

地表地震断層による 橋梁および盛土の相対変位量の簡易推定法

常田賢一¹

¹独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ長
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail:tokida@pwri.go.jp

本研究は、橋梁および盛土の軸方向に対して任意の交差角で交差し、任意の傾斜角を持つ地表地震断層を想定し、橋梁および盛土において発生する影響変位量、つまり相対変位量を簡易に算定する方法を検討した。その結果、地表地震断層の影響として、橋梁の場合は支承部および道路線形の2つの相対変位、盛土の場合は道路線形の相対変位を包含する断層位置での相対変位に着目することが必要であることを指摘するとともに、構造物の水平軸方向、水平軸直角方向および鉛直方向毎の相対変位量の簡易推定法を提案した。さらに、提案した簡易推定法による試算により、構造物の相対変位量に及ぼす地表地震断層の交差角および傾斜角の影響を明らかにした。

Key Words : Surface Active Fault, Bridge, Road Embankment, Fault Displacement, Relative Displacement, Simplified Estimating Procedure

1. はじめに

1999年台湾・集集地震や同年トルコ・コジャエリ地震では、地表地震断層（以下、地震断層と呼ぶ）により、橋梁等の土木構造物に甚大な被害が発生した。現在、文部科学省地震調査推進本部が進めている活断層調査により、地震断層の特性が明らかになるのに伴い、地震断層に対して具体的な対応が求められる事業も増えることが予想される。

そのためには、土木構造物に対する地震断層の影響の定量的な予測が必要であることから、本文では橋梁および盛土を対象として、任意の交差角度や傾斜角を持つ地震断層により発生する構造物の変位量の簡易な推定方法を提案する。さらに、簡易推定法による試算結果により、構造物の相対変位量に対する地震断層の特性の影響を考察する。

2. 計画・設計に係わる地震断層の特性

地震断層に対する土木構造物の対策を考える場合、前提条件としての地震断層の特性を明確にする必要があるが、現地盤位置における工学的な視点からの重要な要因は以下の通りである（図-1参照）。

- ① 断層（線）の位置および走行
- ② 断層（線）の範囲（幅および延長）
- ③ 断層の発生形態（横ずれ断層、正・逆断層等）およびずれの方向
- ④ 断層（面）の傾斜角： α

⑤ 断層（面）の変位量： D

⑥ 構造物の軸との交差角

ここで、Cole・Lade(1989)¹⁾、上田・谷(1992)²⁾は、断層変位が地表面に到達するための表層厚に対する断層変位量の限界比率の存在を、またCole・Lade(1989)¹⁾、上田(1993)³⁾は断層の地表面到達位置が入射角や表層厚と一義的な関係があることを指摘している。これらの知見によれば、盛土と地震断層の関係において、盛土本体を表層に相当すると見なすと、図-1に示すように盛土天端における断層の特性が現地盤位置とは異なることになり、盛土については、以下の要因が付加される。

⑦ 天端における断層（線）の到達位置： W

⑧ 天端における断層（面）の傾斜角： α'

⑨ 天端における断層の変位量： D'

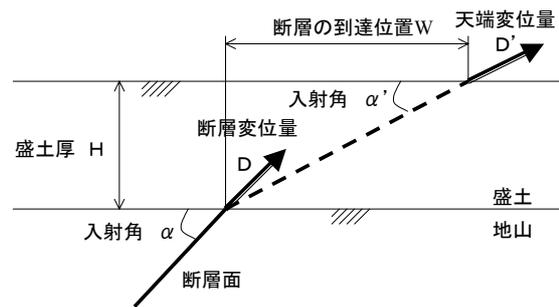


図-1 盛土と地震断層の関係の概念例

3. 地震断層による橋梁の相対変位

(1) 地震断層のモデル化

現地盤面で地震断層がずれた状況を図-2のようにモデル化する。つまり、断層面は橋軸方向（x軸）に対して交差角 θ 、現地盤面に対して傾斜角 α で設定し、断層面内で θ 軸に対して角度 β の方向に変位 D_0 でずれるとする。ここで、地震断層により発生する橋梁の変位を推定するため、変位 D_0 を横ずれ断層および正・逆断層の成分、つまり、それぞれ式(1)による横ずれの変位 D_H および式(2)による水平傾斜ずれの変位 D_{NR} に分ける。

$$D_H = D_0 \cos \beta \quad (1)$$

$$D_{NR} = D_0 \sin \beta \quad (2)$$

従って、変位 D_0 による橋梁の変位は、横ずれ変位および水平傾斜ずれ変位により発生する橋梁の変位を合算して推定する。ここで、橋梁の変位としては、支承部のずれに係わる相対変位と橋梁における道路線形のずれに係わる相対変位の影響が異なることから、両者を区別する。また、対象橋梁は、断層被害を限定的にする観点から、単純桁(部)を対象とし、1径間を1本の梁で模式化する。なお、下部工は支持地盤と一体的であり、地震断層の影響あるいは橋桁による拘束も受けないと見なす。

(2) 横ずれ変位による橋梁の相対変位

左横ずれ断層により橋桁に引張方向の相対変位が発生する場合の断層と橋桁の関係を図-3で模式化する⁴⁾。つまり、断層が橋軸方向と角度 θ で交差し、変位 D_H でずれた場合、可動支承 P_2 が固定支承 P_1 を中心として、断層変位の移動点 P''_2 方向に向かって回転移動して P'_2 に到ると想定する。

図-3の場合に橋桁に圧縮方向の相対変位が発生する場合および右横ずれ断層の場合を加えて、任意の交差角の断層に対して模式化すると図-5となる。同図において、橋軸（x軸）の+方向から反時計回りを交差角 θ の+方向とする。また、点 P''_2 が P'_2 と一致するずれの方向は、橋桁に対する引張方向と圧縮方向の境界となるが、この場合の交差角を θ_0 とする。

a) 支承部の相対変位

図-3における d_{LH} および d_{TH} は、それぞれ橋軸方向および橋軸直角方向の支承 P'_2 と橋脚天端の支承位置 P''_2 との相対変位である。これらの相対変位は交差角 θ の範囲に対応して、式(3)が導かれる⁴⁾。

