

表面波に起因する地震動波長を用いた 軌道の角折れの評価方法

羅 休* 坂井 公俊* 曾我部 正道**

Angular Rotation Assessment Method for Track Using Seismic Wavelength
Originated from Surface Waves

Xiu LUO Kimitoshi SAKAI Masamichi SOGABE

Since the differential displacement of a track which is caused by an earthquake influences the running safety of train strongly, it is important to consider the effects in designing railway structures seismically. In this paper, to obtain a proper seismic wavelength for assessment of differential displacement of track, the authors examined the characteristics of phase velocity which reflects the dispersion of Rayleigh wave, and proposed an empirical formula of calculating the wavelength based on the parameters of various real grounds. Moreover, the influence of the wavelength on the angular rotation assessment of viaducts was examined. As a result, it has been understood that the influence due to the characteristics of the ground G3 on the angular rotation assessment can be neglected, but the influence due to the characteristics of the ground G4 should be taken into account because of its obvious effect.

キーワード：耐震設計，表面波，波長，地盤種別，走行安全性照査，角折れ，高架橋

1. はじめに

地震時に隣接する構造物間での変位の相異によって生じる軌道面の不同変位は、列車の走行安全性に大きな影響を与えるため、鉄道構造物の耐震設計を行う際、その影響を適切に考慮することが重要である。地震時軌道面の不同変位の照査は、構造物の境界に生じる角折れおよび目違いに対して行う。角折れおよび目違いは、地震で生じる線路直角方向の水平変位により生じる。この水平変位は、構造物の変位振幅と地表面に沿った見かけの波長を与えて算出することができる。現行の「鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限）」¹⁾（以下、変位制限標準）における地表面波の見かけの波長の算定式は、表層地盤と基盤層のせん断弾性波速度を用いて調平均方法によるものとなっている。この方法では、物理的な意味が必ずしも明確でないため、改善する必要がある。

本研究では、弾性波動論に基づく Haskell のマトリックス法²⁾を用いて、レイリー波の分散性（周期によって伝播速度が異なる性質）を反映した位相速度の特性を検討したうえで、分散性の影響を考慮した波長の算定方法を提案した。また、多数の実地盤の諸パラメータ（土の単位体積重量，初期 S 波速度，剛性低減係数，ポアソン

比および P 波速度）に基づいて、耐震設計に用いる地表面波の波長算定の経験式を作成した。さらに、この経験式を用いて、「鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）」³⁾（以下、耐震標準）に定めている G3（弾性固有周期 0.25 ～ 0.5sec）と G4（0.5 ～ 0.75sec）地盤に建設される高架橋を対象に、L1 地震動による角折れに対する地盤の固有周期および波長による影響を検討した。

2. 波の分散性の影響を考慮した表面波の波長

2.1 表面波の位相速度

地表面に沿った方向の表面波の見かけの波長 L (m) は、次の式により求めることができる。

$$L = V_{surf} \times T'_g \quad (1)$$

ここで、

V_{surf} ：表面波の見かけの伝播速度 (m/s)

T'_g ：表層地盤の固有周期 (sec) で、地震時には非線形化することを考えて、 $T'_g = T_g / \alpha_g$ で与える。

T_g ：初期せん断弾性波速度から算定した表層地盤の固有周期 (sec)

α_g ：表層地盤のせん断弾性係数の低減係数で、L1 地震動の場合は 0.7 とする³⁾。

表面波の見かけの伝播速度は位相速度から定められる。位相速度は、波の周期成分に依存する分散性を持ち、レイリー波とラブ波によって異なるが、ここでは高圧ガス

* 構造物技術研究部 耐震構造研究室

** 鉄道力学研究部 構造力学研究室

特集：構造物の耐震設計技術

導管の設計法⁴⁾を参考にし、レイリー波の分散性を反映した位相速度について検討を行った。また、表面波の波長算出に用いた伝播速度は、地盤剛性が低減された固有周期 ($T'_g = T_g/\alpha_g$) に対応した位相速度を採用した。

