

S7-1-7 横方向の振動変位の影響を考慮した構造物の不同変位の照査法

[土] 〇曾我部 正道 [機] 宮本 岳史 [土] 涌井 一 [土] 松本 信之 (財) 鉄道総合技術研究所

Evaluation method for differential displacement of structures with considering the influence of horizontal vibrational displacement

Masamichi SOGABE Takefumi MIYAMOTO Hajime WAKUI Nobuyuki MATSUMOTO,
Member (Railway Technical Research Institute)

Differential displacements such as the change of angle and the alignment irregularity on structural top surface during an earthquake influence the train running safety. The differential displacements are generated by dynamic relative displacements of adjacent structures, which vibrate horizontally according to individual structural characteristics. Both vibrational and differential displacements occur simultaneously, in general. However, in the past design standard, there are still undetermined points in the calculation of response values and the setting of limit values, so both displacements have been treated separately and thus must be checked separately as well. Then, vibrational and differential displacements, which are originally combined phenomena, were investigated in this study under a unified evaluation, in order to take into account their interactions. As a result of this study, the design limit values of horizontal vibration for train running safety were recommended 10% lower than the original limit values analyzed proposed to apply only to the horizontal vibrational displacement. Accordingly, the limit values of differential displacement were proposed in order that the averaged decreasing rate of the amplitude ratio of safety limits would not exceed 10%.

キーワード: 列車走行性, 角折れ, 目違い, 不同変位, 振動変位

Keyword: train running quality, change of angle, alignment irregularity, differential displacement, vibrational displacement

1. はじめに

兵庫県南部地震以降, 構造物の横方向の振動変位に対する列車走行性の確保の重要性が認識されようになった。このため, 「鉄道構造物等設計標準・解説(耐震設計)」(平成 11 年制定)からは, 従来から行なわれてきた構造物の軌道面の角折れ・目違いなどの不同変位(以下, 不同変位という)の照査に加え, 構造物の横方向の振動変位(以下, 振動変位という)の照査が行われるようになった¹⁾。

地震時における軌道面の不同変位は, 本来, 個々の特性に応じて横方向に振動する複数の構造物の間の動的な相対変位によって生じるものであり, 振動変位と不同変位は連成して発生するものである。しかしながら, 応答値の算定および限界値の設定とともに考慮すべきパラメータが多く, 未解明な点が多いことから, 設計上は独立して取り扱われ, 振動変位と不同変位が同時に発生した場合の影響については考慮されていなかった。

このような背景から, 本研究では, 本来一つの現象である振動変位と不同変位とを統一して同じ尺度で比較し, 相互の影響を考慮できるような照査方法について, 数値解析により検討することとした。

2. 解析手法

解析には車両と構造物との動的相互作用解析プログラム DIASTARS を用いた^{2), 3)}。

2.1 車両モデル

車両モデルには, 図 1 に示す三次元の 1 車両モデル (31 自由度) を用いた。車両諸元は, 定員乗車時に軸重 120kN となる車両を仮定した。列車は 3 両編成 (12 軸) とした。

2.2 レール車輪間の力学モデル

本研究では, 車輪を一定勾配の円錐路面と鉛直フランジで表した鉛直フランジモデルでモデル化した。鉛直方向には Hertz の接触ばねを, 水平方向には線形クリープ則とレール小返りばねを用いて, 車輪とレール間の相互作用力を算出した。

2.3 構造物モデル

(1) 固定不同変位モデル

ある特定の区間において構造物の固有振動数, 剛性等が常に一樣であることは稀で, 個々の構造物の振動変位にはばらつきが生じるものと考えられる。標準設計のラーメン高架橋においても, 適用される高さが異なったり, 架道橋やラメ