[-180° ≤ θ ≤ -90° の場合]

$$d_{LH} = (L - D_H \cos \theta') \left\{ 1 - \frac{L}{\sqrt{(L - D_H \cos \theta')^2 + (D_H \sin \theta')^2}} \right\} \quad (3-1)$$

$$d_{TH} = (D_H \sin \theta') \left\{ \frac{L}{\sqrt{(L - D_H \cos \theta')^2 + (D_H \sin \theta')^2}} - 1 \right\} \quad (3-2)$$

ここに、 D_H : 横ずれ変位(m),
L : 橋桁の支間長(m)

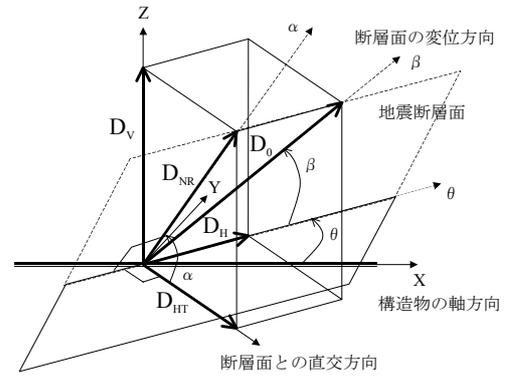


図-2 地震断層における変位の概念

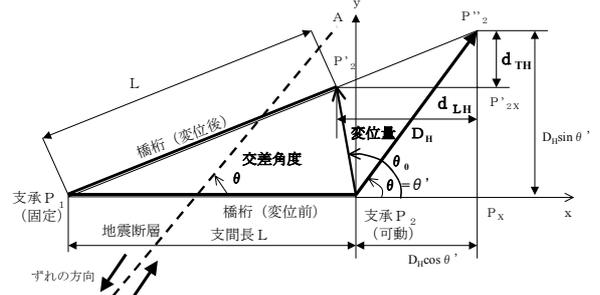


図-3 横ずれ変位と橋桁の関係(引張方向の場合)

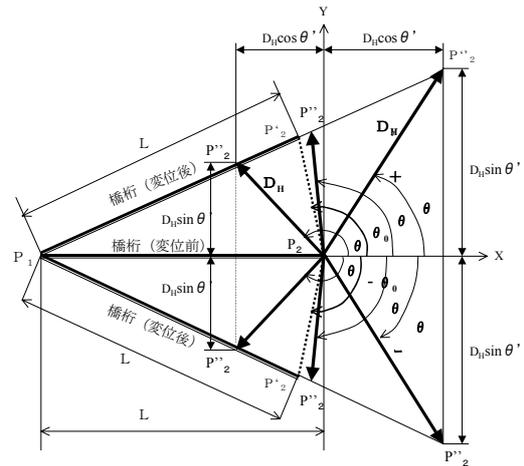


図-4 任意の方向の横ずれ変位と橋桁の関係

θ' : θ の範囲に応じた交差角(°)

$$\theta' = 180^\circ + \theta$$

[-90° ≤ θ ≤ 90° の場合]

$$d_{LH} = (L + D_H \cos \theta') \left\{ 1 - \frac{L}{\sqrt{(L + D_H \cos \theta')^2 + (D_H \sin \theta')^2}} \right\} \quad (3-3)$$

$$d_{TH} = (D_H \sin \theta') \left\{ 1 - \frac{L}{\sqrt{(L + D_H \cos \theta')^2 + (D_H \sin \theta')^2}} \right\} \quad (3-4)$$

ここに、 $\theta' = \theta$

[90° ≤ θ ≤ 180° の場合]

$$d_{LH} = (L - D_H \cos \theta') \left\{ 1 - \frac{L}{\sqrt{(L - D_H \cos \theta')^2 + (D_H \sin \theta')^2}} \right\} \quad (3-5)$$

$$d_{TH} = (D_H \sin \theta') \left\{ 1 - \frac{L}{\sqrt{(L - D_H \cos \theta')^2 + (D_H \sin \theta')^2}} \right\} \quad (3-6)$$

ここに、 $\theta' = 180^\circ - \theta$

なお、式(3)における d_{LH} および d_{TH} は、それぞれ P''_2 が P'_2 に対してx軸およびy軸の+方向にある場合に+の値、逆に-方向の場合は-の値となるようにしている。

b) 道路線形の相対変位

図-3において、固定支承 P_1 と橋脚天端の移動先である P''_2 の相対変位のうち、橋軸直角方向の相対変位は橋梁における道路平面線形のずれに相当する。従って、 $-180^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ における平面線形の相対変位 d_{THS} (y軸+方向が+)は式(4)で算出できる。

$$d_{THS} = D_H \sin \theta' \quad (4)$$

ここに、 $\theta' = \theta$

(3) 水平傾斜ずれ変位による橋梁の相対変位

3次元空間において、正断層により橋桁に引張方向の相対変位が発生する水平傾斜ずれ変位 D_{NR} と橋桁の関係を図-5で模式化する。つまり、断層面が橋軸と角度 θ で、x-y面と角度 α で交差し、変位 D_{NR} でずれた場合、可動支承 P_2 が固定支承 P_1 を中心として、断層変位の移動点 P''_2 方向に向かって回転移動して P'_2 に到ると想定する。同様に、逆断層により橋桁に圧縮方向の相対変位が発生する場合の水平傾斜ずれ変位と橋桁の関係を図-6で模式化する。なお、図-5および図-6において、橋軸(x軸)の+方向から反時計回りを交差角 θ の+方向とし、x-y面の上方方向回りを交差角 α の+方向とする。

交差角 α については図-4の θ_0 と同様に、点 P''_2 が P'_2 と一致するずれの方向は、橋桁に対する引張方向と圧縮方向の境界となるが、この場合の交差角を α_0 とする。

a) 支承部の相対変位

図-5において、断層変位により移動した橋桁 P_1 、 P'_2 および移動点 P''_2 をx-z面に投影し、 $\triangle P_1 P'_2 P''_2$ と関係付けると図-7となる。同図における d_{LNR} および d_{VNR} は、それぞれ橋軸方向および鉛直方向の支承 P_2 と橋脚天端との相対変位であり、以下のように算出する。