水平成層地盤のレイリー波の位相速度の算定には、Haskell のマトリックス法²⁾を用いた。この方法は周波数領域での解析を基にして、地表面と基盤との間の重複反射による振幅の増幅効果を考慮し、周期に依存する地盤の応答 (振幅の変化と位相のずれ) を求めることができる。表面波の位相速度の算定に必要な入力データとしては、各地盤種別を代表する数多くの地盤から、図1に示す諸パラメータ (土の単位体積重量、初期S波速度、剛性低減係数、ポアソン比およびP波速度) を採用した。

地盤のP波速度の算出に使われたS波速度 V_s は、L1地震時の地盤剛性低下を考慮し、 $V_s = V_{s0} \times \alpha_g$ とした。また、ポアソン比について、通常の場合では、地下水位以下の部分に対して0.45以上の高い数値を設定するが、ここでは、表面波の振幅が同じく波長が短い場合、列車

走行安全性を確保するのが厳しくなることを考えて、設計が安全側となるようにポアソン比を0.33と0.4と設定して計算を行った。

計算した位相速度と周期の関係の一例 (ポアソン比0.33) を図2に示す。この図中の凡例に示している地盤固有周期 (T_g) は、初期せん断弾性波速度を用いて固有値解析により算出したものである。位相速度と周期の関係を考察すると、以下のことが言える。

①位相速度と周期の関係曲線の形状 (分散曲線) は、地盤固有周期の変化によって徐々に変わる。硬い地盤から軟らかい地盤に変化すると、その位相速度の分布範囲が広がる。

②位相速度と周期の関係曲線の形状はいくら変化しても、全ての地盤の位相速度の最大値は約360m/sのところ収束している。

③表面波の見かけの伝播速度は位相速度に依存しているため、周期が長くなるほど波長が長くなり、波動の進みが速くなる。

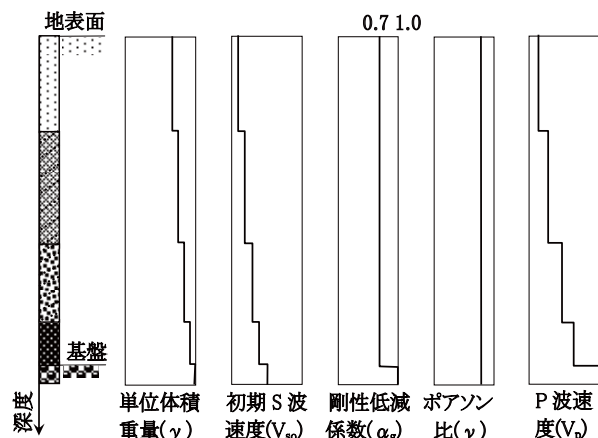


図1 位相速度算定に必要な地盤パラメータ

2.2 表面波の波長の算定

図2に示す表面波に含まれる周期成分と位相速度の関係をj用いて、表面波の見かけの波長を算出する方法を概念的に図3に示す。ここで、地盤の固有 (卓越) 周期を表面波の見かけの周期と定義し、地震時の剛性低下を考慮した地盤の固有周期 ($T'_g = T_g/\alpha_g$) に対応した位相速度を表面波の見かけの伝播速度として定め、それにより見かけの波長を算出することができる。このような手法を用いて、各地盤種別を代表する数多くの地盤を対象にそれぞれの見かけの波長を算出した。その結果として、ポアソン比が0.33と0.4の時の見かけの波長 (L) と地盤固有周期 (T_g) との関係を図4にプロットした。この計

