

横ずれ断層による線状土木構造物の損傷を緩和するための 地盤改良工法の梁ばねモデルを用いた設計方法の検討

Study on Design Calculation Method Using Beam Model with Winkler's Spring for Ground Improvement Method to Mitigate Strike-slip Fault Rupture Hazard on Linear Infrastructure

新垣裕一郎*・高橋秀明**・谷 和夫***

Yuichiro ARAKAKI, Hideaki TAKAHASHI and Kazuo TANI

A ground improvement method of multi-layer structure using EPS was proposed to mitigate fault rupture hazard, and model experiments of double-layer structure (beam and absorption layers) were carried out. In this study, a beam model with Winkler's spring is proposed as a design calculation method. The experimental results are successfully simulated verifying the proposed model. In the end, discussion is made on some important design parameters to evaluate performance of the improved ground.

Key Words: fault rupture hazard, ground improvement, beam model, design

1. はじめに

わが国には多くの活断層が分布しており、活断層上に立地した構造物は、地震時の断層変位により大きな被害を受ける可能性がある。活断層を極力避けて構造物の立地すべきであるが、道路や鉄道など線状の土木構造物は活断層を横断せざるを得ない場合がある。このような場合に断層変位による構造物の損傷を緩和する方策の 1 つとして、表層地盤の座布団効果を利用した地盤改良工法（平滑化層、吸収層、分散層の三層構造）を提案した¹⁾。さらに、吸収層に用いる発泡スチロール（以下、EPS と称す）の材料特性や改良地盤（平滑化層と吸収層の二層構造）の実現可能性を実験的に検討した^{2,3)}。しかし、改良地盤の設計計算モデルを確立するには至らなかった。

そこで本研究では、横ずれ断層に対して二層構造の改良地盤の設計計算モデルを提案し、模型実験の結果²⁾を対象にその有効性を検討した。さらに、実地盤への適用を想定して、改良地盤の挙動を支配する重要な設計パラメータ、改良地盤の性能を評価するための項目、さらに今後の課題を議論する。

2. 横ずれ断層に対する改良地盤（二層構造）の設計計算モデルの提案

(1) 応答変位法（荷重分布法）による設計計算モデル

横ずれ断層に対する二層構造の改良地盤を図-1 に示す。剛な平滑化層の曲げ剛性により軟らかい吸収層が圧縮して不連続な断層変位を吸収するメカニズムである。その結果、平滑化層と一体化させた構造物は、連続的で緩やかな曲げ変形のみを受けるようになり、壊滅的な損傷を免れることが期待される。この平滑化層が受ける曲げ変形が、水平力を受ける杭の応答変位と類似していることに注目し、図-2 に示すように平滑化層をばねに支えられた梁としてモデル化した。さらに、地震時の断層変位 y_g を耐震設計で用いられる地盤の応答変位とみなし

* 学生会員	横浜国立大学 工学部 建設学科 シビルエンジニアリングコース
** 正会員	修士（工学） 東電設計株式会社 第二土木本部
***	Ph.D. 横浜国立大学大学院 工学研究院

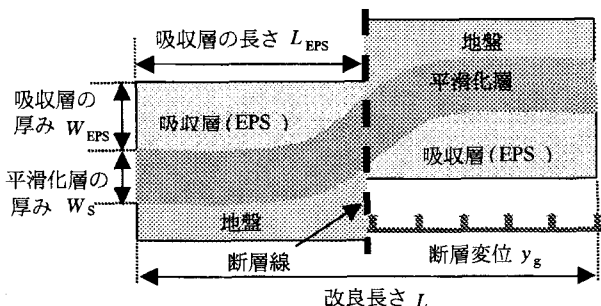


図-1 改良地盤（平面図、変形後）

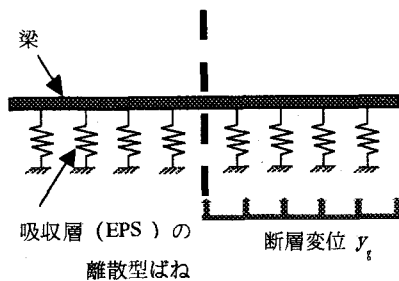


図-2 設計計算モデル（平面図、変形前）

て、式-1&2 に示す応答変位法（または荷重分布法）の計算手法を採用した^{4,5)}。平滑化層に作用する地盤反力は、EPS の力学特性を考慮した離散型ばね（Winkler ばね）でモデル化した。