式(5-1)～式(5-3)により変数 L_1 、 L_2 および L_3 を定義する。

$$L_1 = L + D_{NR} \cos \alpha' \cdot \sin \theta' \quad (5-1)$$

$$L_2 = L + D_{NR} \cos \alpha' \cdot \cos \theta' \quad (5-2)$$

$$L_3 = D_{NR} \sin \alpha' \quad (5-3)$$

$$\triangle P_1 P'_2 P''_2 \text{ および } \triangle P_1 P''_2 P'_2 \text{ から、} \quad (5-4)$$

$$(P_1 P''_2)^2 = L_1^2 + L_3^2$$

$$(P_1 P'_2)^2 = (P_1 P''_2)^2 + L_2^2$$

$$= L_1^2 + L_3^2 + L_2^2 \quad (5-5)$$

$$\triangle P_1 P''_2 P'_2 \text{ において、} \quad (5-6)$$

$$L_{xz} : (P_1 P''_2) = L : (P_1 P'_2)$$

$$\text{式(5-6)から、} \quad (5-7)$$

$$L_{xz} = L \times (P_1 P''_2) / (P_1 P'_2)$$

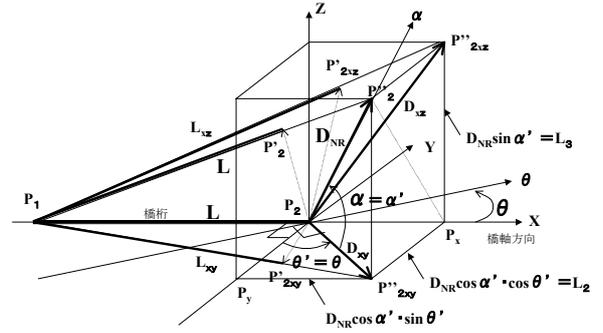


図-5 水平傾斜ずれ変位と橋桁の変位の関係(引張方向の場合)

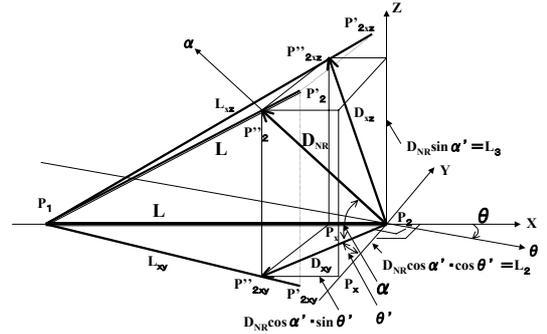


図-6 水平傾斜ずれ変位と橋桁の変位の関係(圧縮方向の場合)

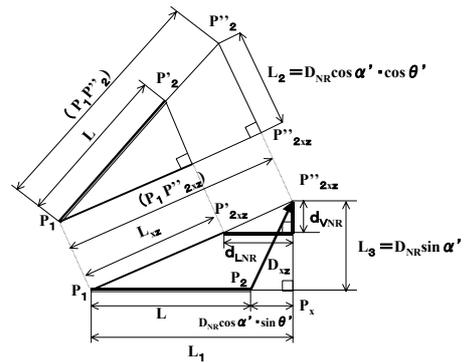


図-7 水平傾斜ずれと橋桁の変位の投影図(図-5のx-z面)

$\triangle P_1 P'_2 P''_2$ において、

$$d_{LNR} : L_1 = d_{VNR} : L_3$$

$$= (P'_2 P''_2) : (P_1 P''_2)$$

$$= (P_1 P''_2 - L_{xz}) : (P_1 P''_2) \quad (5-8)$$

式(5-7)および式(5-8)から、

$$d_{LNR} = L_1 \times \{1 - L_{xz} / (P_1 P''_2)\}$$

$$= L_1 \times \{1 - L / (P_1 P'_2)\} \quad (5-9)$$

$$d_{VNR} = L_3 \times \{1 - L_{xz} / (P_1 P''_2)\}$$

$$= L_1 \times \{1 - L / (P_1 P'_2)\} \quad (5-10)$$

式(5-1)～式(5-3)、式(5-5)、式(5-9)および式(5-10)から、式(6)が導かれる。

$$d_{LNR} = (L + D_{NR} \cos \alpha' \cdot \sin \theta') \times \left\{ 1 - \frac{L}{\sqrt{(L + D_{NR} \cos \alpha' \cdot \sin \theta')^2 + (D_{NR} \cos \alpha' \cdot \cos \theta')^2 + (D_{NR} \sin \alpha')^2}} \right\} \quad (6-1)$$

$$d_{VNR} = (D_{NR} \sin \alpha')$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{L}{\sqrt{(L + D_{NR} \cos \alpha' \cdot \sin \theta')^2 + (D_{NR} \cos \alpha' \cdot \cos \theta')^2 + (D_{NR} \sin \alpha')^2}} \right\} \quad (6-2)$$

また、図-5において、断層変位により移動した橋桁 $P_1P'_2$ および移動点 P''_2 を x - y 面に投影し、 $\triangle P_1P''_2P''_{2xy}$ と関係付けると図-8となる。同図における d_{LNR} および d_{TNR} は、それぞれ橋軸方向および橋軸直角方向の支承 P_2 と橋脚天端との相対変位であり、以下のように算出する。

$$\triangle P_1P_xP''_{2xy} \text{ および } \triangle P_1P''_{2xy}P''_2 \text{ から、} \\ (P_1P''_{2xy})^2 = L_1^2 + L_2^2 \quad (7-1)$$

$$(P_1P''_2)^2 = (P_1P''_{2xy})^2 + L_3^2 \\ = L_1^2 + L_2^2 + L_3^2 \quad (7-2)$$

$$\triangle P_1P''_{2xy}P''_2 \text{ において、} \\ L_{xy} : (P_1P''_{2xy}) = L : (P_1P''_2) \quad (7-3)$$

$$\text{式(14)から、} \\ L_{xy} = L \times (P_1P''_{2xy}) / (P_1P''_2) \quad (7-4)$$

$$\triangle P_1P_xP''_{2xy} \text{ において、} \\ d_{LNR} : L_1 = d_{TNR} : L_2 \\ = (P'_2P''_{2xy}) : (P_1P''_{2xy}) \\ = (P_1P''_{2xy} - L_{xy}) : (P_1P''_{2xy}) \quad (7-5)$$

$$\text{式(15)および式(16)から、} \\ d_{TNR} = L_2 \times \{1 - L_{xy} / (P_1P''_{2xy})\} \\ = L_2 \times \{1 - L / (P_1P''_2)\} \quad (7-6)$$

