

高架橋被災時における列車挙動について

清野純史¹・土岐憲三²・永井克実³

¹正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³学生員 京都大学大学院工学研究科 修士課程 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

多様化した交通手段の中でも大量輸送の可能な鉄道は、日々多くの人々が利用しており、技術革新による高速化もめざましい。しかし、1995年の兵庫県南部地震をはじめとして、過去の大地震においては様々な鉄道施設の被害が報告されている。大量輸送・高速化という状況の中では、ひとたび事故が発生すれば大惨事となることは明らかである。そこで本研究では、強震動により鉄道橋の桁が落下あるいは崩壊したときに走行中の列車がそこに落下するような場合を考え、このときの列車の3次元挙動を個別要素法を用いた数値解析により求めた。本研究では、解析の対象となる車両および軌道は全て剛体とし、列車・軌道部は3次元でモデル化する。列車は直方体の車両を両端ヒンジの梁要素により連結したもので表現し、軌道部については、走行路の一部が矩形に欠落したものを考えている。

Key Words: train accident, collapsed overhead bridge, distinct element method, 3D analysis

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震をはじめとする過去の大地震においては、列車の脱線や鉄道橋および盛土の崩壊、軌道変状など様々な鉄道施設の被害が報告されている。常時多くの人々が利用し、日々高速化が進んでいる状況の中では、鉄道施設の地震被害に伴ってひとたび列車事故が発生すると大惨事となりかねない。

そこで本研究では、強震動により鉄道橋の桁が落下あるいは崩壊したときに走行中の列車がそこに落下するような場合を考え、このときの列車の3次元挙動を個別要素法を用いた数値解析により模擬し、パラメトリックな基礎的検討を行った。

2. 解析手法

本研究では解析の対象を全て剛体とし、列車・軌道部は図-1のように3次元でモデル化する。列車は直方体の車両を両端ヒンジの梁要素により連結したもので表現し、軌道部については走行路の一部が矩形に欠落したものを考えている。なお、車両は図-1の右から1両目、2両目、・・・とし、以後辺ABおよび辺CDを落橋部分の隅角部、Lを落橋区間、Hを橋の高さと呼ぶ。

解析手法として個別要素法^{例えば1)}(以下 DEM と略す)を用いる。解析は3次元で行なうため、自由度は並進3+回転3の6自由度である。DEMを用いることにより、接触力は物体が接触したときに発生させる仮想のばねとダッシュポットを介して伝えられる。列車と軌道部との接触に際しては様々な接触形態が生じるが、基本的には図-2のよ

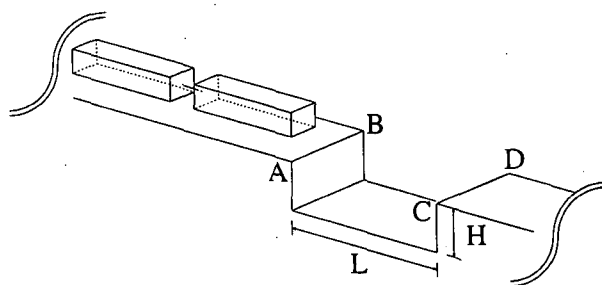


図-1 列車-軌道部モデル

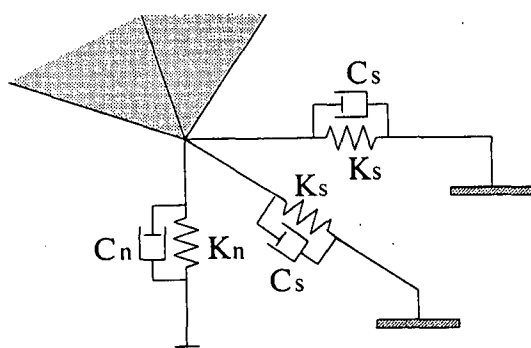


図-2 接触時のばねとダッシュポットのモデル

うに剛体の頂点と面との接触と考えることができる。これらの反力を用いて要素の運動方程式を立て、前進差分により要素の運動を追跡する。なお、座標系は図-3のように絶対座標系(x,y,z)と、車両の重心Gを原点とし、車両の前方を1方向、上方を3方向、右手系の向きを2方向とする要素座標系(1,2,3)の2つを用いる。

