PGA$_L$が向上する傾向が見て取れる．その傾向は，長周期側で顕著である．即ち，構造物の非線形化により振動変位に対する車両走行性は有利になることを意味する．これは，**図-7(c)**に示す正弦波に対する脱線限界変位が長周期加振になるほど大きくなることからも理解できる．一方で不同変位は大きくなるため，降伏震度が低い構造物に対しては不同変位が車両走行性に及ぼす影響が大きくなると推察される．構造物の降伏震度がある程度高い場合（図では降伏震度0.7以上）について各設計地震動を同一の最大加速度で比較した場合，大きな振幅を有する波の繰り返しが多いL2Spec.IがL2Spec.IIと比較して脱線限界が低くなる傾向にあった．図中には各地震波の元波ラインも示しているが，構造物の降伏震度が0.7以上の場合であれば，本検討の車両特性では，L2Spec.II(G2)では振動変位のみで脱線に至ること，また，L2Spec.I(G2)では構造物の等価固有周期により脱線の発生状況が異なることが分かる．

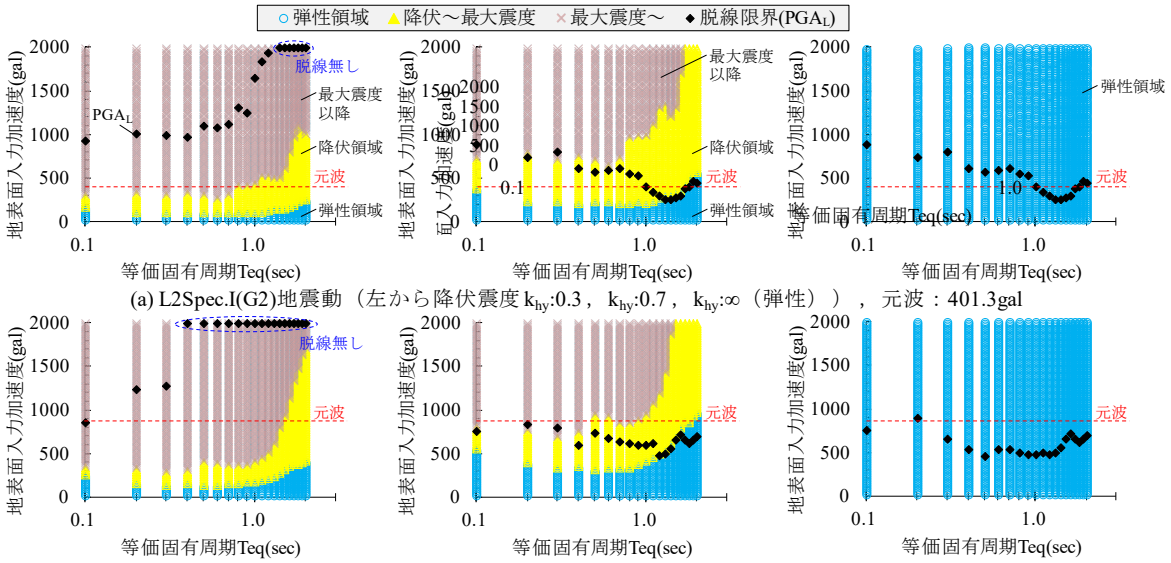


(a) 限界加速度　(b) 限界速度　(c) 限界変位

図-7　正弦波に対する車両の各脱線限界