式(5-1)～式(5-3)、式(7-2)および式(7-6)から、

$$d_{TNR} = (D_{NR} \cos \alpha' \cdot \cos \theta')$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{L}{\sqrt{(L + D_{NR} \cos \alpha' \cdot \sin \theta')^2 + (D_{NR} \cos \alpha' \cdot \cos \theta')^2 + (D_{NR} \sin \alpha')^2}} \right\} \quad (8)$$

一方、図-6において、式(9)による変数 L_4 を定義し、図-5と同様にすると、 d_{LNR} 、 d_{TNR} および d_{VNR} は、式(10)により導かれる。

$$L_4 = L - D_{NR} \cos \alpha' \cdot \sin \theta' \quad (9)$$

$$d_{LNR} = (L - D_{NR} \cos \alpha' \cdot \sin \theta')$$

$$\times \left\{ \frac{L}{\sqrt{(L - D_{NR} \cos \alpha' \cdot \sin \theta')^2 + (D_{NR} \cos \alpha' \cdot \cos \theta')^2 + (D_{NR} \sin \alpha')^2}} - 1 \right\} \quad (10-1)$$

$$d_{TNR} = (D_{NR} \cos \alpha' \cdot \cos \theta')$$

$$\times \left\{ \frac{L}{\sqrt{(L - D_{NR} \cos \alpha' \cdot \sin \theta')^2 + (D_{NR} \cos \alpha' \cdot \cos \theta')^2 + (D_{NR} \sin \alpha')^2}} - 1 \right\} \quad (10-2)$$

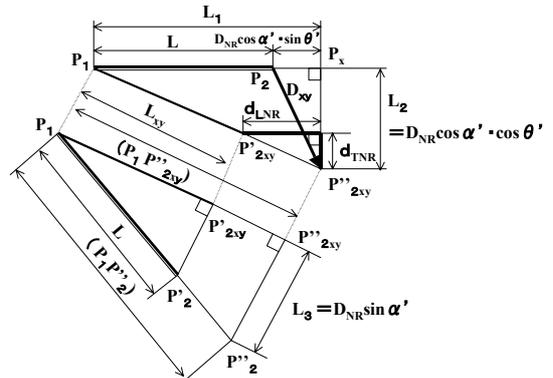


図-8 水平傾斜ずれ変位と橋桁の変位の投影図 (図-5の x - y 面)

表-1 地震断層の形態と交差角および傾斜角の関係

交差角 θ		傾斜角 α
-180°	-90°	
タイプIII 逆断層 (P_2 上方移動)	タイプI 正断層 (P_2 上方移動)	0°
タイプIV 逆断層 (P_2 下方移動)	タイプII 正断層 (P_2 下方移動)	90°

$$d_{VNR} = (D_{NR} \sin \alpha')$$

$$\times \left\{ \frac{L}{\sqrt{(L - D_{NR} \cos \alpha' \cdot \sin \theta')^2 + (D_{NR} \cos \alpha' \cdot \cos \theta')^2 + (D_{NR} \sin \alpha')^2}} - 1 \right\} \quad (10-3)$$

以上において、式(6)、式(8)および式(10)で算出される相対変位は+の値であるが、 d_{LNR} 、 d_{TNR} および d_{VNR} について、それぞれ P''_2 が P'_2 に対して x 軸、 y 軸および z 軸の+方向にある場合に+の値、逆の-方向にある場合は-の値となるようにする。また、地震断層の発生形態を表-1のように4つに分類して、交差角 θ および傾斜角 α の範囲を、それぞれ $-180^\circ \sim 180^\circ$ および $-90^\circ \sim 90^\circ$ に拡張することにより、全ての地震断層の発生条件を網羅する。この場合、 d_{LNR} 、 d_{TNR} および d_{VNR} は、正断層および逆断層毎に、式(11)により導かれる。

【逆断層： $-180^\circ \leq \theta \leq 0^\circ$ ， $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ 】

$$-180^\circ \leq \theta \leq -90^\circ : \theta' = 180^\circ + \theta$$

$$-90^\circ \leq \theta \leq 0^\circ : \theta' = -\theta$$

$$d_{LNR} = (L - D_{NR} \cos \alpha' \cdot \sin \theta')$$

$$\times \left\{ 1 - \frac{L}{\sqrt{(L - D_{NR} \cos \alpha' \cdot \sin \theta')^2 + (D_{NR} \cos \alpha' \cdot \cos \theta')^2 + (D_{NR} \sin \alpha')^2}} \right\} \quad (11-1)$$

$$d_{TNR} = (D_{NR} \cos \alpha' \cdot \cos \theta')$$

$$\times \left\{ \frac{L}{\sqrt{(L - D_{NR} \cos \alpha' \cdot \sin \theta')^2 + (D_{NR} \cos \alpha' \cdot \cos \theta')^2 + (D_{NR} \sin \alpha')^2}} - 1 \right\}$$

(11-2)

$$d_{TNR} = \left(D_{NR} \cos \alpha' \cdot \cos \theta' \right) \times \left\{ \frac{L}{\sqrt{\left(L - D_{NR} \cos \alpha' \cdot \sin \theta' \right)^2 + \left(D_{NR} \cos \alpha' \cdot \cos \theta' \right)^2 + \left(D_{NR} \sin \alpha' \right)^2}} - 1 \right\} \quad (11-3)$$

