

断層変位を受ける地盤－構造物の相互作用解明のための 解析的検討

小野寺 周¹・坂井 公俊²・豊岡 亮洋³

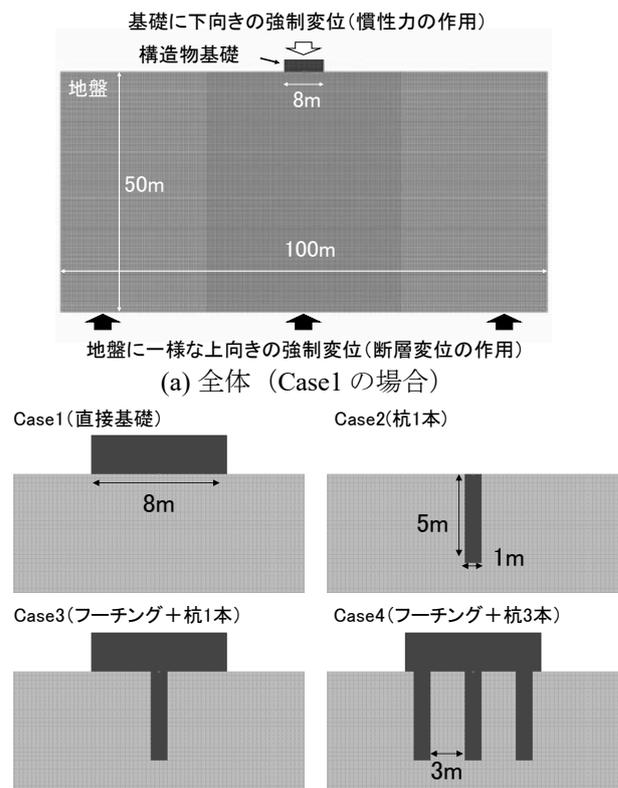
- ¹正会員 修（工） （公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）
²正会員 博（工） （公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）
³正会員 博（工） （公財）鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター
（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

1. はじめに

活断層との交差が避けられない位置において構造物を設計する場合には、地震作用として通常の耐震設計で考慮する慣性力の影響だけでなく、断層変位の影響も考慮する必要がある。例えば鉄道の設計標準¹⁾では、活断層を跨ぐ場合は落橋等の甚大な被害を回避するよう設計することが求められている。しかしながら、こうした断層変位の影響は構造計画上の配慮事項に留まっており¹⁾、具体的な構造設計や対策の決定は容易ではない。この要因の一つとして、断層変位の作用方法や地盤－構造物の相互作用のモデル化方法等を含め、断層変位の影響を受ける構造物の応答評価法が十分確立されていないことが考えられる。

ここで、断層変位の影響を考慮した構造物の応答評価事例として個別要素法、有限要素法、質点系モデルによる解析等、各種手法を用いた検討^{2)~5)}がなされているが、断層変位を受ける地盤と構造物間の相互作用は十分解明されておらず、そのモデル化方法には任意性がある。例えば、質点系モデルにおいては既往検討^{2)~4)}のように相互作用ばねを線形でモデル化した上で、断層変位をばね節点に作用させる方法もあるが、この場合、構造物の応答を過大評価する可能性もある。

そこで本検討では、断層変位を受ける地盤－構造物の相互作用の解明を目的とした解析的検討を行った。具体的には、縦ずれ断層変位を受ける構造物を想定し、地盤－構造物基礎からなる2次元FEMモデ



(b) 基礎部分拡大
図-1 解析モデル

ルを構築し、慣性力と断層変位それぞれの作用を模擬した静的非線形解析を実施し、各作用条件における地盤－構造物の相互作用を比較した。さらに解析結果に基づき、断層変位を受ける構造物の応答評価に用いる相互作用ばねの特性について提案した。

2. 検討条件

(1) 解析モデル

深さ50m、幅100mの様な表層地盤上に、形式の異なる基礎を設置した4ケースの2次元FEMモデル (Case1~Case4) を構築した。図-1に解析モデルの全体図および基礎部分の拡大図を示す。図-1(b)より、Case1は直接基礎形式、Case2は杭が1本だけ設置された状態、Case3, 4はフーチングに杭が1本もしくは3本結合した杭基礎形式である。