b) 不同変位に関する検討

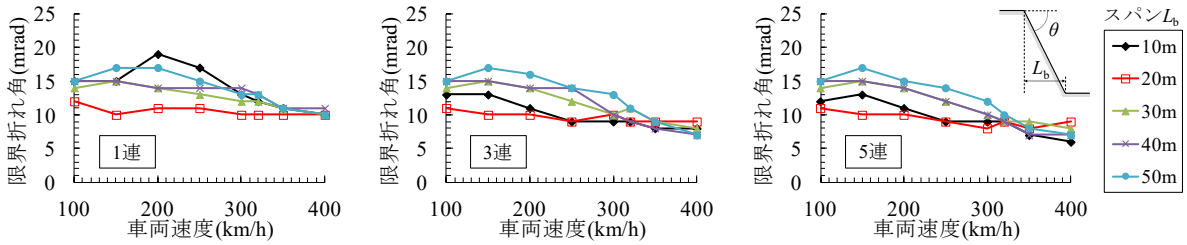
図-9 に角折れに関する脱線限界を示す．図より平行移動及び折れ込みの両者において，車両速度が速くなるにつれて，また連数が多くなるにつれて，脱線限界値が低下する傾向を確認できる．例えば，本検討では，折れ込みでスパン 20m の場合に着目すると，連数 1 連では車両速度が 100km/h から 300km/h に増加すると限界値が約 28%低下し，車両速度 300km/h では連数が 1 連から 5 連に増加すると限界値が約 15%低下した．スパン毎の違いに着目すると，最も限界値が低くなるのはスパン 20m の場合であった．また，20m 以上のスパンではスパンが長くなるほど限界値が向上する傾向が確認できる．**図-10** にスパン 20m の場合の時刻歴波形の例を示すが，1・



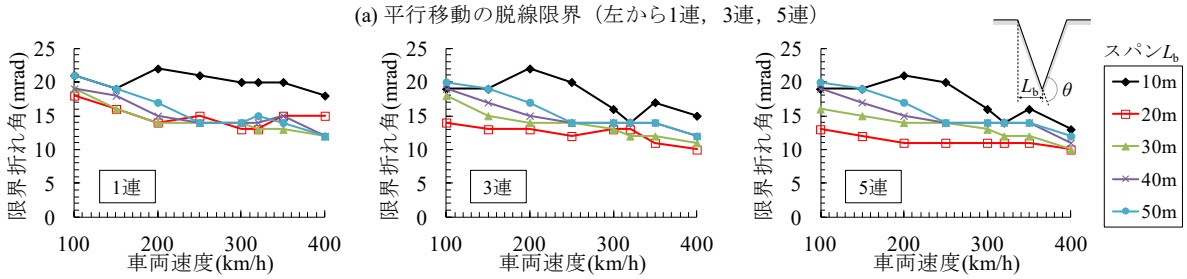
(a) L2Spec.I(G2)地震動（左から降伏震度 k_{hy}:0.3，k_{hy}:0.7，k_{hy}:∞（弾性）），元波：401.3gal

