

断層運動に伴う地盤変位によるシールドトンネルの影響検討

阪神高速道路公団 京都建設部 設計課 足立 幸郎
八千代エンジニアリング(株) 大阪支店 中田 恒和
八千代エンジニアリング(株) 大阪支店 ○堀内 深

論文要旨

これまで多くの地中構造物の耐震検討は地盤振動による地盤変位を外力として行われてきたが、断層を横切る地下構造物（シールドトンネル）の場合、断層運動による地盤の変位が構造物に与える影響についても検討を行う必要が生じる。

本検討は、まず、既往の文献などにより基盤面での断層変位量を設定した後、トンネル位置での断層運動による地盤の変位量を算出するために、地盤-構造物をモデル化したFEM解析を実施した。解析モデルは、反射法探査結果に基づき、堆積地盤の形状、過去に運動したと考えられる断層面を設定し、トンネル構造物とともにモデル化した。入力する断層変位は、4つの断層面のうち堆積層厚が最も薄く構造物への影響が大きいものに基盤面における強制変位として入力した。

次に、FEM解析により得られたトンネル位置での地盤変位を用いて、梁-バネモデルによるトンネル構造物の安全性検討を行った。シールドトンネル構造物の耐力は、トンネルセグメントを結合する嵌合継手で決定し、断層変位による構造物の断面力が継手の耐力以下となることを確認した。

キーワード：断層変位、シールドトンネル、FEM解析

まえがき

構造物の耐震設計は、ある震源からの地震波による振動問題として取り扱われてきた。

一方、1999年トルコ・コジャエリ地震および同年台湾・集集地震では、断層運動による地盤変位により橋梁及びトンネルなどの多くの社会基盤構造物に甚大な被害が生じた。このように、断層を横切る構造物は、地震動による影響より、地盤変位による影響が問題となる。一般に、構造

物により地盤変位に抵抗する事は困難であるが、計画中の構造物が活断層を横切ることが明らかな場合は、構造物の安全性、復旧性の観点から、その影響を把握することは重要な事項である。

本検討は、断層を横切るシールドトンネルを想定している。基盤面での断層変位量を既往の文献などから設定し、トンネル構造物への影響をFEM解析による地盤変位を基に検討した。

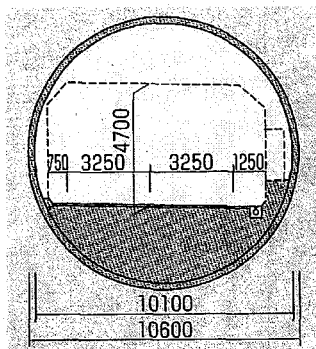


図-1 シールドトンネル断面

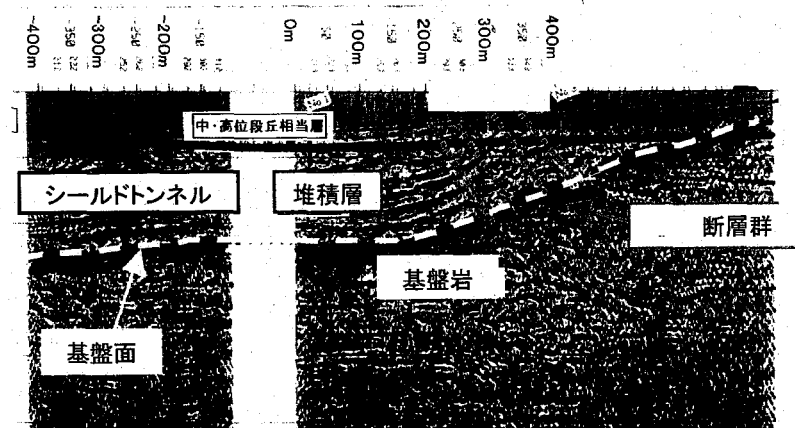


図-2 反射法探査結果

1. 検討対象

本件は、断層上の堆積層に計画されるシールドトンネルを想定している。

シールドトンネル断面は、図－1に示す形状である。

2. 検討方針

本検討は、以下の手順により行った。

- ①既往の研究成果を基に断層変位量を想定
- ②FEMモデルによる地盤の変形を算出
- ③梁-バネモデルによるトンネルへの影響検討

3. 基盤変位の推定

基盤面での変位量の推定には、既往の地震で地表面に現れた変位量と、その地震のマグニチュードとの関係を統計的に求めた関係式を用いる。

これらの関係式は、堆積地盤の有無などは明確に区別されておらず、必ずしも基盤面での変位とマグニチュードの関係を表わす式ではないが、地表面に変位が現れている場合は比較的堆積層が薄い地盤であると考え、これらの関係式を用い、基盤面での変位量を推定した（表－1）。