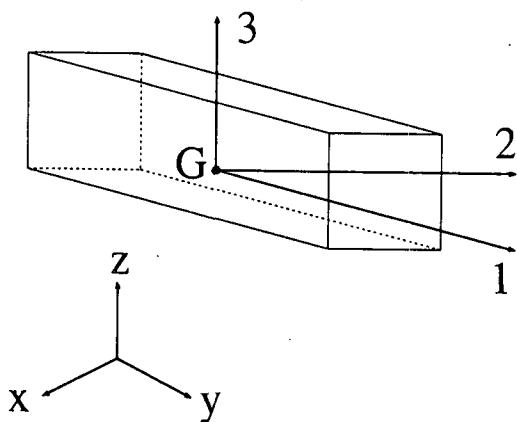


図-3 絶対座標と要素座標系

並進運動の場合、絶対座標系(x,y,z)において運動方程式は次式で表される。

$$m \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{Bmatrix} = F_b + \sum_n F = F_b + \sum_n \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 F_b は物体力、 $F=\{F_x \ F_y \ F_z\}^T$ は接触力、 m は質量、 n は接触点数である。

一方、回転運動に対する運動方程式は要素座標系(1,2,3)において次式で表される。

$$\frac{dL}{dt} + \omega \times L = \sum_n N \quad (2)$$

ここに、 L は角運動量、 d/dt は要素系に対する時間微分、 ω は角速度、 N は外力モーメントとし、 $\times$ は外積を表す。式(2)は Euler の運動方程式とも呼ばれる。

各車両の位置は、式(1)、式(2)を前進差分法を用いて解くことにより求められる。

3. パラメータの決定

車両のモデルとして、本研究では新幹線のぞみ300系車両²⁾を考えることにする。したがって、車両はできる限り実際の新幹線車両に似せたものとなっており、その諸元は表-1に示すとおりである。なお、車両の重心は車両上部が客室になっていることを考慮し、図-4の斜線部の空間の中央にあるものとしている。また、簡便のため、連結部は図-5のように直線で表わす。なお、新幹線の多くは16両で編成されていることから、本研究においては16両編成の列車を解析の対象とする。

DEMでは、要素間に仮想のばねとダッシュポットおよびスライダーを設けて数値解析を行なうため、ばね定数、減衰係数、動摩擦係数の値をそれぞれ決定する必要がある。しかし、現時点ではこ