(b) L2Spec.II(G2)地震動（左から降伏震度 k_{hy}:0.3，k_{hy}:0.7，k_{hy}:∞（弾性）），元波：870.8gal

図-8　各設計地震動に対する構造物の振動特性と脱線限界 PGA$_L$ の関係

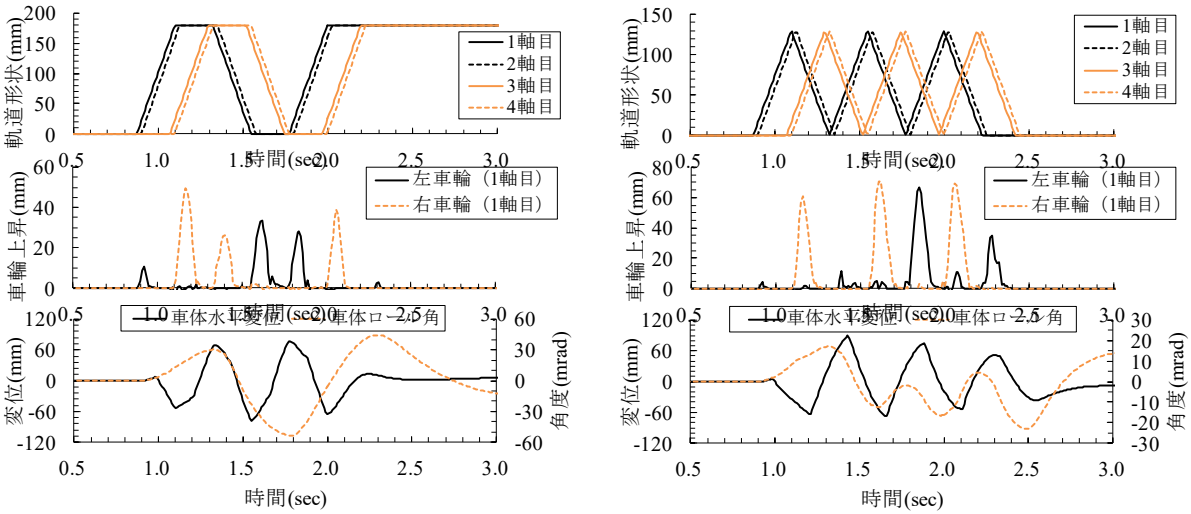


(a) 平行移動の脱線限界（左から1連，3連，5連）



(b) 折れ込みの脱線限界（左から1連，3連，5連）

図-9　角折れに関する脱線限界



(a) 平行移動（L_b=20m，θ=9mrad，3連，320km/h）　(b) 折れ込み（L_b=20m，θ=13mrad，3連，320km/h）

図-10　角折れ走行時の時刻歴波形の例

2 軸目と 3・4 軸目がほぼ同時に角折れ部を走行し，そこで大きな車輪上昇が生じていること分かる．即ち，スパン 20m で脱線限界が低下するのは軸配置の影響によるものであると考えられる．また，車体挙動については，車体水平変位と車体ロール角間で位相差が発生する上心ロールとしての挙動を確認できる．

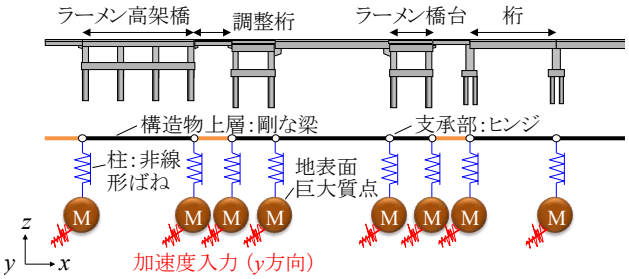


図-11　モデル線区の構造物の力学モデル

4.　モデル線区における脱線の支配要因分析

本章では，3章での振動変位及び不同変位の脱線限界に対する検討結果を踏まえ，モデル線区に対する地震時車両走行シミュレーションを実施し，地震時車両走行性に関する弱点構造物の把握及び脱線要因を分析する．

(1)　検討方法

図-11にモデル線区の構造物の力学モデルを示す．橋脚は1本の非線形ばねで，ラーメン高架橋はその両端に配置された2本の非線形ばねにより，その線路直角方向（y方向）の水平応答をモデル化した．また，構造物上層は十分に剛な梁要素でモデル化し，構造物間はヒンジ結合を仮定した．構造物柱の非線形性は，予めプッシュオーバー解析[9]により骨格曲線を求めておき，これに基づき標準トリリニア型の非線形水平ばねを設けて考慮した．プッシュオーバー解析は構造形式ごとに代表的な高さの2～4橋に対して実施し，その間の高さの構造物につ