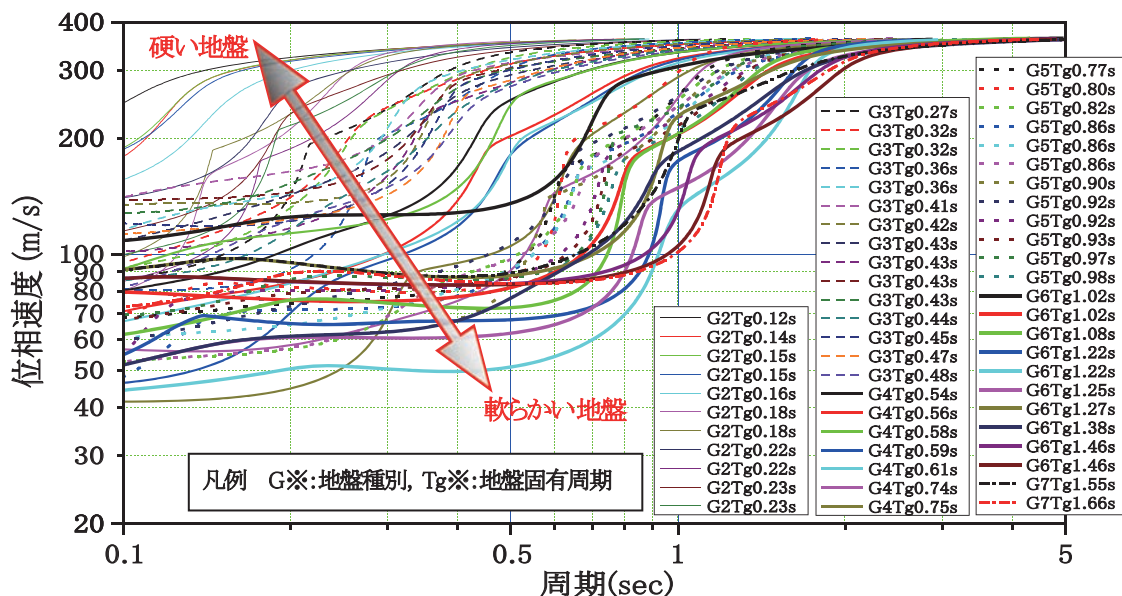


図2 各地盤種別における地表面波の位相速度と周期の関係の一例 (ポアソン比0.33)

算結果から作成した L と T_g の近似関係を次の式で表す。

$$L = 460.39 \times T_g^{1.0062} \quad (2)$$

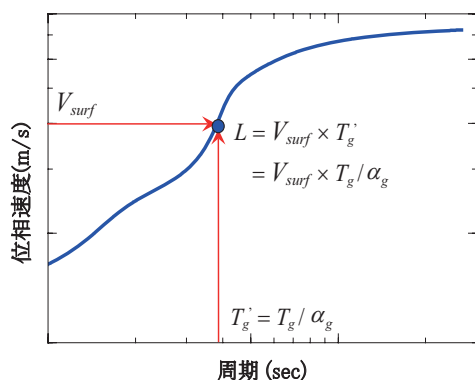


図3 表面波の位相速度、周期および波長との関係

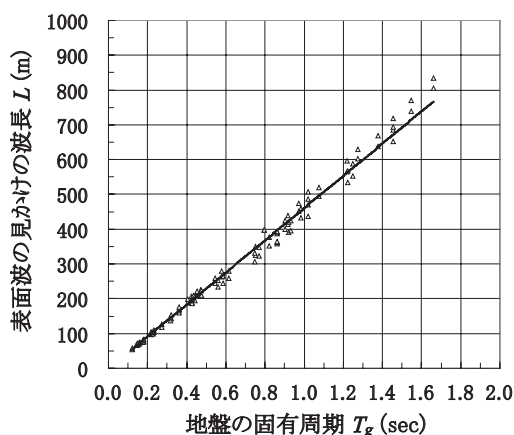


図4 表面波の見かけの波長と地盤固有周期の関係

3. 地震時軌道面の不同変位に及ぼす地盤の影響

地震時軌道面の不同変位は、構造形式、上部構造物と基礎の剛性、および地盤特性などの要素に影響される。ここでは、地盤の影響を把握するために、G3とG4地盤に建設される桁式高架橋およびゲルバー式ラーメン高架橋を対象として、地盤の固有周期および波長が高架橋の角折れに及ぼす影響について検討を行った。