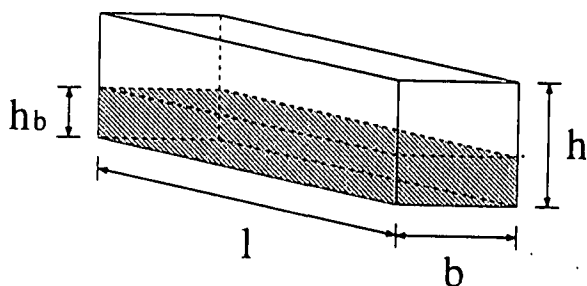


図-4 車両モデル

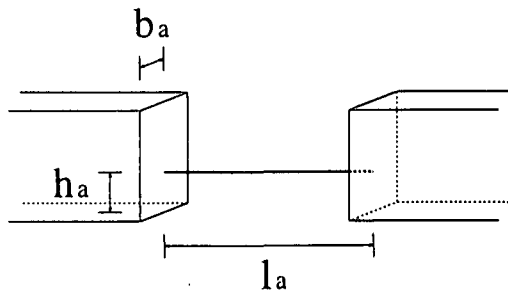


図-5 連結部モデル

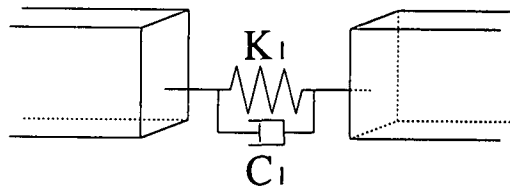


図-6 連結部の接触パラメータ

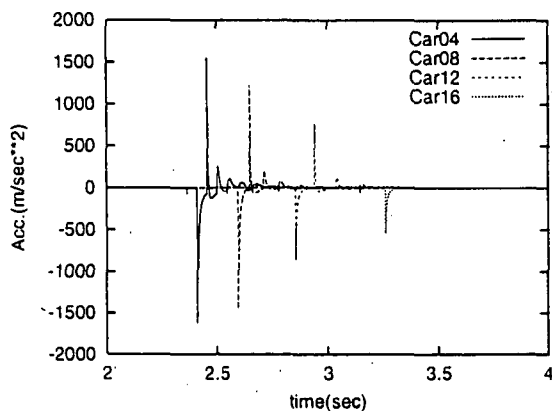
れらの値を理論的に決定することはできず、様々な関連実験で得られた結果を援用しなければならない。そこで、本研究では以下のようにしてこれらの値を決定することにした。

(1) 車両の接触パラメータ

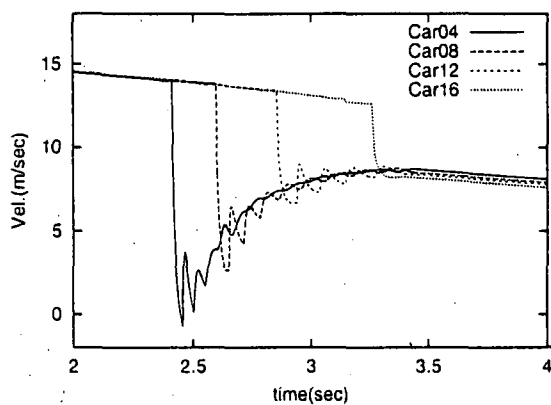
垂直方向の減衰係数 c_n および垂直方向のばね係

表-1 車両諸元

m (ton)	4.44×10^1
I_1 (ton*m ²)	4.26×10^1
I_2 (ton*m ²)	2.31×10^3
I_3 (ton*m ²)	2.35×10^3
l (m)	2.50×10^1
b (m)	3.38
h (m)	3.65
h_b (m)	1.50
l_a (m)	0.50
h_a (m)	1.00
b_a (m)	1.69

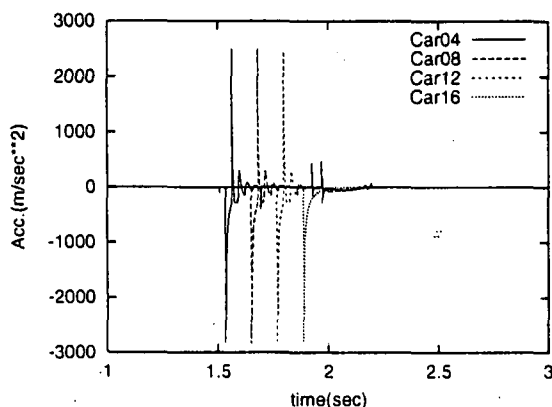


(a) 加速度

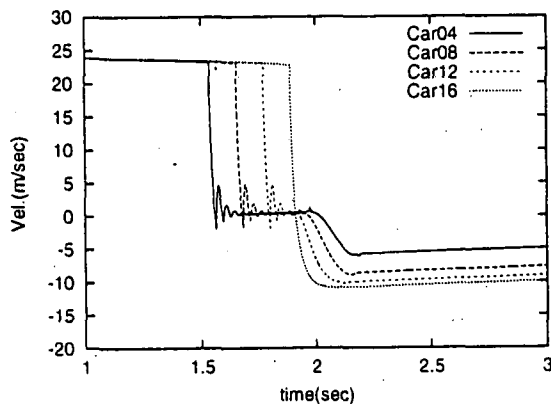


(b) 速度

図-7 車両の挙動 (速度 60km/h, 落橋区間 30m, 橋の高さ 10m, x 方向)