本検討では、日本国内の内陸型地震を対象とした式により算出された変位量 79.4cm に、10%程度のばらつきを考慮し、基盤面での変位量を $D=90\text{cm}$ と推定した。

表－1 推定式による断層変位量

推定式	地震タイプ	対象変位	断層変位の値	断層変位量 (Dcm)
松田ら1)	日本内陸	地表	平均値	79.4
佐藤ら2)	日本すべて	基盤上	平均値	69.2
武村3)	日本内陸		平均値	56.5
Donaldら4)	世界すべて	地表逆断層のみ	最大値	90.1
	世界すべて	地表逆断層のみ	平均値	8.4

4. FEM解析による地盤変形予測

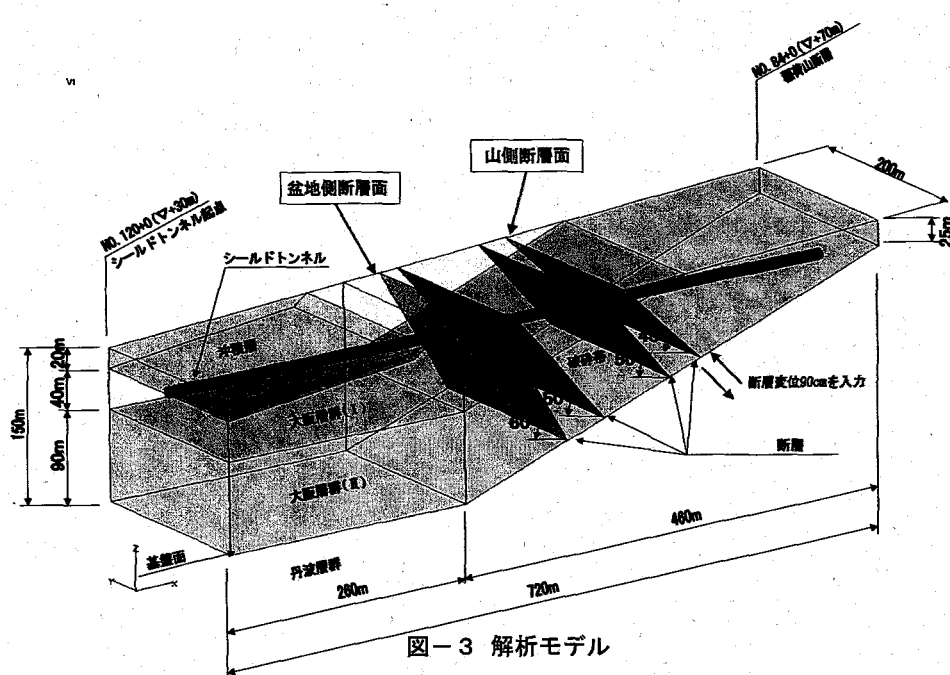
(1) 解析モデル、解析ケース

対象地盤で実施された、反射法探査結果（図－2）より基盤面、堆積層の形状、断層面を設定した。解析モデル図を図－3に示す。

堆積層内には、過去の地震により生じたと考えられる断層面が4本確認でき、周辺の堆積地盤より剛性が低下しているものと考えられ、この面にすべり・剥離を表現するジョイント要素を配置し、既存の断層面のモデル化を行った。

解析モデルは、地盤を線形ソリッド要素、断層面にジョイント要素を配置した3次元モデルおよび、地盤を非線形ソリッド要素、断層面にジョイント要素を配置した2次元モデルで解析を実施した。

解析ケースを表－2に示す。ケース1、2の比較でトンネル構造物が地盤変位に及ぼす影響を、ケース3、4の比較で断層面の物性値の違いによる影響を検証した。



図－3 解析モデル

表－２ 解析ケース

ケース名称	解析モデル (地盤モデル)	断層面の 物性値	トンネル剛性	基盤面強制変位	変位量
ケース1	3次元 (線形)	$C=0$ 、 $\phi=35^\circ$	等価剛性	山側断層面	90cm
ケース2	2次元 (線形)	$C=0$ 、 $\phi=35^\circ$	等価剛性	山側断層面	90cm
ケース3	2次元 (非線形)	$C=0$ 、 $\phi=35^\circ$	等価剛性	山側断層面	90cm
ケース4	2次元 (非線形)	$C=0$ 、 $\phi=20^\circ$	等価剛性	山側断層面	90cm

表－３ 地盤物性値

	γ (tf/m ³)	VS(m/s)	VP(m/s)	ν	G(kN/m ²)	E(tf/m ²)
沖積層	1.6	200	1600	0.49	63,800	192,000
大阪層群(Ⅰ)	1.7	400	1700	0.47	273,000	800,000
大阪層群(Ⅱ)	1.9	600	1900	0.44	695,000	1,980,000