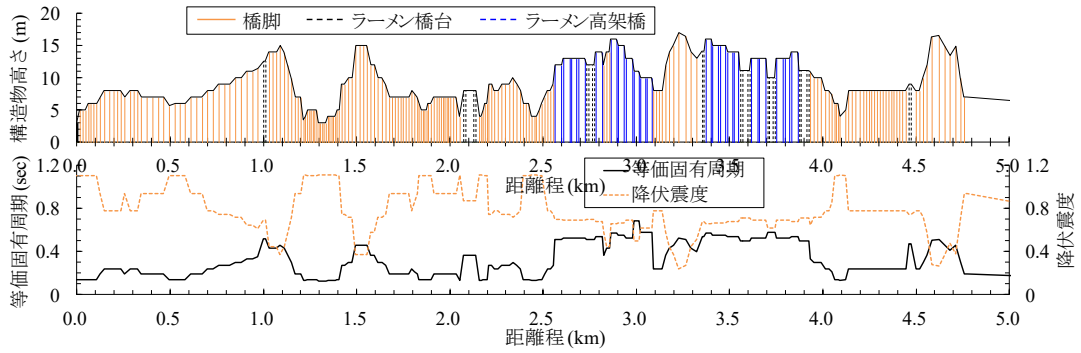


図-12　モデル線区の構造物諸元

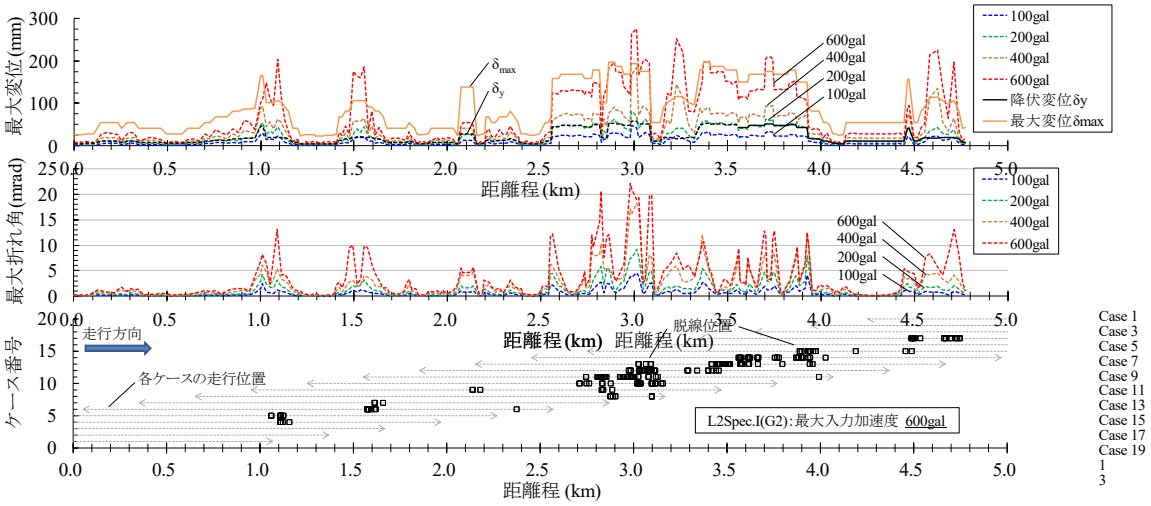


図-13　モデル線区の応答値と脱線位置の分析結果（入力地震動：L2Spec.I(G2)）

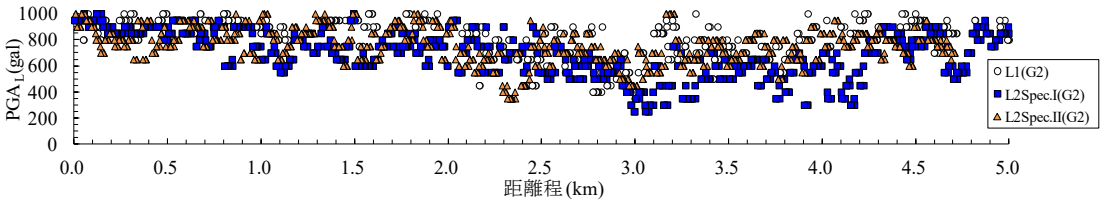


図-14　モデル線区の各設計地震動に対する脱線限界地表面加速度 PGA_L

いては高さで補間した．また，構造物柱の下端には，構造物質量の1000倍の質量を有する加速度入力用の巨大質点を設けた．減衰は，構造物の各モードに対して5%のモード減衰比ζとして与えた．

図-12にモデル線区の構造物諸元を示す．高さの変化する約4.8kmで，調整桁式ラーメン高架橋及び桁式高架橋を基本単位に構成した．ラーメン高架橋はスパン25～35m（調整桁は8～10m），桁式高架橋は9～40mと，様々なスパンを混在させた．また，高さ12m以上のラーメン高架橋は2層構造としたため，その前後で振動特性（等価固有周期，降伏震度）が大きく変化する．図より構造形式や高さが変化する箇所で大きな等価固有周期差が生じていることが確認できる．