3.1 検討の対象および方法

検討対象とする桁式高架橋およびゲルバー式ラーメン高架橋の軌道面における角折れのイメージを図5に示す。図5(c)と(d)は、橋脚 P_2 およびラーメン R_2 が照査対象として、その隣接する構造物に固有周期の差がある場合には、それぞれが位相差を伴って振動し、慣性力によって生じる変位のイメージを表わしたものである。この慣性力を「位相差詳細考慮」慣性力と呼ぶ。一方、構造物間の位相差が小さく、 δ_2 と δ_1 、 δ_3 の差が小さい場合でも少なくとも $\delta_2/2$ 、 $\delta_1 = \delta_3 = 0$ として、慣性力による角折れを検討する。この場合の慣性力を「位相差簡易考慮」慣性力と呼ぶ。上部構造物の慣性力および地盤変位による角折れの算定は、変位制限標準(付属資料11)に準拠した。

また、表1に示すように、設計実例を参考にして、「位相差詳細考慮」慣性力による角折れの算定では、隣接する構造物の固有周期の差を0.8～0.9倍($T_1 = 0.8 \sim 0.9T_2$)と設定した。高架橋のスパン長を等径間とし、桁式の場合は20～60m、ゲルバー式ラーメンの場合は10～60m(ゲルバー桁長10m)と設定した。照査に用いる角折れの値は、「位相差詳細考慮」慣性力と地盤変位による角折れ