地盤と基礎はいずれも平面ひずみ要素でモデル化した。地盤要素のメッシュサイズは地盤の応力状態が適切に表現できる程度に細分化することとし、基礎中心から左右20mの領域は0.25m×0.25m、その他の領域は0.50m×0.25mとした。また、地盤と基礎は剛結させ、地盤-基礎間で常に荷重を伝達する条件とした。

地盤および基礎の物性値を表-1に示す。地盤はせん断波速度200m/s、N値8相当の様な粘性土層を想定し、これらの条件からせん断弾性係数および粘着力を決定した。また、非線形特性としてMohr-Coulombの降伏条件を設定した。一方、基礎は地盤に対して十分剛とみなせる物性値を設定した。

(2) 解析条件

構築した4つのモデルに対して、境界条件が異なる2種類の解析ケース (Case*-A, Case*-B) を設定した。“*”は図-1(b)に示す基礎形式ごとの番号1~4に対応する。各ケースの境界条件を表-2に示す。Case*-Aでは基礎天端に鉛直下向きの強制変位を作用させることで、上部工からの慣性力による基礎の鉛直変位に対して地盤が抵抗する状態を模擬している (図-1(a)下矢印の作用方向)。一方、Case*-Bでは地盤底面に一様に鉛直上向きの強制変位を作用させることで、縦ずれ断層変位に対して基礎が抵抗する状態を模擬している (図-1(a)上矢印の作用方向)。なお、Case*-Aでは地盤底面の鉛直変位を、Case*-Bでは基礎の鉛直変位を固定条件とし、地盤側面の水平変位は両ケースで固定条件とした。

これらの解析により、前者では慣性力を受けた場合の地盤-構造物の相互作用、後者では断層変位を受けた場合の相互作用を評価する。なお、強制変位量は0.5mとし、これを100ステップに分割して静的に作用させた。

表-1 解析モデルの物性値

地盤	要素タイプ	平面ひずみ
	ポアソン比	0.3
	せん断弾性係数(kN/m ²)	1.70×10 ⁵
	粘着力(kN/m ²)	50
	内部摩擦角(deg)	0
	膨張角(deg)	0
	降伏条件	Mohr-Coulomb
メッシュサイズ(m)	0.25×0.25, 0.50×0.25	
基礎	要素タイプ	平面ひずみ
	ヤング率(kN/m ²)	2.0×10 ⁹
	ポアソン比	0.2
メッシュサイズ(m)	0.25×0.25	

表-2 境界条件

ケース	Case*-A (慣性力の作用)	Case*-B (断層変位の作用)
基礎 (天端)	鉛直下向きに0.5mの強制変位	鉛直変位を固定
地盤 (底面)	鉛直変位を固定	鉛直上向きに0.5mの強制変位
地盤 (側面)	水平変位を固定	水平変位を固定

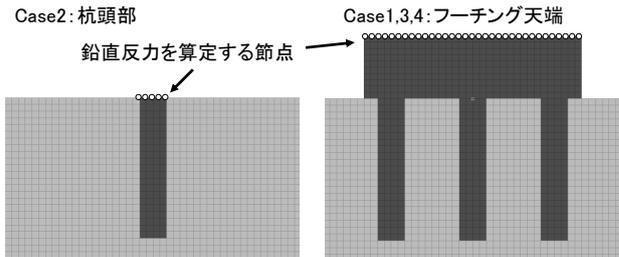


図-2 鉛直反力の算定点

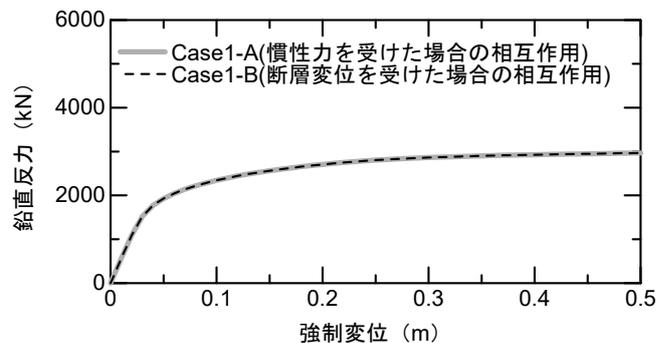


図-3 鉛直反力-強制変位の関係 (Case1)