$$\text{応答変位法: } E_s I_s \frac{dy^4}{dx^4} + k_{\text{EPS}} \cdot W_s \cdot (y - y_g) = 0 \quad \text{式-1}$$

$$\text{荷重分布法: } E_s I_s \frac{dy^4}{dx^4} + k_{\text{EPS}} \cdot W_s \cdot y = k_{\text{EPS}} \cdot W_s \cdot y_g \quad \text{式-2}$$

ただし、 x は断層線と直交する方向の座標、 y は平滑化層の曲げ変位、 y_g は断層変位、 $E_s I_s$ は平滑化層の曲げ剛性、 W_s は平滑化層の厚さ、 k_{EPS} は地盤反力係数（離散型ばねの剛性）を表す。

(2) 地盤反力係数のモデル化

EPS はポアソン比がほぼゼロであるため、軸圧縮に対して側方向の影響を受けにくい。よって地盤反力係数（離散型ばねの剛性） k_{EPS} は、EPS のヤング率 E_{EPS} と厚さ W_{EPS} より式-3 で与えられる。

$$k_{\text{EPS}} = E_{\text{EPS}} / W_{\text{EPS}} \quad \text{式-3}$$

また、図-3 に示す EPS の一軸圧縮試験より得られた応力～ひずみ関係において³⁾、非線形性を考慮しないモノリニア型と考慮するトリリニア型の 2 つのモデルを採用した。EPS のヤング率 E_{EPS} は、弾性変形域、残留圧縮域、残留硬化域に対応して、それぞれ E_e 、 E_{rc} 、 E_{rh} で表される。

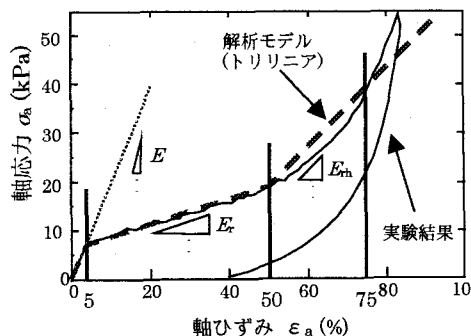


図-3 EPS の一軸圧縮試験の結果³⁾

3. 模型実験を対象とした解析

(1) 模型実験と解析モデル

図-4 に横ずれ断層の模型実験の概要を示す²⁾。改良地盤の平滑化層と圧縮層を鉄板（軟鋼 SS400、長さ $L_s=2340\text{mm}$ 、高さ $H_s=200\text{mm}$ ）と EPS（高さ $H_{\text{EPS}}=200\text{mm}$ ）でモデル化し、図-1 の地盤部分は地盤反力が小さいことから無視した。鉄板端部の境界条件は、断層線に平行な方向（ y 方向）の変位と回転は固定し、断層線に直交する方向（ x 方向）の変位を自由と固定の 2 パターンに設定し、断層変位 y_g は剛体が移動する形で与えた。

この模型実験に対する解析モデルを図-5 に示す。図-2 と同様に、鉄板を梁で、地盤反力は EPS の力学特性を考慮した離散型ばねでモデル化した。境界条件の設定において、 x 方向の変位自由の条件を設定することができないので、ヒンジ（回転自由）と埋め込み（回転拘束）の 2 条件に設定した。また、EPS の重なり幅 B_{EPS} の影響は相対的に小さいので無視した。

