地表断層変位による 鉄道橋りょう・高架橋への影響範囲評価法の構築 _{坂井 公俊}* 田中 浩平**

Proposed Method for Calculating Extent of Bridges and Viaducts Damaged by Surface Fault Displacement

Kimitoshi SAKAI Kohei TANAKA

Near an active fault, a surface fault displacement caused by an earthquake may cause serious damage to a railway structure, but the extent of railway structures damaged by surface fault displacement is unknown. Therefore, in this study, a simple calculation method for surface fault displacement is developed taking into account the effects of sedimentary layers, and used this method to calculate the surface fault displacement by changing the magnitude of the earthquake and the distance from the fault. From these results, it became possible to easily evaluate the extent of railway structures damaged by surface fault displacement.

キーワード:地表断層変位,堆積層,橋りょう・高架橋,地震規模,断層最短距離

1. はじめに

内陸活断層のごく近傍では、断層面のずれに伴う地盤 の永久変位が発生する場合がある。代表的な例として, 1891年の濃尾地震(M8.0)では鉛直方向で約6m,水 平方向で約4mのずれが発生した¹⁾。また2016年熊本 地震では最大 2m 程度の横ずれ変位が観測され²⁾,変位 を主要因とした道路構造物の被害も発生している(図 1)。そのため鉄道構造物においてもこの影響を考慮した 上で安全性の確認を行うことが重要となるが、現在の技 術と使用可能な情報では、地震発生時の地表断層変位 の大きさや発生位置を高精度に予測することは困難であ る。また、地震規模が大きくなると、その影響範囲が広 くなることが想定されるが、鉄道構造物に影響を与える 範囲を定量的に評価した事例も存在しない。そのため鉄 道構造物の耐震設計標準³⁾においては,耐震構造計画 において検討する手順となっており、地震動に対する性 能照査の流れとは異なる取り扱いをしている。

こうした中で本研究では、鉄道構造物の耐震構造計画 において断層変位の影響を考慮する必要性を概略的に把 握するための基礎情報として、地表断層変位が鉄道構造 物に影響を与える範囲を容易に判定可能な手法を構築す ることを目的とする。具体的には、堆積層の影響を考慮 した上で地表断層変位を理論的に評価可能にするととも に、この手法を用いて地震規模と断層までの距離に応じ て想定される地表断層変位の大きさを概略的に把握可能 な表現方法の提案を行う。

* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室** 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室

2. 地表断層変位の評価手法

地表断層変位を解析的に評価する手法としては、連続 体モデルに基づく方法や粒状体モデルに基づく方法等が あるが、いずれも計算容量や計算速度、パラメータの設 定等の制約により、今回対象とするような構造物への影 響範囲を概略的に把握するための手法としては適切では ない。

そこで本検討では、次式で表される食い違い弾性論⁴⁾ に基づいて地表断層変位の解析解を求めることとする。

$$u_{i} = \frac{1}{F} \iint_{\Sigma} \Delta u_{j} \left[\lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_{i}^{n}}{\partial \xi_{n}} + \mu \left(\frac{\partial u_{i}^{j}}{\partial \xi_{k}} + \frac{\partial u_{i}^{k}}{\partial \xi_{j}} \right) \right] v_{k} d\Sigma$$
(1)

ここで、 u_i は評価地点における変位ベクトル、 Δu_j は断層面 Σ 上での変位食い違いベクトル、 v_k は断層面 Σ の法 線ベクトル、 u_i^j は断層面 Σ 上の点に置かれたj方向の力 Fによる媒質中の点における変位のi方向成分、 λ, μ は ラメ定数であり、今回は地盤各位置の P 波速度と S 波



図1 熊本地震における地表断層変位の例

(3)

速度から算定する。

上記の式(1)について、座標軸を図2のようにとった半 無限弾性地盤を考え、断層運動として横ずれ変位 U_1 、縦 ずれ変位 U_2 を与えた場合の各方向の地表断層変位 (u_x, u_y, u_z) は、次式によって算定される⁵⁾。ここで、 $ζ \ge \eta$ は、 Chinneryの表記(||)による断層面内を移動する変数である。