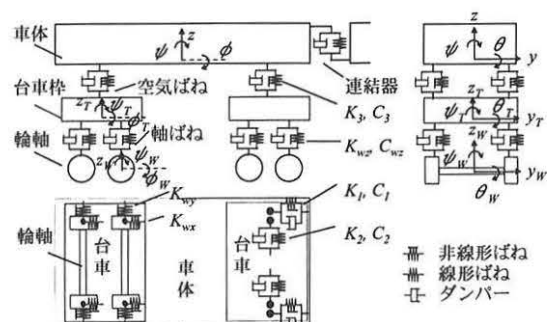


図 1 車両モデル

ン橋台等の異種剛性構造物と連続する場合が多い。

これらの影響を適切に評価するためのパラメータを想定すると、構造形式、橋脚高さ、桁連数、レールの変形、地震波、地盤種別、相互作用など、組み合わせる事項は非常に多く、また車両の応答も振動振幅に単純に比例しない非線形挙動であることから、実際には一般化が極めて困難な現象となる。

そこで、本研究では、より単純化したモデルを仮定し、不同変位の限界値を定めることとした。すなわち、振動変位の照査に用いる安全限界振幅に着目し、これに不同変位が組み合わさった場合の影響を考慮する方法を採ることとした。この不同変位は、本来、振動系の構造物に更に付加される動的な相対変位として表現されるべきところであるが、本研究では、角折れ・目違いは、一種の軌道変位とみなせる固定不同変位モデルとして与えることとした。

図2に固定不同変位モデルによる検討の概念図を示す。固定不同変位モデルでは、不同変位の形状は解析中常に最大に固定されており、これらは軌道変位として与えられる。

図2(a)に不同変位（角折れ：平行移動、図3参照）と振動変位を同時に考慮した場合の例を示す。車両の第1軸が角折れ開始点に到達する時刻を正弦波5波の第2振幅開始点に設定したものを基本ケースとした。また、正弦波と角折れの位相ずれの影響を考慮するために、角折れ開始点を基本ケースから1/4波長ずつ1波長までずらした検討も行った。車両応答に対して、できるだけ多くの位相ずれの条件が考慮できるように、列車は3両編成（24車輪）とした。

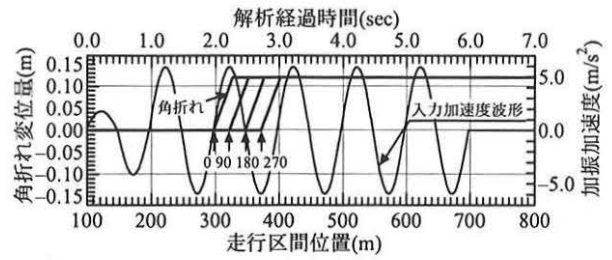
図2(b)に不同変位（角折れ：折れ込み+目違い、図3、図4参照）と振動変位を同時に考慮した場合の例を示す。不同変位（角折れ：平行移動）と振動変位を同時に考慮した場合については、図中の目違いを0としたモデルを用いた。角折れの設定方法については図2(a)と同様である。目違いの具体的な照査の対象は、張出し型のラーメン高架橋となるため、角折れ（折れ込み）と目違いは同時に考慮することとした。目違いは角折れと同方向と反対方向の2種類を設定した。列車は3両編成（24車輪）とした。

(2)角折れ・目違いの基本形状

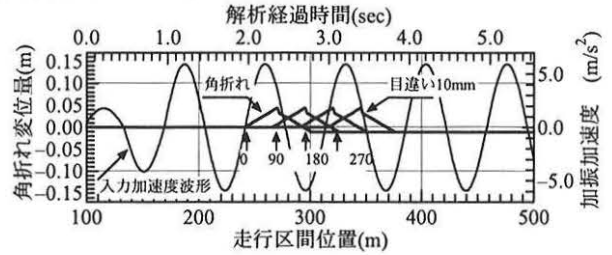
図3、図4に角折れ・目違いの基本形状を示す。具体的な不同変位の設定方法は、既往の研究および設計標準に準じて定めた⁴⁾。角折れ・目違いが生じる桁端前後には、曲率の不連続を緩和するために、弾性床上の梁の変形を表す式(1)による緩衝区間を挿入した。

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

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、 x は緩衝区間開始点からの距離である。また、 β は式(2)に示す弾性床上の梁の相対的曲げ剛度である。



(a)不同変位（角折れ：平行移動）と振動変位を考慮
(角折れ $\theta=4/1000$ 、スパン長 $L_b=30\text{m}$ 、列車速度 360km/h)