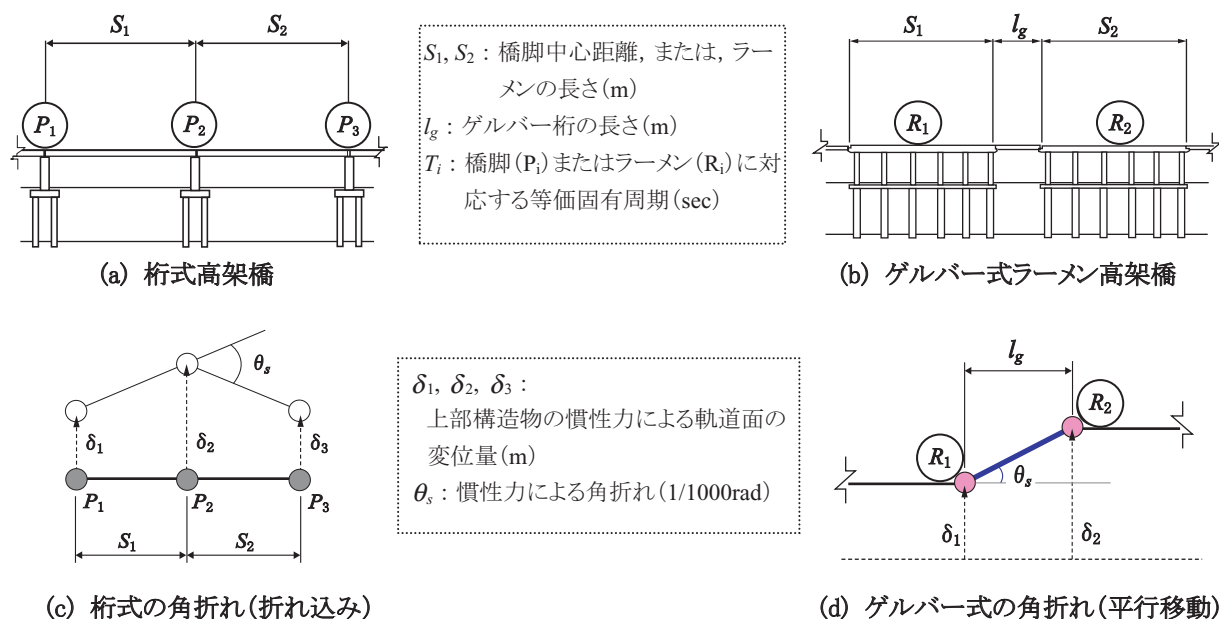


図5 桁式高架橋およびゲルバー式ラーメン高架橋における角折れのイメージ

特集：構造物の耐震設計技術

表 1 地震時における軌道面の角折れの算出

地盤 種別	高架橋 形式	構造物の固有周期 T_i (sec)			スパンの長さ S (m), l_g (m)	地盤変位に よる角折れ*1 (1/1000 rad)	慣性力による角折れ (1/1000 rad)		照査用 角折れ値
							位相差 詳細考慮*2	位相差簡易 考慮 (下限)*3	
G3	桁式	T_2	$T_1=0.9T_2$	$T_3=0.9T_2$	$S=S_1=S_2=20 \sim 60$	$\theta_{(gmax)}$	$\theta_{(\delta_1)}$	$\theta_{(\delta_{2/2})}$	【 $\theta_{(gmax)} + \theta_{(\delta_1)}$ 】 もしく は $\theta_{(\delta_{2/2})}$ の大きい方
	ラーメン	T_2	$T_1=0.8T_2$		$S=S_1=S_2=10 \sim 60, l_g=10$				
G4	桁式	T_2	$T_1=0.9T_2$	$T_3=0.9T_2$	$S=S_1=S_2=20 \sim 60$	$\theta_{(gmax)}$	$\theta_{(\delta_1)}$	$\theta_{(\delta_{2/2})}$	【 $\theta_{(gmax)} + \theta_{(\delta_1)}$ 】 もしく は $\theta_{(\delta_{2/2})}$ の大きい方
	ラーメン	T_2	$T_1=0.8T_2$		$S=S_1=S_2=10 \sim 60, l_g=10$				

*1：「鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限）」（付属資料 11）式（6），（14）。

*2：「鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限）」（付属資料 11）式（2），（3）。

*3：「鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限）」（付属資料 11）pp.141，下 11 行目。

表 2 地盤と構造物組合せケースの設定

ケース名	地盤固有周期 T_g (sec)	地盤剛性が低減された固有周期 T'_g (sec)	波長 L (m)	照査対象高架橋の固有周期 T_2 (sec)	慣性力による軌道面変位量 $\delta_z=T_2^2/4 \times 0.35$ (m)
G3 短－桁	0.273	0.39	124.68	0.855	0.064
G3 短－ゲルバー				0.5	0.022
				1.01	0.09
				0.5	0.022
G3 長－桁	0.477	0.681	218.6	0.855	0.064
G3 長－ゲルバー				0.5	0.022
				1.01	0.09
				0.5	0.022
G4 短－桁	0.545	0.778	249.79	0.855	0.064
G4 短－ゲルバー				0.5	0.022
				1.01	0.09
				0.5	0.022
G4 長－桁	0.75	1.071	344.54	0.855	0.064
G4 長－ゲルバー				0.5	0.022
				1.01	0.09
				0.5	0.022

の合計，もしくは「位相差簡易考慮」慣性力による角折れの下限値の大きい方を使用した。

なお，「位相差詳細考慮」の場合では，構造物の固有周期と剛性が低減された地盤の固有周期の比を用いて，構造物の減衰定数を 0.1 と仮定し，隣接する高架橋の応答の位相角を求めた。

3.2 検討ケースの設定

角折れ照査に及ぼす地盤固有周期の影響を把握するために，G3 と G4 地盤に属する短周期タイプと長周期タイプの 2 種類の地盤を対象として検討を行った。また，構造物の固有周期（ T_2 ）は，桁式およびラーメン高架橋とも 2 タイプを設定した。これらの地盤と構造物を組み合わせたケースを検討する。表 2 にその一覧を示す。