本検討では，車両は12両編成（編成長300m），車両速度は320km/hとした．また，構造物全体に対する地震時車両走行性を検討するために，車両の走行開始位置を300mずつシフトさせた20ケースを設定し，仮想的にモデル線区全体を網羅することとした．また，入力地震動は図-5に示したL1(G2)，L2Spec.I(G2)，L2Spec.II(G2)とし，そのPGAを50～1000galまで50galずつ増加させながら検討を行った．計算機はCray社のXC-30を用いて576個のコアにより並行解析を行った．全ケース（走行開始位置20ケース×最大加速度20ケース×地震動3種=1200ケース）の所要解析時間は52時間程度であった．

(2)　検討結果

図-13に，L2Spec.I(G2)のPGA=100～600galとした場合の最大変位及び最大折れ角を示す．まず，最大変位に着目すると，PGA=200gal程度で多くの構造物が降伏しはじめること，更に大きなPGAでは最大変位が急増することが確認できる．折れ角に関しては，降伏した構造物の前後や隣接する構造物と等価固有周期差が大きくなる箇所で増加することが確認できる．本検討において最も大きな折れ角が発生したのは，3.0km付近の1層式と2層式のラ

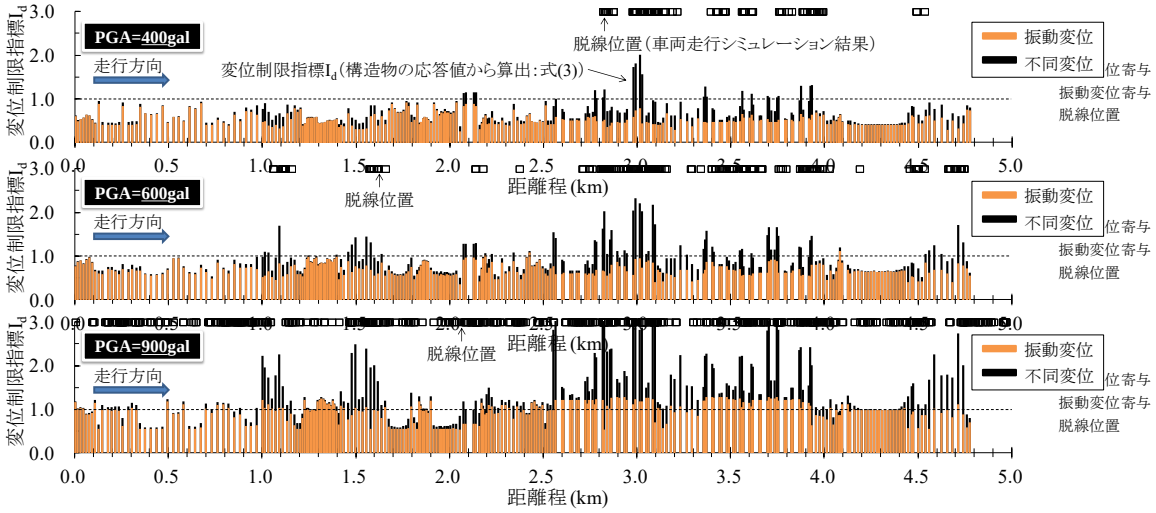


図-15 脱線位置と変位制限指標 I_d との関係（L2Spec.I(G2)）

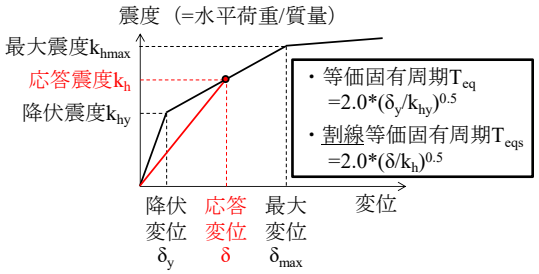


図-16 割線剛性を用いた等価固有周期T_{eqs}の概念図

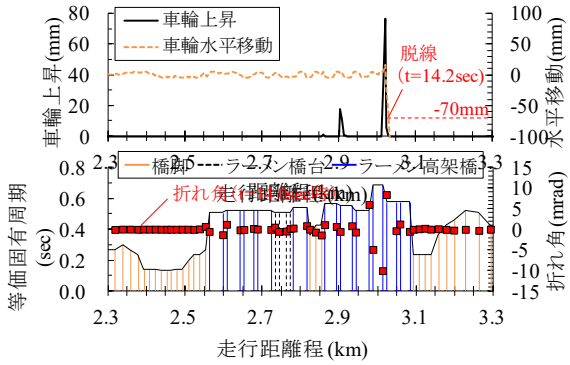


図-17 時刻歴波形の例（L2Spec.I(G2)，PGA=250gal，車両：11ケース，4号車，第1軸）

ーメン高架橋に挟まれる調整桁端部であり，1層式のラーメン高架橋が降伏することで両者間の相対変位が大きくなり，その結果として角折れが大きくなった．同図には，PGA=600galとした場合の車両の走行ケースごとの脱線位置の分析結果も示している．脱線位置は各輪軸が車輪水平移動量±70mmを超えた瞬間の時刻と各輪軸のスタート位置，車両速度から特定した．車輪水平移動量が±70mmを超える時刻は，地震時車両走行性に関する弱点構造物を通過した後になるため，脱線位置と弱点構造物箇所は厳密には一致しない（走行方向に若干ずれる）．図から，脱線位置は比較的角折れが大きくなる箇所と一致しており，本検討のモデル線区の地震時車両走行性は，振動変位よりも不同変位（角折れ）の影響が支配的であることが推察される．これは，PGA=200gal程度で構造物が降伏すること，**図-8**に示したように構造物の降伏によりPGA_Lが見掛け上昇すること，**図-9**の不同変位（角折れ）に関する脱線限界値（320km/hでは限界値が10～15mrad程度）から不同変位の限界値に近い値であること，からも理解できる．