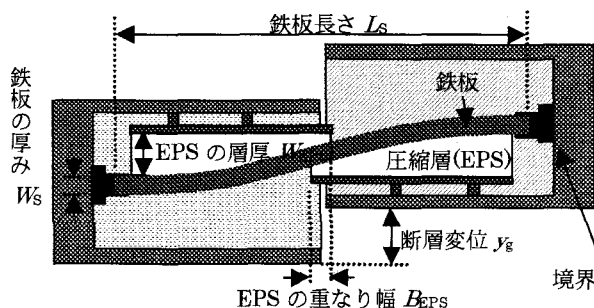


図-4 模型実験の概要 (平面図) ²⁾

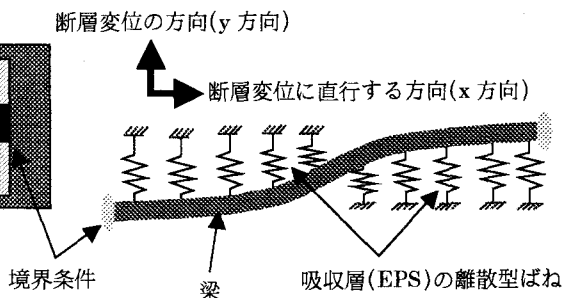


図-5 解析モデル (平面図)

(2) 解析の検討項目と解析対象とする模型実験ケース

解析対象とする模型実験ケースを表-1に示す。実験ケース3を基本ケースと位置づけて、以下に示す項目について検討した。なお、平滑化層の変形モードの判定には特性値 $\beta=(kW_s/4E_sI_s)^{1/4}$ を用いた。

- ① 地盤反力のモデル化 (モノリニア型とトリリニア型) . . . 実験ケース3
- ② 平滑化層 (鉄板) の厚さの影響 . . . 実験ケース1、3
- ③ 吸収層 (EPS) の厚さの影響 . . . 実験ケース2、3
- ④ 境界条件の影響 . . . 実験ケース4、5
- ⑤ 回転角と断面力 (曲げモーメント) . . . 実験ケース3

4. 模型実験の解析結果

実験結果と解析結果の比較は、断層変位量 $y_g=100\text{mm}$ の条件で行った。模型実験においては、平滑化層 (鉄板) の変位は写真から、回転角と断面力 (曲げモーメント) はひずみゲージの計測データから算定した。

(1) 地盤反力のモデル化 (図-6)

EPSの応力へひずみ関係の非線形性の影響について、①弾性変形域のヤング率 E_s を用いたモノリニアモデル、②残留圧縮域のヤング率 E_{rc} を用いたモノリニアモデル、③非線形性を考慮したトリリニアモデル (図-3) の3種類を比較した。平滑化層 (鉄板) の曲げ変形を比較した結果、①は地盤反力係数を過大に評価しているので曲げ変形が大きく、②は地盤反力係数を過小に評価しているので曲げ変形が小さく計算された。③のトリリニアモデルが実験結果と最も一致度が高かったので、以後の解析では、全て③のトリリニアモデルを用いることとした。

(2) 平滑化層 (鉄板) の厚さの影響 (図-7)

平滑化層 (鉄板) が厚いケース1 ($W_s=19.0\text{mm}$) は、薄いケース3 ($W_s=6.0\text{mm}$) より特性値 β が半分以下であることを反映して、平滑化層の最大曲げ変位量も断層線上の回転量も小さく、断層変位を有効に緩和している。

解析結果と実験結

果を比較すると、平滑化層 (鉄板) が厚いケース1は、解析の境界条件がヒンジでも埋め込みでも実験結果とほぼ一致している。しかし、平

表-1 解析対象の模型実験

実験 ケース	鉄板の厚さ W_s (mm)	EPS の厚さ W_{EPS} (mm)	EPS の重なり幅 B_{EPS} (mm)	特性値 β (1/m)	境界条件		
					y 方向	x 方向	回転
1	19.0	191	300	2.13	固定	自由	固定
2	6.0	297		4.54			
3		197		5.03			
4	3.2	198	0	8.05		固定	
5		198					