3.3 検討結果

表 1 と表 2 に示される角折れの算出条件および入力パラメータを用いて，地盤変位および「位相差詳細考慮」慣性力による高架橋の最大角折れを算出した。

図 6 は，G3 と G4 地盤における等径間高架橋が連続した場合の最大角折れと正規化したスパン長（ S/L ）との関

係を示す。これらの結果から，以下のことが分かる。

①桁式高架橋（図 6（a），（c））において，地盤変位による角折れはスパン長の増加につれて増えるのに対して，「位相差詳細考慮」慣性力による角折れは減少する。また，ケース G4 短-桁（図 6（a））の「位相差詳細考慮」慣性力（ $T_2=0.855\text{sec}$ ）による角折れは，他のケースよりも倍くらい大きくなった。

②ゲルバー式ラーメン高架橋（図 6（b），（d））において，地盤変位による角折れはスパン長の増加につれて増えるが，「位相差詳細考慮」慣性力による角折れは一定値となっている。その理由は慣性力による角折れを算出する際に使われたゲルバー桁の長さが固定値（10m）のためである。また，G4 地盤における長周期高架橋（ $T_2=1.01\text{sec}$ ）の「位相差詳細考慮」慣性力による角折れは，G3 地盤の場合より大きいことが分かる。その原因は，構造物の固有周期が地盤の固有周期に接近することによって，位相差が増えた結果である。

表 1 に示す照査用の角折れの求め方にしたが，図 6 の結果から算出された G3 と G4 地盤の「地盤変位+位相差詳細考慮」による角折れ，および「位相差簡易考慮（ $\delta_2/2$ ）」による角折れの下限値を一緒にプロットした関係を