(b)不同変位（角折れ：折れ込み+目違い）と振動変位を考慮
(角折れ $\theta=2/1000$ 、スパン長 $L_b=30\text{m}$ 、列車速度 260km/h)

図2 固定不同変位モデルによる検討の概念図

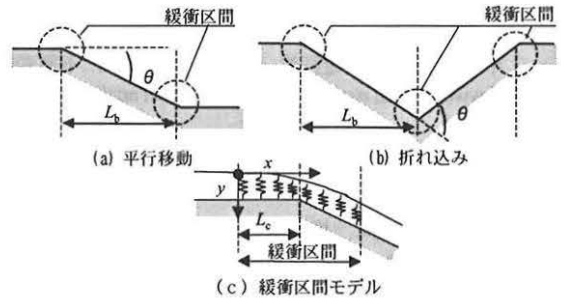


図3 角折れの基本形状

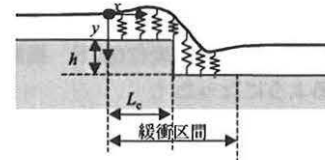


図4 目違いの基本形状

$$\beta = \sqrt{\frac{k}{4EI}} \quad (2)$$

ここに、 k は単位長さ辺りのレール支持ばね定数、 EI はレールの曲げ剛性である。なお入力諸元には、不同変位の基本形状の曲率が最も大きくなり、列車走行性上、最も厳しくなる、60kgレールおよびスラブ軌道の諸元を用いた。

目違いについては式(3)に示す緩衝区間を挿入した。

$$\begin{aligned} 0 \leq x < L_c \quad y &= \frac{h}{2} e^{\beta(x-L_c)} \cos(x-L_c) \\ L_c \leq x \leq 2L_c \quad y &= -\frac{h}{2} e^{-\beta(x-L_c)} \cos(x-L_c) + h \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 h は目違い量である。

2.3 列車走行性の評価方法

列車走行性の評価は、車輪上昇量を指標として正弦波加振に対する安全限界振幅を用いて行った⁵⁾。車輪上昇量は3両編成24車輪のうちの最大値で評価した。車輪上昇量の限界値の目安は、車輪のフランジ高さを踏まえて25mmとした。

3. 解析結果

解析パラメータは、スパン長10~50m、列車速度160km/h~360km/h、角折れ2/1000~8/1000とした。

3.1 振動変位および角折れ(平行移動)を考慮した場合

図5に振動変位と水平角折れ(平行移動)を組み合わせた解析結果の例(角折れ4/1000、列車速度260km/h)を示す。図5(a)は正弦波5波の横方向加振と水平角折れの影響を考慮した安全限界振幅を示している。図5(b)に、同図(a)に示した解析結果を振動変位のみによる安全限界振幅で基準化した「安全限界振幅比」を示す。これは振動変位のみによる安全限界振幅に対して、角折れが加わるとこれがどの程度変化するかを表した指標である。角折れ4/1000の場合の安全限界振幅は、加振振動数や位相ずれにもよるが、振動変位のみによるものに対して平均で10%程度低下することが分かる。

同様の検討を、スパン長、列車速度、角折れをパラメータとして行った。図6に列車速度と角折れ(平行移動)が安全限界振幅に及ぼす影響を示す。各角折れの値は、4種類の位相ずれケースを集約して最小値で示している。平行移動ではスパン長の違いによる影響が大きいので、スパン長を分けて示した。角折れの増加とともに安全限界振幅が低下すること、高速になるほど安全限界振幅が低下することなどが分かる。

3.2 振動変位および角折れ(折れ込み)を考慮した場合

折れ込みについても同様の検討を行った。図7に振動変位と水平角折れ(折れ込み)を組み合わせた解析結果の例(角折れ4/1000)を示す。図7(a)は正弦波5波の横方向加振と水平角折れの影響を考慮した安全限界振幅を示している。図7(b)は、同図(a)に示した解析結果を振動変位のみによる安全限界振幅で基準化した安全限界振幅比で示している。角折れ4/1000の場合の安全限界振幅は、加振振動数や位相ずれにもよるが、平行移動の場合と同様に、振動変位のみによるものに対して平均で10%程度低下することが分かる。