$$u_{x} = -\frac{U_{1}}{2\pi} \left\{ \frac{\xi q}{R(R+\eta)} + \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} + l_{1} \sin \delta \right\} \left\| -\frac{U_{2}}{2\pi} \left\{ \frac{q}{R} - l_{3} \sin \delta \cos \delta \right\} \right\|$$
$$u_{y} = -\frac{U_{1}}{2\pi} \left\{ \frac{\tilde{y}q}{R(R+\eta)} + \frac{q \cos \delta}{R+\eta} + l_{2} \sin \delta \right\} \right\|$$
$$-\frac{U_{2}}{2\pi} \left\{ \frac{\tilde{y}q}{R(R+\xi)} + \cos \delta \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} - l_{1} \sin \delta \cos \delta \right\} \right\|$$
(2)
$$u_{z} = -\frac{U_{1}}{2\pi} \left\{ \frac{\tilde{d}q}{R(R+\eta)} + \frac{q \sin \delta}{R+\eta} + l_{4} \sin \delta \right\} \right\|$$
$$-\frac{U_{2}}{2\pi} \left\{ \frac{\tilde{d}q}{R(R+\xi)} + \sin \delta \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} - l_{5} \sin \delta \cos \delta \right\} \right\|$$

$$l_{1} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[-\frac{1}{\cos \delta} \frac{\xi}{R + \tilde{d}} \right] - \frac{\sin \delta}{\cos \delta} l_{5}$$

$$l_{2} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[-\ln(R + \eta) \right] - l_{3}$$

$$l_{3} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{1}{\cos \delta} \frac{\tilde{y}}{R + \tilde{d}} - \ln(R + \eta) \right] + \frac{\sin \delta}{\cos \delta} l_{4}$$

$$l_{4} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{\cos \delta} \left[\ln(R + \tilde{d}) - \sin \delta \ln(R + \eta) \right]$$

$$l_5 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \tan^{-1} \frac{\eta \left(X + q \cos \delta \right) + X \left(R + X \right) \sin \delta}{\xi \left(R + X \right) \cos \delta}$$

 $X^{2} = \xi^{2} + q^{2}$ $R^{2} = X^{2} + \eta^{2}$ $q = y \sin \delta - d \cos \delta$ $\tilde{y} = \eta \cos \delta + q \sin \delta$ $\tilde{d} = \eta \sin \delta - q \cos \delta$ (4)

である。ただし、これは均質地盤を仮定した条件での評価となっており、例えば岩盤が露頭しているような地点において有効な手法であると考えられる。一方で、都市部の鉄道を考えた場合、比較的厚い堆積層の存在によって、上式で得られる地表断層変位とは異なる結果となることが想定される。そこで、岩盤位置の変位が与えられた場合の地表位置の変位量を算定するために、設定した堆積構造に対して伝達マトリックス⁶⁾⁷⁾により得られるグリーン関数の静的項⁸⁾を予め計算しておき、これを重ね合わせることで、堆積層の影響を含んだ地表断層変位を算定可能とした。



図2 地表断層変位を算定する際の座標等の定義

開発した手法の有効性の検証

前節で開発した手法の妥当性,有効性を確認するため に,有限要素法による解析結果と比較を行うとともに, 実地震で生じた地表断層変位の再現解析を実施する。

3.1 有限要素法による解析結果との比較

3 次元の大規模有限要素法による地表面変位と今回整 理した地表断層変位評価結果の比較を行う。試算を行っ た震源特性を表1,図3に示す。なお、計算はケース1 として地震基盤が露頭し、それ以深も同一の地盤が半無 限に広がる条件(1層地盤)、ケース2として地震基盤 以浅に10kmの堆積層を考慮した条件で実施した。

有限要素法⁹⁾ による計算は,400km×400km× 150kmの範囲を全て六面体要素によってモデル化し,約100万要素の3次元モデルを構築して行った。境界

表1 設定した震源特性

断層長さ	L(km)	20
断層幅	W(km)	10
傾斜角	$\delta(\text{deg})$	30
すべり角	$\lambda(\text{deg})$	90
走向	$\theta(\text{deg})$	90
断層深さ	d(km)	27.5
すべり量	$D_0(\mathbf{m})$	5



図3 設定した断層位置,変位を算定する測線



条件は,底面を上下方向拘束,側方は鉛直ローラーとし, 断層すべりはスプリットノード法¹⁰⁾によってモデル化 を行った。

以上の条件に基づいて,各測線の地表変位を算定して 得られた結果を図4,図5(ケース1),図6,図7(ケー ス2)に示すが,いずれも有限要素法による結果と良好 に一致していることが分かる。また、ケース1よりもケー ス2による地表面変位の値が全体的に大きくなってお り、地表断層変位を評価する際に堆積層の影響を考慮す る重要性が確認できる。この原因としては、地盤のポア ソン比が影響していることを別途確認している。提案手 法による地表断層変位評価は、グリーン関数の計算に多 少の時間を要するものの,有限要素法と比較するとモデ ル構築や計算実行に要する作業量,時間を大幅に抑える ことができるため,地表断層変位の概略的な把握を行う 際の手法として有効である。