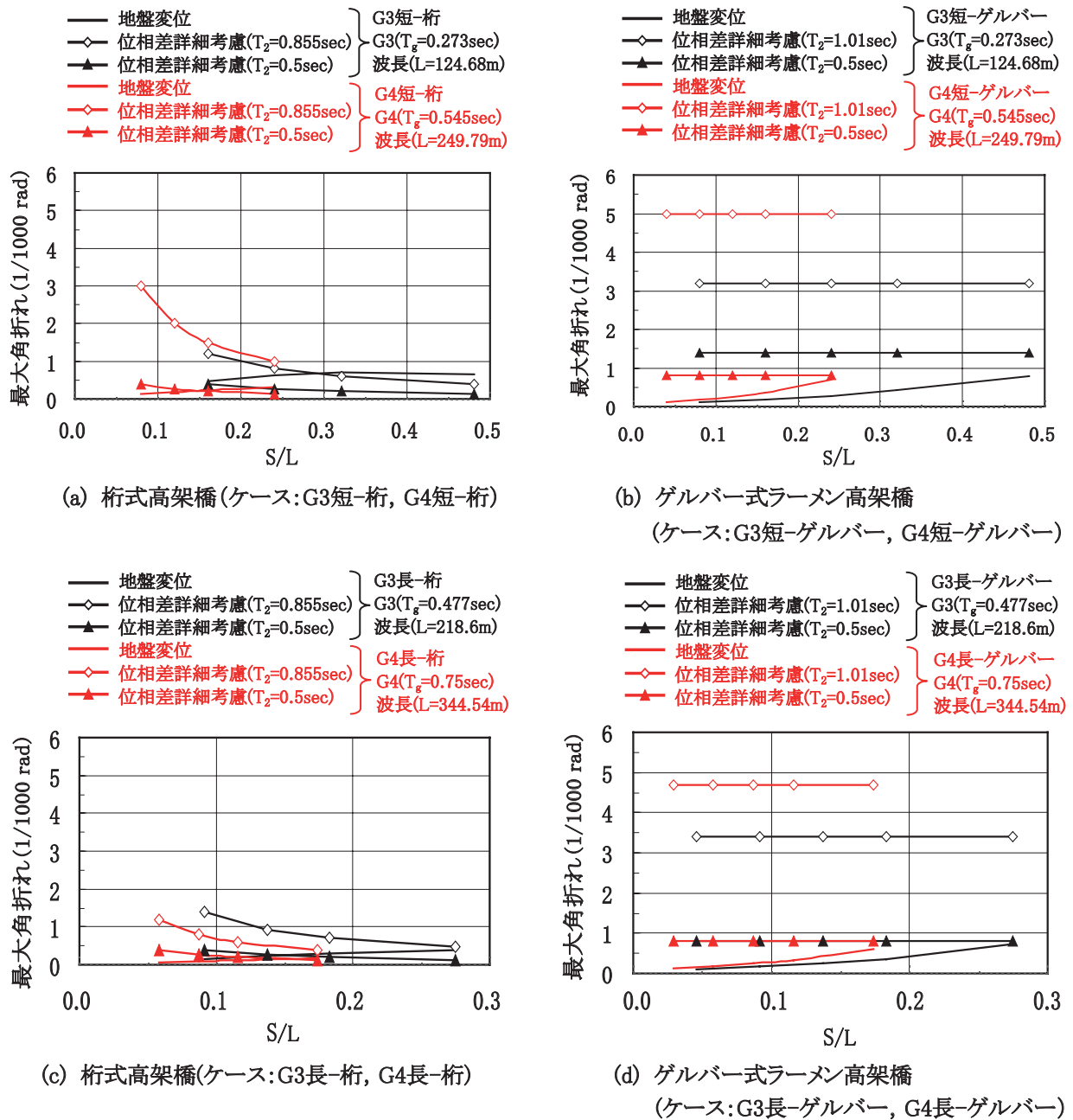


図6 G3とG4地盤変位および位相差を詳細に考慮する慣性力による最大角折れ

図7に示す。これらより、以下の傾向が認められる。

① G3地盤の場合、「地盤変位+位相差詳細考慮」による角折れは、「位相差簡易考慮 ($\delta_2/2$)」による角折れの下限值よりかなり小さくなっている。すなわち、G3地盤に建設される高架橋の角折れ照査は、「位相差簡易考慮 ($\delta_2/2$)」による角折れの下限值を使用すれば、安全側の結果になる。したがって、表1に示すようなG3地盤における通常の設計条件であれば、不同変位を照査する際には、地盤の影響を省略してもよい。

② G4地盤の場合、大部分の長周期高架橋（桁式： $T_2=0.855\text{sec}$ 、ラーメン： $T_2=1.01\text{sec}$ ）（図7(a), (b), (d)）において、「地盤変位+位相差詳細考慮」による角折れは、

「位相差簡易考慮 ($\delta_2/2$)」による角折れの下限值より大きい。したがって、G4地盤では、地盤の影響が顕著なため、不同変位を照査する際にはこれを考慮する必要がある。

4. まとめ

本研究では、地震時の列車走行安全性の照査法をさらに合理化するために、各地盤種別を代表する数多くの実地盤のデータを用いて、レイリー波の分散性を反映した位相速度の特性を分析し、その影響を考慮した地表面波に起因する地震動の波長の算定方法を提案した。また、この方法を用いて地震時軌道面の不同変位の照査に及ぼ