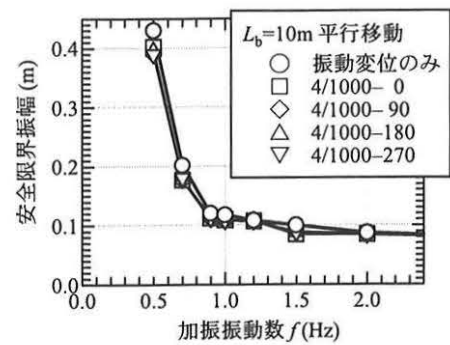
図8に列車速度と角折れが安全限界振幅に及ぼす影響を示す。平行移動の場合と同様に、角折れの増加とともに安全限界振幅が低下すること、高速になるほど安全限界振幅が低下することなどが分かる。

3.3 振動変位、角折れ(折れ込み)および目違いを考慮した場合

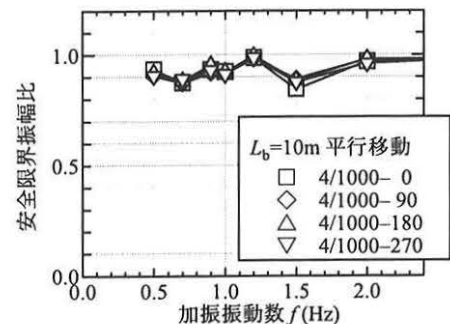
目違いによる安全限界振幅比の低下は、例えば列車速度260km/hでは8mm程度の目違いに至るまでは、角折れ(折れ込み)による影響の中に埋没してしまう結果となった。

4. 地震時における軌道面の不同変位の照査方法と限界値

線路方向に連続する構造物上での列車走行性を検討する場

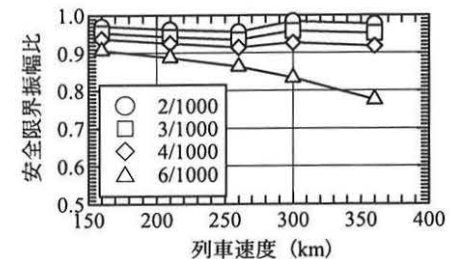


(a)安全限界振幅

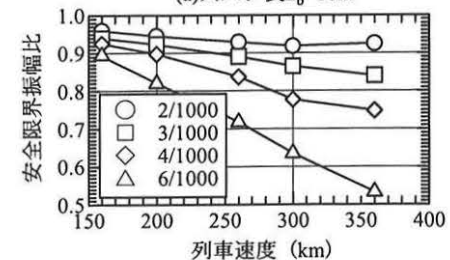


(b)安全限界振幅比

図5 振動変位および角折れ(平行移動)を考慮した解析結果の例(列車速度260km/h)



(a)スパン長 $L_b=10m$



(b)スパン長 $L_b=30m$

図6 列車速度および角折れ(平行移動)が安全限界振幅比に及ぼす影響

合には、構造物全体をモデル化して動的相互作用解析等により照査するのが望ましいが、設計実務としては煩雑となる。よって地震時の列車走行性に係る照査は、従来どおり、横方向の振動変位と、その時に生じている構造物間の最大相対不同変位に分けて行うものとし、これに対応する限界値を前章に示した検討結果に基づき設定することとした。

表1に、地震時における軌道面の不同変位(角折れ・目違

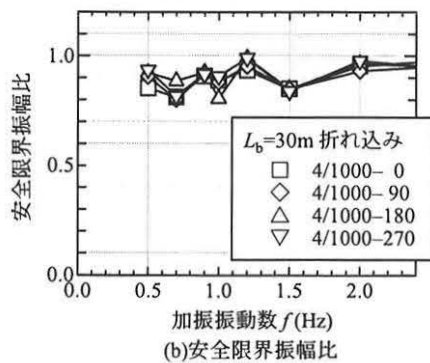
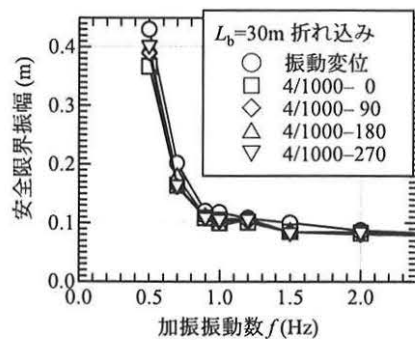