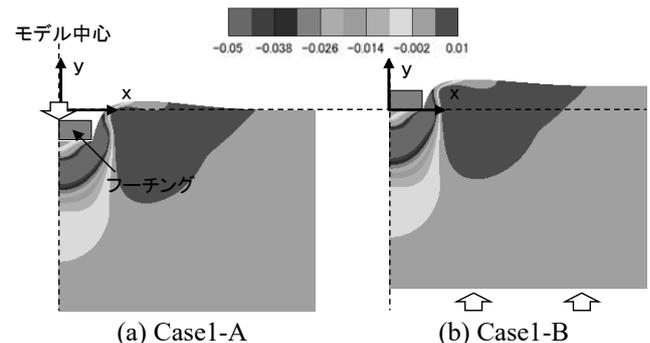


図-4 鉛直ひずみ分布 (Case1, 0.50m 荷荷時)

3. 断層変位を受ける構造物の相互作用

(1) 直接基礎形式の場合

直接基礎形式のCase1を対象として、作用条件の異なる解析ケース (Case1-A, Case1-B) で生じる相互作用を比較する。ここで、相互作用の評価方法として、地盤と基礎間に生じる鉛直反力と強制変位量の関係を整理することとした。鉛直反力は図-2に示すように、強制変位の作用点もしくは固定点となる基礎節点での鉛直反力の総和として算定した。

両ケースでの鉛直反力-強制変位の関係を図-3に示す。また、最終ステップである強制変位0.5m時点における基礎周辺地盤の鉛直ひずみ分布を図-4に示す。ひずみ分布はモデル中心で左右対称となるため片側のみを図示している。図-3より、Case1-A, Case1-Bでの鉛直反力-強制変位の関係は常に一致している。また、図-4の鉛直ひずみ分布からも両者での地盤の応力状態が一致していることが分かる。すなわち、通常の耐震設計で想定している慣性力に対して地盤が抵抗するときの相互作用と、断層変位に対して地盤が抵抗するときの相互作用は等しいことが分かった。

(2) 杭基礎形式の場合

次に、杭基礎形式であるCase2~Case4の比較結果を図-5にまとめて示す。図-5より、いずれのケースにおいてもCase1と同様に、A, Bでの鉛直反力-強制変位の関係は常に一致している。また、図-6~図-8には強制変位0.5m時点での鉛直ひずみ分布を示すが、これも同様にA, B両者で一致しており、杭基礎についても(1)と同様に通常の耐震設計で想定する相互作用と、断層変位に対して基礎が抵抗するときの相互作用は等しい結果となった。

また、図-5より、Case2 (杭1本のみ) とCase3 (フーチング+杭1本) では、Case3の鉛直反力がより大きく、地盤のひずみ分布を見てもより広い領域でひずみが発生していることが分かる。これは当然ではあるが、杭基礎におけるフーチング部分も慣性力や断層変位に抵抗しているためである。Case3よりも杭本数が多いCase4 (フーチング+杭3本) が最も鉛直反力が大きい結果となっている。

4. 断層変位を受ける構造物の相互作用ばねの設定方法

3章より、断層変位を受ける地盤-基礎間の相互

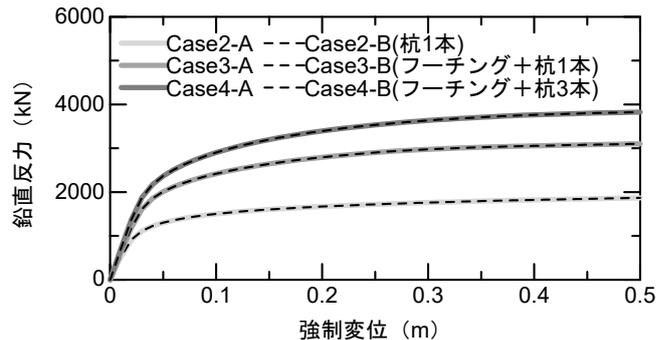


図-5 鉛直反力-強制変位の関係 (Case2~Case4)