特集：構造物の耐震設計技術

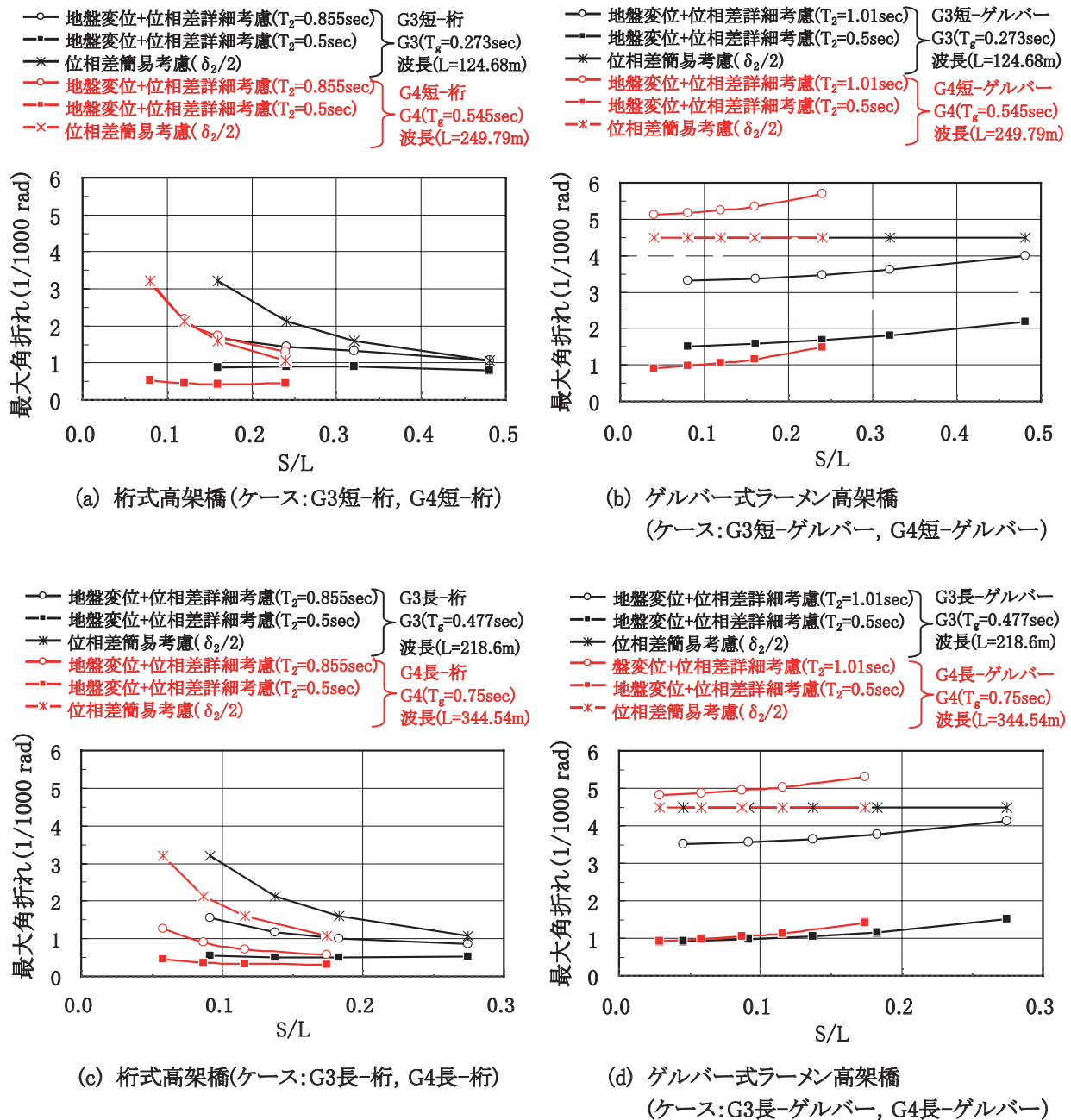


図7 G3とG4地盤における照査に用いる最大角折れ

す地盤固有周期と地盤変位の影響について検討を行った。その結果、表1に示すような設計条件の下で、G3地盤における不同変位の照査に及ぼす地盤の影響は小さいため、省略ができるが、G4地盤の場合ではその影響は大きくなることが分かった。

したがって、L1地震動に対する不同変位を照査する際に、上記のような設計条件の下では、地盤固有周期と地盤変位の影響を考慮する地盤種別はG4以上とすることが妥当であると考えられる。

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（変位制限），丸善株式会社，2006
- 2) Haskell, N. A.: The Dispersion of Surface Waves on Multilayered Media, Bulletin of Seismological Society of America, Vol.43, pp.17-34, 1953.
- 3) 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），丸善株式会社，1999
- 4) 日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針（JGA-206-00），2000