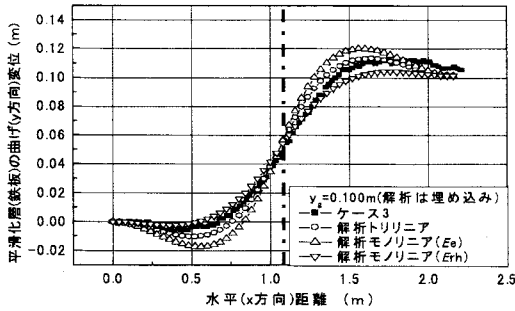


図-6 地盤反力のモデル化の検討

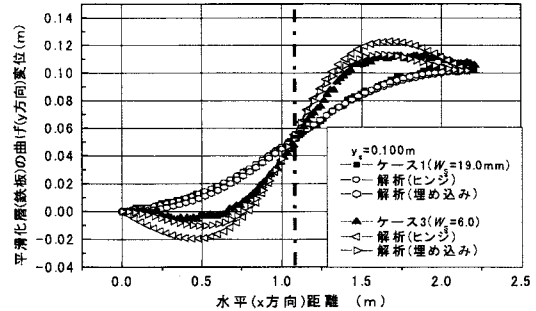


図-7 平滑化層（鉄板）の厚さの影響の検討

平滑化層（鉄板）が薄いケース3は、解析で境界条件をヒンジとした方が埋め込みとした場合より最大の曲げ変位量が大きく計算された。これはケース3の特性値が大きく、曲げ変形の影響が強く、境界条件の影響が無視できなくなるためと考えられる。実験条件が理想的には回転固定の条件であるため、解析では埋め込みの境界条件の方が実験結果と近くなった。

(3) 吸収層（EPS）の厚みの影響（図-8）

吸収層（EPS）が厚いケース2（ $W_{EPS}=297\text{mm}$ ）とケース3（ $W_{EPS}=197\text{mm}$ ）の特性値 β に1割以下の差しかないため、平滑化層の曲げ変形は大きな差は見られなかった。しかし、やはり W_{EPS} が小さく特性値 β が大きいケース3の方が、ケース2に比べて最大曲げ変位量や断層線上の回転量がわずかに大きい。

(4) 境界条件の影響（図-9）

特性値 β が同じ条件で、平滑化層（鉄板）の端部の境界条件が平滑化層の曲げ変形に与える影響を検討した。模型実験では、 x 方向に固定にした（埋め込んだ）ケース5は、平滑化層の延長が伸びないために引張りの軸力が変形を拘束し、最大曲げ変位量は断層変位量と等しい。一方、 x 方向に自由にスライドするケース4は、S字の曲げ変形が生じて、断層変位量の5割増の最大曲げ変位量が生じた。

解析では梁モデルを用いているため、 x 方向の引張り力（軸力）が曲げ変形に与える作用を評価できないので、軸力が発生するケース5の実験結果とは大きく乖離している。しかし、軸力が発生しないケース4の実験結果との一致度は比較的に高い。よって、大きな軸力が発生する場合には、曲げ変形問題を対象とする梁モデルの適用性は低いと言える。