ここに、 $-90^\circ \leq \theta \leq 0^\circ$

$$d_{VNR} = \left(D_{NR} \sin \alpha' \right) \times \left\{ 1 - \frac{L}{\sqrt{\left(L - D_{NR} \cos \alpha' \cdot \sin \theta' \right)^2 + \left(D_{NR} \cos \alpha' \cdot \cos \theta' \right)^2 + \left(D_{NR} \sin \alpha' \right)^2}} \right\} \quad (11-4)$$

【正断層： $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ ， $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ 】 $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$: $\theta' = \theta$ $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$: $\theta' = 180^\circ - \theta$

$$d_{LNR} = \left(L + D_{NR} \cos \alpha' \cdot \sin \theta' \right) \times \left\{ 1 - \frac{L}{\sqrt{\left(L + D_{NR} \cos \alpha' \cdot \sin \theta' \right)^2 + \left(D_{NR} \cos \alpha' \cdot \cos \theta' \right)^2 + \left(D_{NR} \sin \alpha' \right)^2}} \right\} \quad (11-5)$$

$$d_{TNR} = \left(D_{NR} \cos \alpha' \cdot \cos \theta' \right) \times \left\{ \frac{L}{\sqrt{\left(L + D_{NR} \cos \alpha' \cdot \sin \theta' \right)^2 + \left(D_{NR} \cos \alpha' \cdot \cos \theta' \right)^2 + \left(D_{NR} \sin \alpha' \right)^2}} - 1 \right\} \quad (11-6)$$

ここに、 $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$

$$d_{TNR} = \left(D_{NR} \cos \alpha' \cdot \cos \theta' \right) \times \left\{ \frac{L}{\sqrt{\left(L + D_{NR} \cos \alpha' \cdot \sin \theta' \right)^2 + \left(D_{NR} \cos \alpha' \cdot \cos \theta' \right)^2 + \left(D_{NR} \sin \alpha' \right)^2}} - 1 \right\} \quad (11-7)$$

ここに、 $90^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$

$$d_{VNR} = \left(D_{NR} \sin \alpha' \right) \times \left\{ 1 - \frac{L}{\sqrt{\left(L + D_{NR} \cos \alpha' \cdot \sin \theta' \right)^2 + \left(D_{NR} \cos \alpha' \cdot \cos \theta' \right)^2 + \left(D_{NR} \sin \alpha' \right)^2}} \right\} \quad (11-8)$$

b) 道路線形の相対変位

図-5あるいは図-6において、固定支承 P_1 と橋脚天端の移動先である P_2 の橋軸直交方向の相対変位は橋梁における道路の平面線形および縦断線形のずれと見なせる。従って、 $-180^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ およ

び $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ における平面線形の相対変位 d_{TNR} （ y 軸+方向が+）および縦断線形の相対変位 d_{VNR} （ z 軸+方向が+）は、それぞれ式(12-1)および式(12-2)で算出できる。

$$d_{TNR} = D_{NR} \cos \alpha' \cdot \cos \theta' \quad (12-1)$$

$$d_{VNR} = D_{NR} \sin \alpha' \quad (12-2)$$

ここに、 $\theta' = 180^\circ + \theta$

$$\alpha' = \alpha$$

(4) 地震断層による相対変位

a) 相対変位の推定

(2)および(3)で推定した横ずれ変位および水平傾斜ずれ変位による相対変位から、任意の交差角 θ および傾斜角 α で交差する地震断層により発生する橋梁の支承部の相対変位について、水平橋軸方向、水平橋軸直角方向および鉛直方向毎に、それぞれ式(13-1)、式(13-2)および式(13-3)により算出する。

$$d_L = d_{LH} + d_{LNR} \quad (13-1)$$

$$d_T = d_{TH} + d_{TNR} \quad (13-2)$$

$$d_V = d_{VNR} \quad (13-3)$$

ここに、 d_L ：支承部の水平橋軸方向の相対変位 d_T ：支承部の水平橋軸直角方向の相対変位 d_V ：支承部の鉛直方向の相対変位

同様に、道路の平面線形および縦断線形の相対変位は、それぞれ式(14-1)および式(14-2)により算出する。

$$d_{TS} = d_{THS} + d_{TNR} \quad (14-1)$$

$$d_{VS} = d_{VNR} \quad (14-2)$$

ここに、 d_{TS} ：道路平面線形の相対変位 d_T ：道路縦断線形の相対変位

なお、図-2における交差角 θ について、断層面の変位方向（ β ）により、同じ地震断層であっても横ずれ変位と水平傾斜ずれ変位の算定に用いる交差角 θ の設定方法が異なるが、横ずれ変位では変位 D_H の方向と x 軸の+方向との角度、水平傾斜ずれ変位では θ 軸の+方向と x 軸の+方向との角度とする。

b) 相対変位の影響

地震断層による橋梁の支承部および道路線形の相対変位について、横ずれ変位、水平傾斜ずれ変位およびこれらの合成変位に対する、交差角 θ および傾斜角 α の影響を検討する。

b-1) 横ずれ変位の場合

$D_H = 5\text{m}$ で径間長 L が25m、50mおよび100mの場合を例として、横ずれ変位だけによる支承部の相対変位 d_{LH} および d_{TH} を試算すると、それぞれ図-10および図-11となる。図-10において、相対変位 d_{LH} は交差角に応じて断層変位 D_H の5mを最大値として増減し、交差角 $\pm \theta_0$ において0となる。また、径間長の増減による相対変位の増減は、交差角による影響よりかなり小さい。また、図-11の相対変位 d_{TH} は、交差角の増減に応じて増減し、交差角 θ が 0° 、 $\pm \theta_0$ および $\pm 180^\circ$ において0となる。なお、相対変位の絶対値は橋軸方向のそれに比較して小さいが、径間長の増減によっても顕著な増減を示す。