図7 振動変位と角折れ(折れ込み)を考慮した解析結果の例(列車速度 260km/h)

い)の限界値を示す。角折れの限界値 θ_L は、前述の安全限界振幅比に基づき定めた。具体的には、横方向の振動変位の限界値は、解析上定まる振動変位のみによる限界値から10%低い値を用いることとし、これに対応して角折れの限界値は、安全限界振幅比の低下率の平均値が10%を超えないように定めることとした。

目違いの限界値 h_L は、従来の限界値と実績等を踏まえて定めた。これらの限界値は、目違いの影響が角折れの影響を上回る場合の値に対応している。

なお、建設地点の制約条件により角折れの限界値を満たすことが著しく困難となる場合については、振動変位の照査の余裕度に応じて、式(4)に示す補正係数 k_{SI} を乗じて表1に示す限界値 θ_L を緩和してもよい。

$$k_{SI} = (SI/SI_L)^{2.5} \leq 1.5 \quad (4)$$

ここに、 k_{SI} はスペクトル強度による振動変位の照査の余裕度を考慮する係数、 SI はスペクトル強度の設計応答値、 SI_L はスペクトル強度の設計限界値である^{1),6)}。

5. まとめ

地震時の不同変位(角折れ・目違い)の限界値を、安全限界振幅比に着目して定めた。具体的には、横方向の振動変位の限界値は、解析上定まる振動変位のみによる限界値から10%低い値を用いることとし、これに対応して不同変位の限界値を安全限界振幅比の低下率の平均値が10%を超えない

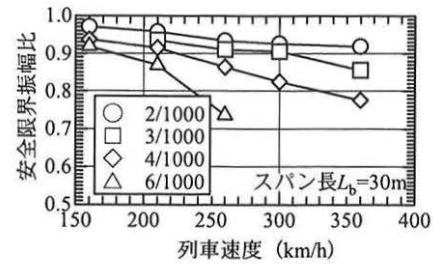


図8 列車速度および角折れ(折れ込み)が安全限界振幅比に及ぼす影響

表1 地震時の軌道面の不同変位の限界値(水平)

最高速度 (km/h)	角折れ θ_L (・1/1000)			目違い h_L (mm)
	平行移動		折れ込み	
	$L_b=10m$	$L_b=30m$		
130	7.0		8.0	14
160	6.0		6.0	12
210	5.5	3.5	4.0	10
260	5.0	3.0	3.5	8
300	4.5	2.5	3.0	7
360	4.0	2.0	2.0	6

ように定める手法を提案した。

本研究では、固定不同変位モデルを用いて検討を行ったが、今後は、線路方向に連続する構造物の地震時における全体挙動について検討を進めていく予定である。

本研究の内容は、国土交通省の指導のもと平成13年に設けられた「列車走行性に係る構造物の変位制限に関する委員会」(委員長:西岡隆 筑波大学名誉教授)で審議され、平成15年度末に得られた成案の一部として取り入れられた。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 涌井一, 松本信之, 松浦章夫, 田辺誠: 鉄道車両と線路構造物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.
- 3) 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性に関する検討, 鉄道総研報告, Vol.17, No.9, 2003.
- 4) 佐藤吉彦, 三浦重: 走行安全ならびに乗心地を考慮した線路構造物の折角限度, 鉄道技術研究報告, No.820, 1972.
- 5) 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, 機論 C, Vol.64, No.626, pp.236~1243, 1998.
- 6) Luo Xiu: Study on Methodology for Running Safety Assessment of Trains in Seismic Design of Railway Structures, J Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Elsevier Science Ltd., Vol.25, No.2, pp.79-91, 2005.