図-14に各設計地震動に対するPGA_Lを示す．図は各地震動において最大加速度が生じる時間の各輪軸位置で整理した．同図は従来実施されていた整理方法[1), 2)]であり，線区全体の限界値の傾向や地震波の違いによる影響については確認できるものの，弱点構造物の位置についてはその存在範囲を大まかに把握する程度にとどまる．

(3) 脱線に関する支配要因の分析

図-15に，L2Spec.I(G2)のPGA=400，600，900galにおける脱線位置と各構造物の変位制限指標I_dとの関係を示す．変位制限指標I_dは，脱線の支配要因を分析するために本研究で新たに定義した指標であり，構造物の応答と2章での検討結果を基に式(3)により算出する．第1項は振動変位での脱線のしやすさを，第2項は不同変位での脱線のしやすさを表すもので，本研究では両者を単純に足し合わせて総合的な脱線のしやすさを評価した．

$$I_{d,i} = \delta_i/\delta_{L,i}(T_{eqs}) + \theta_i/\theta_{L,i} \qquad (3)$$

ここに，iは構造物番号，δ_iは各構造物の最大変位，$\delta_{L,i}$は**図-7(c)**に示す正弦波5波での振動変位に関する脱線限界値，θ_iは各構造物間の最大折れ角，$\theta_{L,i}$は**図-9**に示す不同変位に関する脱線限界値である．$\delta_{L,i}$は構造物の非線形化の影響を考慮するために**図-16**に示すように割線剛性を用いた等価固有周期T_{eqs}の関数とした．また，$\theta_{L,i}$は本来は角折れ形状，スパン，車両速度，連数に依存するが，本研究では**図-9**を勘定して一律15mradとした．振動変位と不同変位が脱線限界に与える影響は同等とは限らないため，それらの影響を単純に足し合わせた値が1を超える構造物が必ずしも脱線を引き起こすとは限らないが，**図-15**より変位制限指標I_dがおおよそ1を超えた

構造物位置で脱線が生じていることが分かる．また，GPA=400galにおいて脱線が生じた位置の構造物は他の構造物に対して不同変位の影響が大きく，前述した通り不同変位を起因とした脱線であることが分かる．一方，PGA=900galでは線区全体で脱線が生じているが，例えば4.1～4.4kmにおいてはほぼ振動変位のみの影響により脱線が生じていることが分かる．このように，変位制限指標I_dを用いることで，構造物の応答のみで線区内の弱点箇所の抽出及び脱線の支配要因を評価可能であることが分かった．