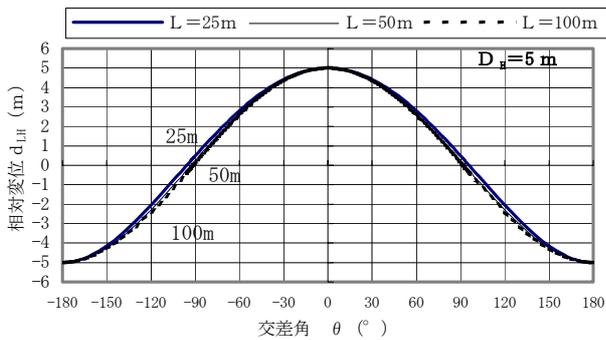


図-10 横ずれ変位による支承部の橋軸方向の相対変位

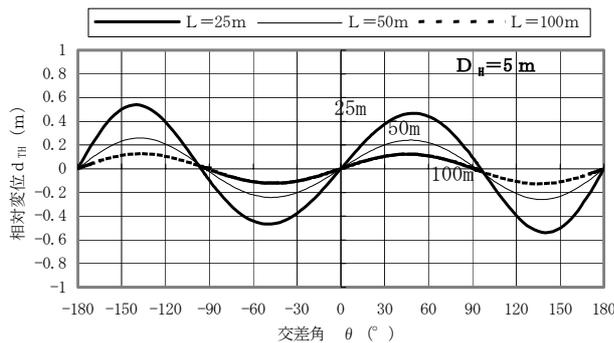


図-11 横ずれ変位による支承部の橋軸直角方向の相対変位

図-10および図-11の結果に道路の平面線形の相対変位 d_{THS} を併記すると図-12となる。同図から、相対変位 d_{LH} 、 d_{TH} および d_{THS} のいずれも交差角の影響を受けるが、影響のし方が異なる。例えば、最大相対変位および相対変位0を示す交差角が相互に異なる。また、 d_{LH} および d_{THS} は最大値が同じであるが、交差角に対する位相が 90° ずれている。さらに、 d_{TH} は d_{LH} および d_{THS} よりも相当 (1/10程度) 小さく、交差角に対して1/2の周期で変動する。

図-12のように、道路の平面線形 (縦断線形も同様) の相対変位の最大値は径間長に無関係であるが、その変化率は異なることに注意が必要である。図-13は式(15)で定義する平面線形の変化率 L_r について、 $D_H=5m$ で径間長 L が25m, 50m および100m 場合の関係を示す。

$$L_r = \frac{d_{TNR}}{L} \quad (15)$$

ここに、 L_r : 道路の平面線形の変化率

同図によれば、道路の平面線形の変化率は径間長の増大に伴って減少することが分かる。

b-2) 水平傾斜ずれ変位の場合

径間長 $L=50m$ 、 $D_{NR}=5m$ 、傾斜角 α が 30° 、 60° および 75° の場合を例として、水平傾斜ずれ変位のみによる支承部の相対変位 d_{LNR} を試算すると図-14となる。同図から、 d_{LNR} は傾斜角が小さいほど大きくなる傾向を示すとともに、交差角に応じて増減する。なお、 d_{TNR} は d_{LNR} と比較して絶対値は小さいが、傾斜角が小さいほど大きくなる傾向を示し、交差角

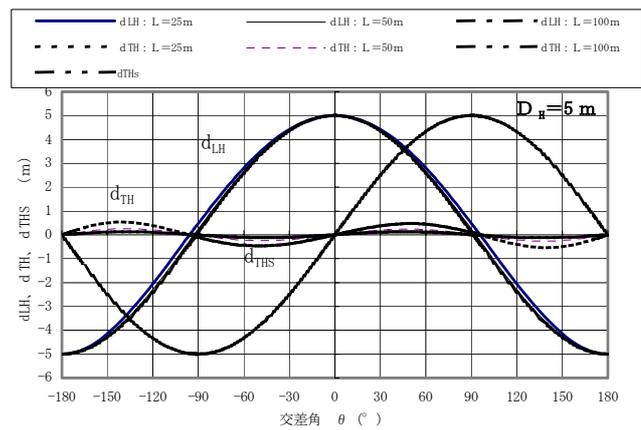


図-12 横ずれ変位による支承部の橋軸方向、橋軸直角方向および道路線形の橋軸直角方向の相対変位

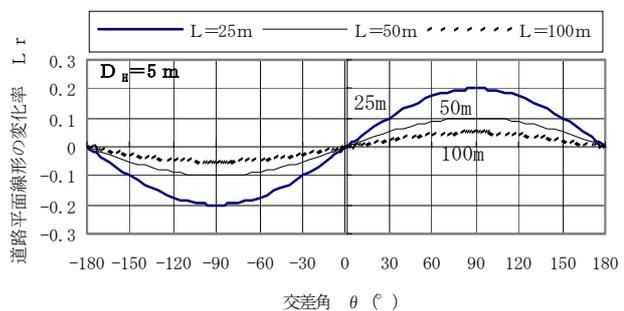


図-13 横ずれ断層による道路平面線形の橋軸直角方向の相対変位

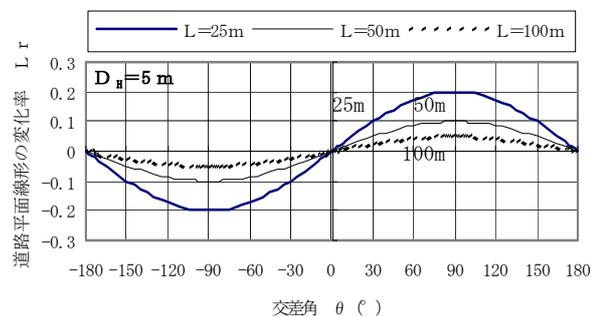


図-14 水平傾斜ずれ変位による支承部の橋軸方向の相対変位

に応じて増減する。また、 d_{VNR} は d_{LNR} と同様に相対変位は小さいが、正断層 ($0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$) と逆断層 ($-180^\circ \leq \theta \leq 0$) で傾斜角の影響が異なる。

b-3) 横ずれ変位、水平傾斜ずれ変位および合成変位の相互関係

図-15および図-16は、横ずれ変位および水平傾斜ずれ変位が同時に発生する場合について、径間長 $L=50m$ 、 $D_H=5m$ 、 $D_{NR}=5m$ 、つまり $D_0 \approx 7.07m$ の場合を例として、横ずれ変位、水平傾斜ずれ変位およびこれらの合成変位により算定される支承部の相対変位について、傾斜角 $\alpha=30^\circ$ の正断層の場合の試算結果である。図-15において、合成変位による橋軸方向の相対変位 d_L は交差角により変化し、横ずれ変位と水平傾斜変位による相対変位が相殺されたり、逆に増大して最大で7m程度に達している。また、