(a) 加速度



(b) 速度

図-8 車両の挙動 (速度 90km/h, 落橋区間 30m, 橋の高さ 10m, x 方向)

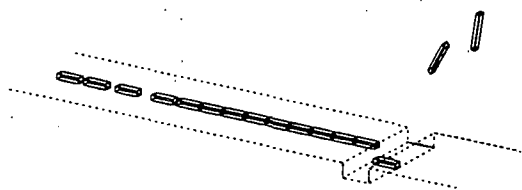


図-9 列車の挙動 (速度 200m/h, 落橋区間 30m, 橋の高さ 10m, 5 秒後)

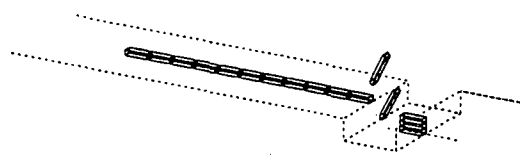


図-10 列車の挙動 (速度 100m/h, 落橋区間 60m, 橋の高さ 15m, 6 秒後)

数 K_n は Kerkhoff らの自動車の固定壁前面衝突実験³⁾より, 衝突時間と衝突前後での運動エネルギー比が実験結果と一致するように $C_n = 1.29 \times 10^3$ (kN*sec/m), $K_n = 4.88 \times 10^4$ (kN/m)と決定した。接線方向のばね定数 K_s については接触する 2 要素のもつ材料特性の違いを考慮するため, 軌道部はコンクリート, 車両は鉄と仮定し, それぞれのポアソン比から次式により決定した。

$$K_s = \frac{K_n}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

接線方向の減衰係数 C_s については過大な減衰力が要素に作用するのを防ぐため, 本研究では 0 としている。また, 動摩擦係数 m は一定であると仮定し, 兵庫県南部地震において速度 65km/h で走行していた列車が脱線した際に 60m 走行して停止した事実⁴⁾から, そのときの平均減速度 (約 2.72m/sec²) を求め, 通常の走行状態で列車にこの減速度を生じさせるような値 ($\mu = 0.110$) とした。ただし, 落下前の走行路に関しては, 速度 270km/h で走行するのぞみ 300 系が約 2.6km 走行して停止する⁵⁾ことから, 先ほどと同様にその平均減速度 (1.08m/sec²) を求め, 通常の走行状態でこの減

速度となる値($\mu=0.277$)とした。

(2) 連結部の接触パラメータ

本研究では連結部を両端ヒンジの梁要素でモデル化しているため、車両には連結部の伸縮による長さ方向の力のみが作用することになる。この作用力も図-6 に示すようにばねとダッシュポットで表現する。しかし、そのばね定数 K および減衰係数 C を理論的に決定することはできないため、車両接触時のパラメータである K_n , C_n とそれぞれ同じ値とした。ただし、連結部のひずみが 1% を越えると連結部は切れるものとし、簡便のため、それ以降はその連結部がないものとして考えることにする。

(3) 解析時間間隔

DEM による解析では、解析時間間隔 Δt が解の安定性に大きな影響を及ぼす。そこで、 Δt を変化させたときの列車の挙動を調べ、列車の挙動が安定するように 1.00×10^{-4} (sec) として解析を行なった。

4. 解析結果

落橋部分として、落橋区間は 30m と 60m の 2 ケース、橋の高さは兵庫県南部地震で被災した橋梁の平均的な高さである 10m と、これを ± 5 m 変化させた 3 ケースの計 6 ケースを検討の対象とした。また、解析の対象とする列車は 16 両編成とし、数値解析は 1 両目の前面が落橋地点の 5m 手前にある状態から始める。以後、落下時の速度はこのときの速度を指すものとし、単に列車の“速度”と呼ぶことにする。