3.2 熊本地震を対象とした地表断層変位の算定

続いて、過去に発生した大規模地震を対象として提案 手法による地表断層変位の評価を実施することで、有効 性の検証を行う。対象とした地震は、2016年4月14日の 熊本地震前震とする。この地震については、得られた観 測データをもとに、震源特性の評価が試みられている¹¹⁾。 本検討ではこれらの結果をもとに、表2に示すような震 源特性を設定し、構築した手法によって地表断層変位を 算定した。またこの時の堆積層物性値は、対象地域全域 の深部地盤構造¹²⁾をもとに設定した。

最終的に得られた結果を図8に示すが、断層北西部が数 cm 隆起する一方で、断層南西部が数 cm 沈降している。この結果は、だいち2号の PALSAR-2による観測データから得られた知見²⁾と良好に一致しており、今回構築した手法によって地表断層変位の分布を概略的に把握可能であることを確認した。

4. 各種条件を変化させた地表断層変位の評価

これまでの検討により,堆積層の存在を適切に考慮し た地表断層変位分布を適切かつ有限要素法と比較して少 ない計算量で評価可能となった。そこで本章では,予め 多数の震源特性,地点特性を有する条件において地表断 層変位の評価を行う。地表断層変位を評価する際の条件 を以下に示す。

- ・地震規模: Mw6.5~8.0 まで 0.1 刻みで設定
- ・堆積層厚さ:0km,3km,10kmの3パターン
- ・断層上面深さ:0~20kmの範囲で14パターン(ただし,断層面は堆積層よりも深い位置にのみ存在する)
- ・傾斜角:45度,90度
- ・すべり角:0度,45度,90度
- ・評価位置: 断層上面から断層最短距離 60km までの 範囲で網羅的に配置

ここで,各地震規模の断層面積や幅,長さ,すべり量 等の震源パラメータは,強震動予測レシピ¹³⁾に基づい て標準的な値を設定している。また本検討では概略的な 地表変位の分布を把握することが目的であるため,断層 すべりの不均質性は考慮せず,全て一様すべりとして計 算を行っている。また,堆積層を考慮する際の地盤条件 は,全国各地の地表面~地震基盤までの速度構造の比較 を行い,全国の概ね平均的な傾向を示していた地点の速

表2 設定した熊本地震の震源特性

起点経度 (deg)	130.807
起点緯度 (deg)	32.790
上端深さ <i>d</i> (km)	2.0
長さ <i>L</i> (km)	13.9
幅 W(km)	5.9
傾斜角 $\delta(\deg)$	75
すべり角 $\lambda(deg)$	-178
走向 $\theta(deg)$	203
すべり量 <i>D</i> ₀ (m)	1.04
地震モーメント $M_0(Nm)$	2.56×10^{18}
地震規模 Mw	6.2



度構造を固定し,設定した堆積層厚さになるように一定 数倍して設定した。

以上の条件に基づいて各ケースでの地表断層変位を算 定した。得られた結果の例として,断層面を中心とした 地表断層変位(三成分合成)の分布を図9に示す。当然 ではあるが,断層が深くなると距離が離れるために地表 断層変位が小さくなること,仮に断層からの最短距離が 同一であっても,断層面との位置関係(上盤側,下盤側 など)によって地表面変位が大きく異なっていること等 が確認できる。

続いて,堆積層の存在が地表断層変位の大きさに与え る影響を把握するために,図9(a)の条件(M7.0,断層 上端深さ10km)において堆積層厚さを変更した場合の 地表断層変位を断層からの距離に対してプロットした結 果を図10に示す。この結果から,逆断層の場合に鉛直 方向の変位に堆積層が与える影響は小さいこと,横ずれ 断層における水平方向の変位に対しては,堆積層が厚い ほど大きな変位となることが確認された。そのため,従 来の堆積層の影響を無視した評価を行った場合,特に横 ずれ断層を対象とした状況では危険側の評価になる可能 性があると言える。



5. 地表断層変位の影響範囲の概略評価マップ の構築

今回開発した手法を用いることで,対象とする震源域 と地点の位置関係や地震規模,破壊メカニズムから地表 断層変位の大きさを算定することが可能である。しかし ながら,これを個別地点毎に実施することは実務的には 困難であるため,より簡易な指標のみから地表断層変位 の大きさを概略的に把握できることが望ましい。そこで 本節では,地震規模や断層深さ,傾斜角,すべり角,計 算実施地点を網羅的に変化させて実施した地表断層変位 量の算定結果から,地震規模毎にある一定変位となる範 囲を整理することとした。