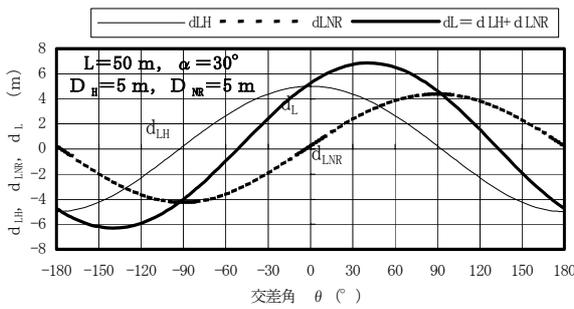


図-15 横ずれ変位および水平傾斜ずれ変位による支承部の橋軸方向の相対変位

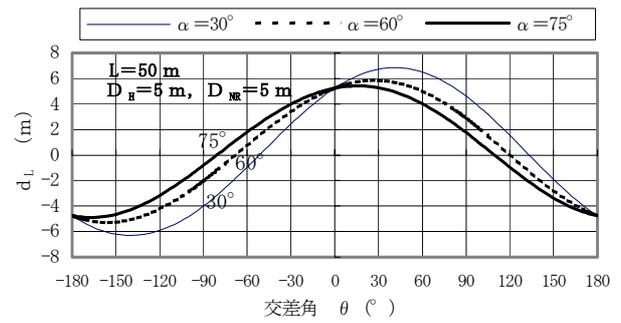


図-17 横ずれ変位および水平傾斜ずれ変位による支承部の橋軸方向の相対変位

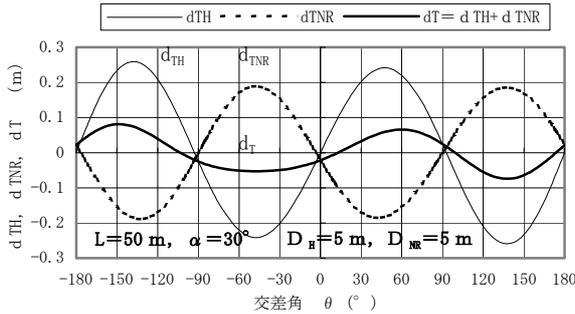


図-16 横ずれ変位および水平傾斜ずれ変位による支承部の橋軸直角方向の相対変位

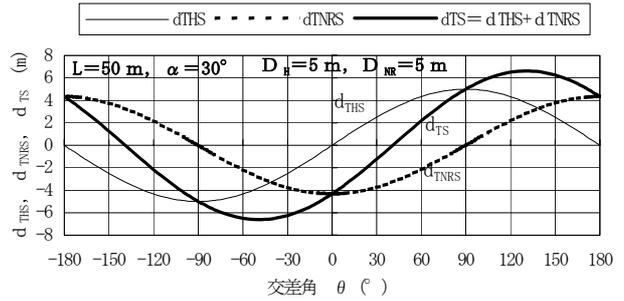


図-18 横ずれ変位および水平傾斜ずれ変位による道路の平面線形の橋軸直角方向の相対変位

図-16において、合成変位による橋軸直角方向の相対変位 d_T は、交差角全般において横ずれ変位と水平傾斜変位による相対変位が相殺して低減しており、絶対値は橋軸方向よりも1桁以上小さい。

図-17は合成変位による橋軸方向の相対変位 d_L に対する傾斜角 α の影響を示すが、傾斜角の増加に伴い、相対変位の絶対値は減少している。なお、合成変位による橋軸直角方向の相対変位 d_T は傾斜角の増加に伴い、相対変位の絶対値が増加している。

図-18は図-15と同一な条件により、横ずれ変位と水平傾斜ずれ変位および合成変位に対する道路の平面線形の橋軸直角方向の相対変位の算定結果である。同図において、合成変位による相対変位 d_{TS} は、橋軸方向の支承部の相対変位 d_L (図-15参照) と同様に、交差角により変化し、横ずれ変位と水平傾斜変位の相殺で低減したり、逆に増大したりする。

図-19は図-15および図-16における合成変位に対する支承部の橋軸方向、同橋軸直角方向および道路の平面線形の橋軸直角方向の相対変位の比較結果を示す。同図において、支承部の橋軸方向および平面線形の橋軸直角方向の相対変位の最大値は同程度であり、支承部の橋軸方向のそれよりも相当(1桁以上)大きい。また、支承部の橋軸方向および平面線形の橋軸直角方向の相対変位は、それぞれ最大値を示す交差角が90°ずれている。これは、断層対策として交差角を考える際に、支承部の橋軸方向の相対変位と道路線形(平面および縦断)の橋軸直角方向の相対変位に対する重点の置き方に関係してくる。

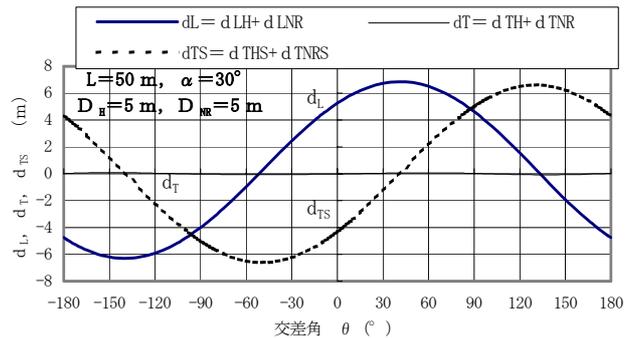


図-19 横ずれ変位および水平傾斜ずれ変位による支承部の橋軸方向、橋軸直角方向および道路の平面線形の橋軸直角方向の相対変位

b-4) モデルと実橋の関係

本文では、橋桁の構造および支承条件を簡易にモデル化した。実橋での挙動は、固定支承が剛で、可動支承側の下部工が桁の拘束を受けずに自由に動く状態(拘束状態と呼ぶ)と、本文のモデルで想定する状態(自由状態と呼ぶ)の間にあると考えられる。実橋が両状態のどこに位置するかの評価は今後の課題であるが、本文の試算では、橋軸直角方向の相対変位は自由状態に近いとかなり小さくできること等、断層対策を考える際の知見も得られている。