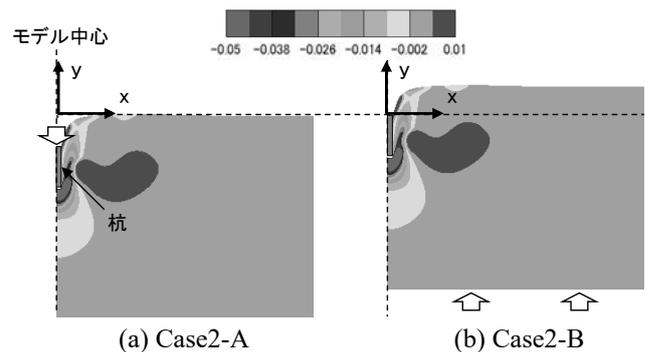


図-6 鉛直ひずみ分布 (Case2, 0.50m 載荷時)

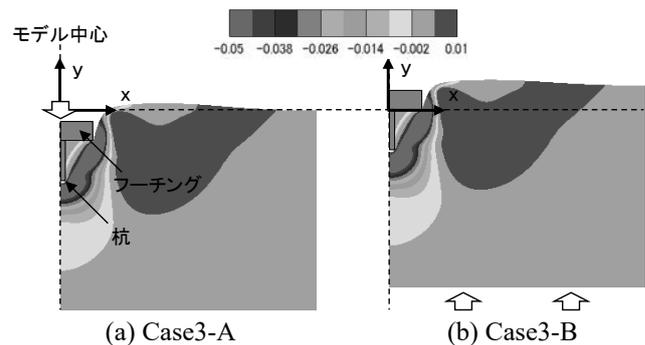


図-7 鉛直ひずみ分布 (Case3, 0.50m 載荷時)

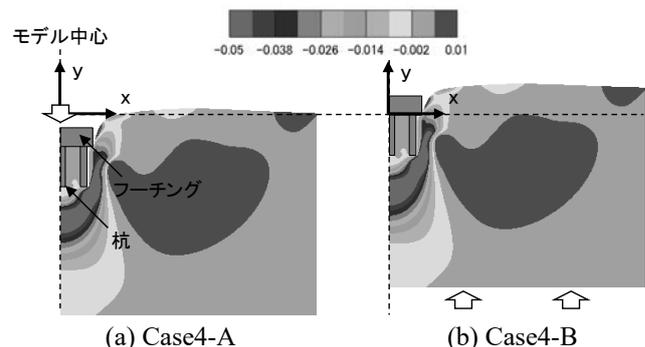


図-8 鉛直ひずみ分布 (Case4, 0.50m 載荷時)

作用は、慣性力を受ける場合の相互作用と等しいことが明らかとなった。この結果を踏まえ、断層変位を受ける構造物の応答値を算定する際の相互作用ばねの設定方法を図-9のように提案する。なお、ここでは縦ずれ断層変位を想定した場合について述べる。

直接基礎形式の場合、フーチング底面には通常の耐震設計と同様の非線形特性^{1),6)}を有する相互作用ばねを設定することができる。相互作用ばねの概要を図-9(a)に示す。

杭基礎形式の場合、杭先端および周面に対しては通常の耐震設計と同様の非線形特性^{1),6)}を設定する。ただしフーチングを有する場合には、直接基礎と同様にフーチング底面にも相互作用ばねを設けることとする。これは通常、杭基礎構造の場合は安全側への配慮としてフーチング底面に相互作用ばねを設けないことが一般的であるが、3章の結果を踏まえ、断層変位に対して構造物応答を過小評価しないようにするためである。杭基礎形式の相互作用ばねの概要を図-9(b)に示す。