(5) 回転角と断面力（曲げモーメント）（図-10&11）

基本ケース3について、平滑化層（鉄板）の回転角と曲げモーメントを解析結果と比較した。模型実験におけ

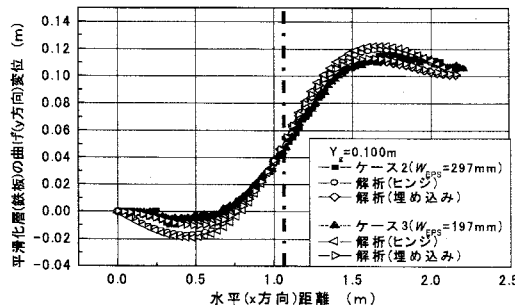


図-8 吸収層（EPS）の厚みの影響の検討

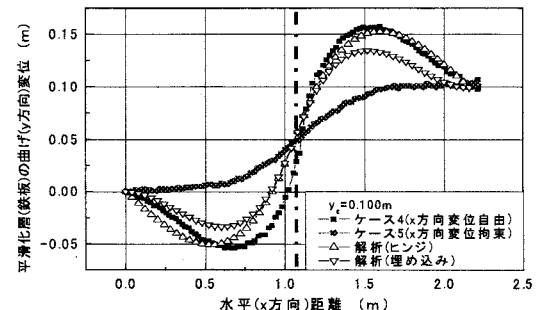


図-9 境界条件の影響の検討

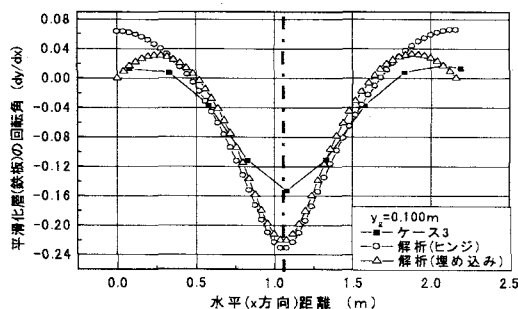


図-10 平滑化層の回転角の検討

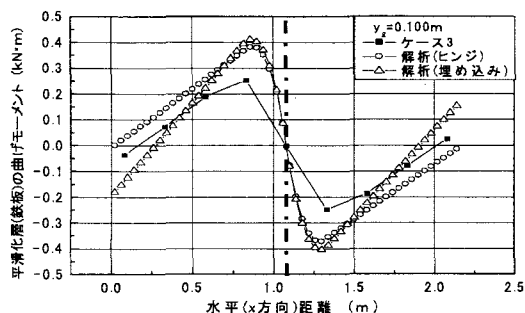


図-11 平滑化層の曲げモーメントの検討

る境界条件は理想的には回転固定であるが、端点の回転角も曲げモーメントもゼロに近い値である。すなわち、回転角については解析の埋め込み条件に近く、曲げモーメントについては解析のヒンジ条件に近い。また解析の結果は、実験の結果よりも変化の幅（最大値と最小値の差）が大きい。この原因としては、実験では平滑化層（鉄板）の端部が x 方向に多少拘束されていた可能性があることや、EPSの重なり幅の影響があることなどが考えられる。しかし、回転角の最小値や、曲げモーメントの極値が出現する位置に関する実験と解析の一致度は高く、曲げ変形を支配的な変形モードと考える梁モデルの適用性は高いと言える。

(6) 模型実験を対象とした解析結果に関する考察のまとめ

模型実験において平滑化層（鉄板）の端部で x 方向の変位を自由とした場合について、以下の結論が得られた。

- ① 地盤反力を表す離散型ばねとして、図-3に示す吸収層（EPS）の力学特性を考慮して、トリリニアモデルが適切である。
- ② 平滑化層（鉄板）や吸収層（EPS）の厚みなどは特性値 β に反映され、平滑化層（鉄板）の曲げ変形に影響を及ぼす。特性値 β が小さいほど、最大曲げ変位量も断層線上の回転角は小さくなる。
- ③ 模型実験で採用した平滑化層（鉄板）の端部の回転固定で x 方向の変位自由とする境界条件は、解析におけるヒンジと埋め込みの中間の条件に相当すると考えられる。
- ④ 平滑化層（鉄板）の曲げ変形をモデル化した梁モデルにより、平滑化層（鉄板）の曲げ変位、回転角および曲げモーメントのモードが適切に計算できることが分かった。

一方、平滑化層（鉄板）の端部で x 方向の変位を固定の場合について、以下の結論が得られた。

- ① 微小変形理論に基づく梁モデルの限界があり、平滑化層（鉄板）に作用する軸力の影響が無視できない場合には、本解析方法の適用性は低い。

模型実験の結果より、平滑化層の端部において軸方向（ x 方向）の変位を拘束すると効果的に断層変形を緩和できることが示唆された。しかし、実構造物において、軸方向の変位を完全に固定するように施工することは難しく、また平滑化層に過大な軸力が生じて破断する問題にも留意する必要がある。したがって、軸方向を拘束する条件は現実的ではなく、現実の問題には提案する梁モデルによる解析で充分に対応できると結論できる。断層問題に支配的な項目の影響を反映することができる本解析方法は有効であると考えられる。

5. 施工を想定した解析と今後の課題

(1) 改良地盤の挙動を支配する重要な設計パラメータ

分散層を省略した二層構造（平滑化層と吸収層）の改良地盤の施工を想定した解析を行う際に、平滑化層の曲げ変形に支配的な設計パラメータを、梁の曲げ変形が特性値 β と梁の長さに支配されることを考慮して以下のよう