(1) 速度変化時の列車挙動

速度が変化したときの列車の挙動を調べるため、落橋区間 30m、橋の高さ 10m の落橋部分のもとで速度を 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200, 250, 300(km/h) と変化させて列車の挙動解析を行なった。なお、速度を 20km/h 以下にすると列車は落下せずに停止した。速度が 30km/h のときは、他の車両と接触することなく 1 両目のみが落下する。速度が 40~50km/h では、1 両目が落下して停止してから、2 両目が 1 両目の上に落下する。速度が 60km/h になると、2 両目がまだ落下途中の 1 両目に衝突する。しかし、しばらくすると 1 両目は完全に落下し、後続の車両は前進し、前の車両と衝突する。その結果、後方の車両ほど衝突は遅れて生じ、衝突時の相対速度は小さくなるため、車両に作用する最大加速度も小さくなっている(図-7(a))。しかし、全車両が衝突した後は各車両の速度はほぼ同じになる(図-7(b))。速度が 80~90km/h になると、1 両目が落橋部分に衝突した後に後続の車両が順次前の車両に衝突する。したがって、この間は各車両が圧縮を受けたような状態となる。そのため、2 両目以降は前の車両から大

きな反力を受け、進行方向とは逆向きに跳ね返される(図-8(a),(b))。速度が 100km/h 以上になると 1 両目が落橋部分の隅角部と衝突する。そのため、1 両目は落橋部分の隅角部から、2 両目は 1 両目から、それぞれ上方への加速度(反力)を継続して受け、この 2 両は回転をとめないながら上方へ飛び上がる(図-9)。

(2) 落橋部分変化時の列車挙動

次に、落橋区間や橋の高さが変化したときの列車の挙動を調べた。落橋区間を 30m として橋の高さを変化させてみると、1 両目と 2 両目が飛び上がる、速度が 100km/h 以上のときは橋の高さの影響を受けないために列車の挙動は全く同じとなった。さらに落橋区間が 60m と長い場合についても考察を行なった。この場合、1 両目が落橋部分の隅角部と衝突しないために、1 両目と 2 両目の飛び上がりは回避できるが、その他の車両で飛び上がる可能性が高くなる結果が得られた。例えば、落橋区間 60m、橋の高さが 15m で、列車の速度が 100km/h のときには 4 両目と 5 両目が飛び上がっている(図-10)。これは、前 3 両が積み重なり、3 両目の後面の上辺が落橋部分の隅角部の役割を果たしているためである。

5. まとめ

本研究により、速度が 60~80km/h あたりが列車挙動の一つの遷移速度に相当すること、また、落橋部分の変化に対しては、落橋長さの違いによってその後の列車挙動が大きく変化することがわかった。ここでは、列車が落橋部分に対して直角に落下する場合のみの検討を行なったが、今後、脱線・転覆などを考慮した他の 3 次元挙動についての検討も行なう予定である。

参考文献

- 1) 木山英郎, 藤村尚: カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析, 土木学会論文報告集, 第 333 号, pp. 137-146, 1983.
- 2) 大舘博善: 新幹線のぞみ白書, 新潮社, 1994.
- 3) John F. Kerkhoff, Stein E. Husher, Michael S. Varat, Alison M. Busenga and Kevin Hamilton: An Investigation into Vehicle Frontal Impact Stiffness, BEV and Reported Testing for Reconstruction, SAE Transactions Journal of Passenger Cars, Vol. 102, pp. 1456-1484, 1993.
- 4) 永瀬和彦, 近藤和広, 野村俊明: 阪神大震災における鉄道車両の被災状況, 日本機械学会論文集(C 編), Vol. 63, No. 606, pp. 300-307, 1997.
- 5) 河田恵昭: ドイツの高速列車事故から学ぶ危機管理 対岸の火事としないために, 土木学会誌, Vol. 84, No. 7, pp. 38-41, 1999.
- 6) 久保田修一: 強震時の列車事故による人的被害に関する研究, 京都大学修士論文, 2000.