この方法に基づいて構築した構造解析モデルに対し、相互作用ばねの節点に断層変位を強制変位として与える解析を行うことで、断層変位を受ける地盤-構造物の相互作用を考慮して構造物の応答を評価することができる。

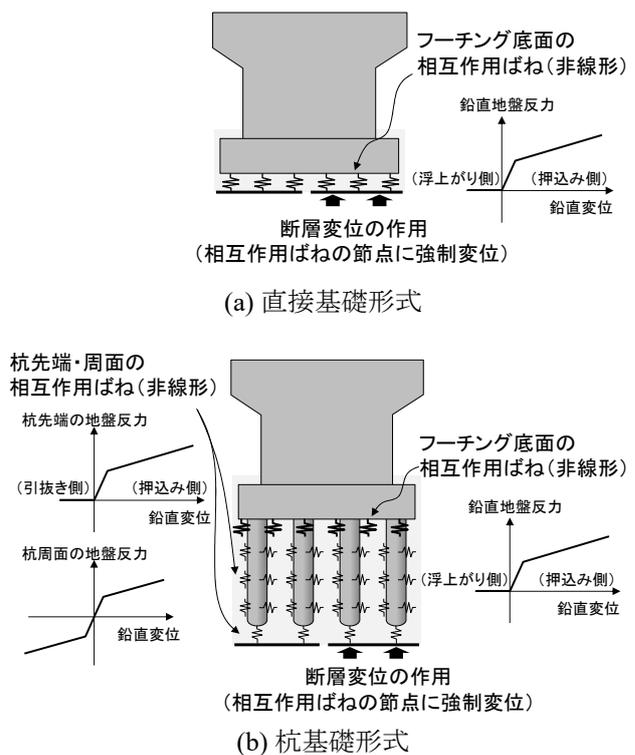


図-9 縦ずれ断層変位を受ける場合の相互作用ばね

5. おわりに

本検討では、断層変位を受ける地盤-構造物の相互作用の解明を目的として、地盤-構造物の2次元FEMモデルに対し、慣性力と縦ずれ断層変位それぞれの作用を模擬した静的非線形解析を実施した。本検討で得られた知見を以下に示す。

- 1) 基礎と構造物間の鉛直反力-強制変位の関係は慣性力または断層変位の作用によらず一致しており、両作用における相互作用は等しい。
- 2) 杭基礎の場合、杭だけでなくフーチング底面も縦ずれ断層変位に抵抗するため、杭単体よりも鉛直反力は増加する。
- 3) 縦ずれ断層変位を受ける構造物の応答評価に用いる相互作用ばねに関して、通常の耐震設計と同様の非線形特性を設定することができる。ただし、2)を踏まえて杭基礎形式でもフーチング底面の抵抗を考慮することとする。

なお、本検討では縦ずれ断層を模擬した解析を実施したが、地盤もしくは基礎の抵抗特性は作用の向きや基礎の形状によらないため、横ずれ断層変位に対しても本検討と同様の結果が得られると考えられる。今後、作用条件を変えた解析を実施する予定である。

参考文献

- 1) (公財) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，2012。
- 2) 大塚久哲，中村壮，古川愛子：断層変位を受ける鋼斜張橋の耐震安全性に関する研究，構造工学論文集，Vol. 55A，pp. 593-604，2009。
- 3) 米澤健次，樋口俊一，穴吹拓也，渡辺伸和，伊藤悟郎：三次元 FEM 解析による地中 RC 構造物の岩盤変位に対する損傷評価，構造工学論文集 A，Vol. 62A，pp. 1-11，2016。
- 4) 日野篤志，室野剛隆：縦ずれ断層の影響を受けにくい新しいラーメン高架橋形式の提案，鉄道総研報告，Vol. 31，No. 7，2017。
- 5) 日野篤志，室野剛隆，押田直之，月岡桂吾，谷山尚：個別要素法による縦ずれ断層変位実験のシミュレーション，地震工学論文集，Vol. 75，No. 4，pp. I_562-I_568，2019。
- 6) (公財) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物，2012。