- ① 吸収層：密度 ρ_{EPS} 、厚さ W_{EPS} 、長さ L_{EPS}
- ② 平滑化層：厚さ W_s 、曲げ剛性： EJ_s
- ③ 改良範囲：長さ L (L_{EPS} とも関連する)
- ④ 断層：断層変位 y_g

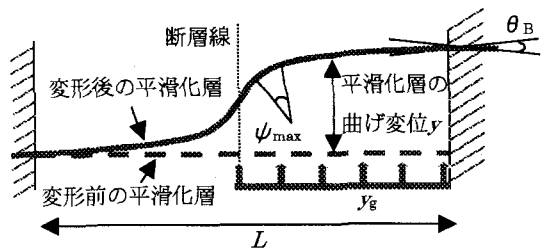


図-12 平滑化層の変形（平面図）

(2) 改良地盤の性能を評価する項目

設計計算の結果を元に、改良地盤の性能（対象となる構造物を壊滅的な損傷から守る能力）を評価する項目について検討した⁴⁾。以下に評価項目を示す（図-12を参照）。

① 平滑化層の最大曲率 ψ_{max}

改良工法の対象とする構造物（線路や道路など）が壊滅的な被害を受けないように、構造物と一体となった平滑化層の変形後の最大曲率、すなわち梁の曲げモーメントを許容値以下に収めて安全性を確保する必要がある。

② 改良範囲と未改良範囲の境界部の折れ角 θ_B

境界部における改良範囲の平滑化層の接線と未改良範囲の平滑化層の接線との交差角 θ_B は、改良範囲と未改良範囲の境界部の食い違い量を代表しており、許容値以下に収めて安全性を確保する必要がある。

(3) 今後の課題

- ① 平滑化層の非線形性：大変形問題であるため平滑化層の性能にも留意しなければならない。現実の改良工法において平滑化層は鉄筋コンクリートスラブであろう。スラブの降伏や破壊などを考慮して曲げモーメントと曲率の非線形性を適切にモデル化する必要がある。
- ② 吸収層（EPS）の形状と寸法：本研究では、吸収層（EPS）の形状を四角形として平滑化層に隣接して設置した。しかし、断層線から離れるにつれてEPSの圧縮量は減るため、断層近くを厚くする三角形に設置する方が経済的であろう。またEPSは、ブロックを千鳥状に敷き詰める施工方法が一般的であるので、継ぎ目に変形モードに影響して寸法効果が問題となることも懸念される。
- ③ 分散層の効果：断層の周辺地盤が岩盤で硬い場合、断層変位によるせん断をEPSに直接伝えるのではなく、砂礫や土壌などから構成される分散層を介する三層構造が有効であると考えられる。この分散層の効果の検証や設計の考え方の検討は行われていない。
- ④ 断層の種類と構造物の位置関係：縦ずれ断層や斜めずれ断層の場合や、構造物と断層線が直交せずに斜めに交差する場合なども未検討である。
- ⑤ 実構造物を対象とした設計例：断層変位の緩和に最も効果的な設計パラメータの組み合わせや、実構造物の具体的な設計例を示し、施工可能性も考慮して実用的な設計基準を提案する必要がある。

参考文献

- 1) 谷 和夫：岩盤の表面ないし内部に立地する構造物を地表地震断層から守るために地盤を改良する工法の提案、第32回岩盤力学に関するシンポジウム、pp.101-106、2003。
- 2) 宮坂 淳、谷 和夫、金谷 守：EPS を利用した横ずれ断層による地盤変形を緩和する地盤改良工法に関する模型実験、第38回地盤工学研究発表会、pp.2177-2178、2003。
- 3) 東海林寛、谷 和夫、金谷 守：EPS を利用した縦ずれ断層による地盤変形を緩和する地盤改良工法に関する模型実験、第38回地盤工学研究発表会、pp.2180-2181、2003。
- 4) 甲斐信三：地盤変位を考慮した杭の耐震設計、基礎工、2月号、2002。
- 5) 横山幸満：くい構造物の計算法と計算例、山海堂、1977。
- 6) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計基準・同解説 耐震設計、1999。