一例として,地表断層変位が 50cm, 100cm となる地

震規模と断層最短距離の関係を全て抽出したものを図 11に示す。前節の結果からも分かるように,仮に地震 規模が同一であっても破壊メカニズムや震源深さ,地盤 条件,震源との位置関係によって同一変位となる距離は 大きく変動する。一例として,断層の傾斜角の変化を指 標として整理した結果を図 12に示すが,傾斜角が 90 度 の方が同一変位になる距離が近い(相対的に地表断層変 位が小さい)ことが確認できる。そのためこれらの条件 を特定することで,より個別事象に近い条件での変位量 を抽出することを目的として,これらの条件を区分 せずに地表最大変位の最大値を抽出して表示することと した。最終的に得られた結果を図 13 に示す。当然なが ら地震規模が大きくなるほど,同一距離において想定さ



図 12 断層傾斜角の違いによる距離の変化 (変位 50cm の結果)



図13 地表面の最大変位算定結果の例



図14 地表面の傾斜角算定結果の例

れる地表断層変位は大きくなっている。この図を用いる ことで,対象地点近傍の震源域が特定できた場合に,対 象とする地震の地震規模と対象地点までの距離のみを用 いて想定される地表断層変位量の最大値を概略的に評 価可能となる。また,これをより簡易に表現するための 方法として,活断層データベースと本結果を組み合わせ て地図上に想定される地表断層変位の大きさをプロット する方法や,地表断層変位の大きさではなく,地表面の 傾斜角を指標として同様の表現をすることも考えられる (図14)。このような結果を用いることで,地点毎に想 定される地表断層変位量や構造物への影響程度の大小を 比較的容易に把握可能である。

6. まとめ

本検討では,地表断層変位が鉄道構造物に影響を与え る範囲を概略的に評価可能な手法を構築した。具体的に は,堆積層の影響を考慮した上で地表断層変位を理論的 に評価可能とするとともに,この手法を用いて地震規模 と評価地点,各種条件を網羅的に変化させた地表断層変 位の評価を行った。さらに,断層までの距離に対して想 定される地表断層変位の大きさを概略的に把握可能な表 現を試みた。この結果を用いることで,対象地点におい て地表断層変位の影響の大きさを概略的に把握可能とな り,鉄道構造物の建設時にこの影響を考慮する必要性を 比較的容易に把握可能となる。

文 献

- Koto, B.: On the cause of the great earthquake in Central Japan 1891, J. Coll. Sci. Imp. Univ. Japan., Vol.5, pp.295-353, 1893.
- 上芝晴香,三浦優司,宮原伐折羅,仲井博之,本田昌樹, 撹上泰亮,山下達也,矢来博司,小林知勝,森下遊:だい ち2号 SAR 干渉解析による熊本地震に伴う地殻変動の検 出,国土地理院時報, Vol.128, pp.139-146, 2016
- 3)(公財)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),2012
- 4) Stekette, J.A.: On Volterra's dislocation in a semi-infinite elastic medium, *Can. J. Phys.*, Vol.36, pp.192-205, 1958.
- Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.75, pp.1135– 1154, 1985.
- Thomson, W. T.: Transmission of elastic waves through a stratified solid medium, *J. Appl. Phys.*, Vol.21, pp.89–93, 1950.
- Haskell, N. A.: The dispersion of surface waves on multilayered media, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.43, pp.17-34, 1953.
- Wang, R.: A simple orthonormalization method for stable and efficient computation of Green's functions, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.89, pp.733-741, 1999.
- 9) 董勤喜,柴山恭,吉見顕一郎,坂井公俊,田中浩平,室野剛隆: 減衰の設定方法が長周期地震動評価に与える影響,土木学 会第69回年次学術講演会,2014
- Melosh, H. J., and Raefsky, A.: A simple and efficient method for introducing faults into finite element computations, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.71, pp.1391-1400, 1981.
- 防災科学技術研究所: PALSAR-2/InSAR による平成28 年(2016年)熊本地震に伴う地殻変動(第1報), http:// www.hinet.bosai.go.jp/topics/nw-kumamoto160414/?LANG= ja&m=palsar,(参照日:2019年2月14日)
- 12)藤原広行,河合伸一,青井真,森川信之,先名重樹,工藤 暢章,大井昌弘,はお憲生,早川譲,遠山信彦,松山尚典, 岩本鋼司,鈴木晴彦,劉瑛:強震動評価のための全国深部 地盤構造モデル作成手法の検討,防災科学技術研究所研究 資料,第337号,2009
- 13) 地震調査研究推進本部地震調査委員会:震源断層を特定した地震動の強震動予測手法(「レシピ」),平成28年(2016年)6月(12月修正版),2016