4. 地震断層による盛土の相対変位

地震断層により発生する盛土の変位について、本文では2.で推察した盛土本体による変位の吸収や交差角の変化は考えずに、現地盤における地震断層がそのまま盛土天端に到達すると考える。

地震断層の変位と盛土軸(=盛土の縦断方向)と

の関係については、橋梁における関係、つまり横ずれ変位の図-4、水平傾斜ずれ変位の図-5および図-6における P_2P_2 の変位が盛土の変位となるが、地震断層の影響は盛土の横断方向と鉛直方向について考える。従って、盛土では道路線形に関する相対変位が地震断層位置での相対変位と同じであるので、盛土の水平盛土軸直角方向変位 d_T および鉛直方向変位 d_V は、式(4)、式(12-1)および式(12-2)に基づいて、それぞれ式(16-1)および式(16-2)で算出する。

$$d_T = d_{TS} = d_{THS} + d_{TNRS} \quad (16-1)$$

$$d_V = d_{VS} = d_{VNRS} \quad (16-2)$$

ここに、

d_T : 盛土の水平軸直角方向の相対変位

d_V : 盛土の鉛直方向の相対変位

d_{THS} : 横ずれ変位による水平軸直角方向の相対変位($\theta' = \theta$)

$$d_{TNRS} = D_H \sin \theta' \quad (16-3)$$

d_{TNRS} : 水平傾斜ずれ変位による水平軸直角方向の相対変位

$$(\theta' = 180^\circ + \theta, \alpha' = \alpha)$$

$$d_{TNRS} = D_{NR} \cos \alpha' \cdot \cos \theta' \quad (16-4)$$

d_{VNRS} : 水平傾斜ずれ変位による水平軸直角方向の相対変位

$$(\theta' = 180^\circ + \theta, \alpha' = \alpha)$$

$$d_{VNRS} = D_{NR} \sin \alpha' \quad (16-5)$$

式(16-2)によれば、鉛直方向の相対変位は傾斜角のみに影響され、傾斜角の絶対値が大きい程、鉛直方向の相対変位は大きくなる。他方、水平軸直角方向の相対変位は図-18と同様に、交差角により変化し、横ずれ変位と水平傾斜変位による相対変位の相殺により低減したり、逆に増大したりする。

5. 結論

任意の交差角および傾斜角を持つ地震断層により、発生する橋梁(単純桁)および盛土の相対変位に関して、本研究の結果は以下のように要約できる。

1) 地震断層による橋梁(単純桁)および盛土への影響評価に際しては、橋梁では支承部および道路線形の2つの相対変位、盛土では道路線形の相対変位を包含する断層位置での相対変位を考慮することが必要である。

2) 簡易モデルにおける橋梁の支承部の相対変位は、式(13)、式(3)および式(11)により簡易推定できる。

3) 橋梁の道路線形の相対変位は、式(14)、式(4)および式(12)により簡易推定できる。

4) 盛土本体における断層特性が変わらない場合、盛土部の断層面位置における相対変位は、式(16)により簡易推定できる。

5) 橋梁の支承部の相対変位について、橋軸方向、橋軸直角方向および鉛直方向のいずれの相対変位も交差角および傾斜角の影響を受けるが、それらの影響度および相対変位の絶対値は変位方向により異なる。なお、相対変位に対する交差角および傾斜角の影響は径間長のそれよりも大きい。

6) 地震断層により橋梁位置における道路線形の相対変位について、鉛直方向の相対変位は傾斜角のみに影響され、橋軸直角方向の相対変位は交差角および傾斜角の影響を受けるが、傾斜角よりも交差角の影響が大きい。なお、径間長は相対変位の絶対値には影響しないが、相対変位の変化率に係わり、径間長が大きい程、変化率は低減する。

7) 橋梁の支承部の橋軸方向および道路線形の橋軸直角方向について、交差角による相対変位の変化特性は異なる。

8) 盛土における道路線形の相対変位を含む地震断層位置での相対変位について、鉛直方向の相対変位は傾斜角のみに影響され、盛土軸直角方向の相対変位は交差角および傾斜角の影響を受ける。

参考文献

- 1) David A. Cole, Jr. and Paul V. Lade : Influence zones in alluvium over drip-slip faults, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.110, No.5, pp.599-615, 1989.
- 2) 上田圭一, 谷 和夫 : 基盤の逆断層変位に伴う砂層の変形, 第27回土質工学研究発表会, pp.1353-1354, 1992.
- 3) 上田圭一 : 基盤の断層変位に伴う第四紀層及び地表の変形状況の検討—地震断層・活断層の現地調査—, 電力中央研究所報告, U93007, 1993.
- 4) 常田賢一 : 土木構造物における地震断層の工学的対応に関する考察, 第11回日本地震工学シンポジウム, pp.947-952, 2002.

(2003. 6. 30 受付)

SIMPLIFIED PROCEDURE TO ESTIMATE RELATIVE DISPLACEMENT OF BRIDGE AND EMBANKMENT INDUCED BY SURFACE FAULTING

Ken-ichi TOKIDA

Simplified procedures are proposed to estimate relative displacements of a single girder bridge and an embankment induced by a surface faulting with a free crossing angle and a free plane gradient. Two types of relative displacements: movement of bearing supports and change of road lineament should be considered in the case of bridges, and relative displacements at crossing line of ground surface should be considered in the case of embankments. Based on results by simulation study with use of the proposed procedure, effects by both crossing angle and gradient of the surface faulting on relative displacements occurred at bridges and embankments are clarified.