図-17に最も小さなPGA（250gal）で脱線したケースの時刻歴波形の例を示す．横軸は車両速度と時間から換算した走行距離程で示した．車輪上昇をみると，約3.0kmの位置で70mmを超える車輪上昇が生じ脱線に至っていることが分かる．また，脱線が生じる直前（t=14.0sec）の構造物の折れ角分布を見ると，ラーメン高架橋間の調整桁位置において大きな角折れが発生しており，変位制限指標I_dで分析した通り，時刻歴波形においても角折れに起因した脱線であることが確認できる．

本論で設定したモデル線区の地震時車両走行性は不同変位の影響が支配的であったが，これは構造物の振動特性（等価固有周期，降伏震度，減衰定数）や構造物並び，地盤条件，地震動，車両速度等によっても異なるものと考えられる．今後，更に検討ケースを増やすことで変位制限指標I_dの精度検証・精度向上を進め，線区内の地震時車両走行性に関する弱点箇所を精度よく抽出可能な手法を構築していく予定である．

5. まとめ

以下に，本研究で得られた知見をまとめて示す．

(1) 振動変位に関して，構造物の降伏震度が低くなるにつれて，構造物の非線形化に伴い，見掛け上の脱線限界PGA_Lが向上した．

(2) 不同変位に関して，車両速度が速くなるにつれて，また，連数が多くなるにつれて脱線限界値が低下した．スパン毎の違いに着目すると，最も限界値が低くなるのはスパン20mの場合であった．

(3) モデル線区の地震時車両走行性に関して，車両走行シミュレーションにより脱線位置及び脱線要因を明らかにした．また，脱線の支配要因を分析可能な指標を新たに提案し，構造物の応答から脱線に対する振動変位及び不同変位の寄与や，線区内での弱点構造物の特定を可能であることを示した．

参考文献

1) 曽我部正道，後藤恵一，徳永宗正，渡辺勉：地震動の違いが地震時車両走行性に関するフラジリティ曲線に及ぼす影響，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.16，pp.133-140，2012.
2) 曽我部正道，徳永宗正，後藤恵一，渡辺勉，松岡弘大：各種対策工が地震時車両走行性に関するフラジリティ曲線に及ぼす影響，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.18，pp.39-46，2014.
3) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限），丸善，2006.
4) 涌井一，松本信之，松浦章夫，田辺誠：鉄道車両と線路構造物との連成応答解析法に関する研究，土木学会論文集，No.513/I-31，pp.129-138，1995.
5) 松本信之，田辺誠，涌井一，曽我部正道：非線形応答を考慮した鉄道車両と構造物との連成応答解析法に関する研究，土木学会論文集（A 編），Vol.63，No.3，pp.533-551，2007.
6) 後藤恵一，曽我部正道，田辺誠，浅沼潔：脱線後の車輪と軌道の接触モデルに関する研究，土木学会鉄道力学論文集，No.15，pp.132-139，2011.
7) 宮本岳史，松本信之，曽我部正道，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.72，No.706，pp.1849-1855，2005.
8) 曽我部正道，浅沼潔，涌井一：地震時列車逸脱防止ガードの性能評価法の開発，土木学会鉄道力学論文集，No.11，pp.69-74，2007.
9) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善，1999.

(2017.4.7 受付)

PREDOMINANT FACTOR OF SEISMIC VEHICLE RUNNING SAFETY ON STRUCTURES

Keiichi GOTO, Masamichi SOGABE, Munemasa TOKUNAGA, Hayato ITO, Kaoru KOBAYASHI and Fumiaki UEHAN

In this study, using the analysis program DIASTARS III that is able to take into account the dynamic interaction between railway vehicles and railway tructures, we investigated the influence of various parameters about vibration displacement and differencial displacement on seismic vehicle running safety. In addition, we conducted seismic vehicle running analysis on a model line with about 4.8km long. We identified the critical structures for seismic vehicle running safety in a model line and evaluated the influence of vibration displacement and differencial displacement on derailment.