表－４ トンネル物性値

	γ (tf/m ³)	ν	I(m ⁴)	E(kN/m ³)
等価剛性	2.45	0.15	108.9	486,000

解析に用いた物性値を表－３に示す。これらは、当該地盤周辺で実施された密度検層結果、PS 検層結果より設定した。

２次元地盤モデルのソリッド要素には、モールクーロンの降伏条件に従うバイリニア型の非線形特性を与えた。

シールドトンネルは、セグメントと継手の剛性を考慮した等価剛性を用いた（表－４）。

基盤面の境界条件は、下側基盤を固定、上側基盤を断層推定変位を入力する規定変位境界とし、堆積層厚の最も薄い断層面に90cmの変位量を図上で45°左上方に入力した。

(２) 解析結果

a. 堆積地盤の応答

図－４、５に各ケースの全体変形図および鉛直変位コンター図を示す。

線形解析である、ケース１、２では、断層面に境に基盤に変位を入力した側の地盤変位が卓越しているのが分かる。

一方、地盤を非線形としたケース３、４では、地盤の非線形性の影響により、断層面より左側の、変位を入力していない側の地盤へも変形が生じているのが分かる。

図－４のケース１、２を比べると、その応答の差はほとんど無く、３次元モデルと２次元モデルの差は見られな

かった。即ち、構造物の有無が地盤変形に影響を与えないことが分かった。また、ケース３、４の比較でも差異は見られず、地盤を非線形要素でモデル化した場合、断層面の物性差は全体変形に影響を及ぼさないことが分かった。

b. 断層面の応答

図－６に断層面のずれ量と深さの関係を表わしたグラフを示す。

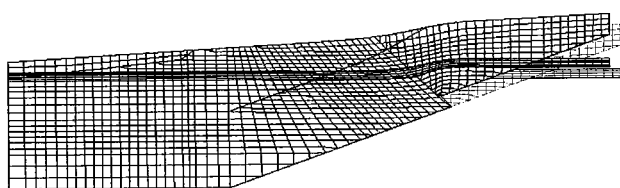
地盤を線形要素でモデル化したケース１、２では、トンネル下方近くまで断層ずれが生じているのが分かる。つまり、基盤の入力変位が断層面に卓越していることが分かる。

一方、地盤を非線形要素でモデル化したケース３、４では、基盤直上ですぐにずれ量が収束しているのが分かる。これは、地盤の非線形性の影響により、入力した断層変位が断層周辺の広範囲の地盤に吸収され、断層面のずれが卓越しなかったためと考えられる。

c. トンネル位置での変位量

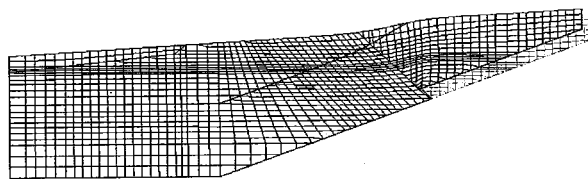
図－８にケース２、３におけるトンネル深さの地盤の鉛直変位量を示す。

地盤のモデル化の違いにより、断層変位の影響が生じる位置が異なる。両者を次節のトンネル影響検討の外力として用いることにより、断層面に変位が卓越した場合および広範囲で断層変位を吸収する場合の影響を検討する。



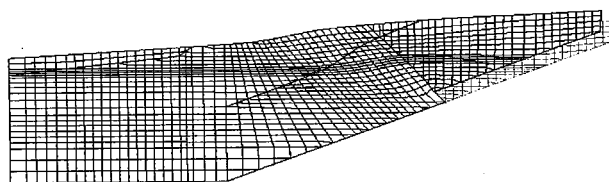
Output Set: Interval 1, Step 1
Deformed(0.929) Total Translation

(1) ケース1 変位図

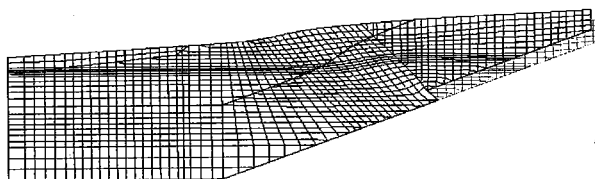


Output Set: Interval 1, Step 1

(2) ケース2 変位図



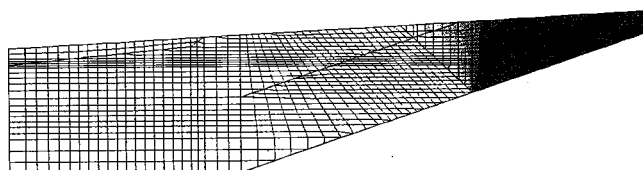
(3) ケース3 変位図



(4) ケース4 変位図

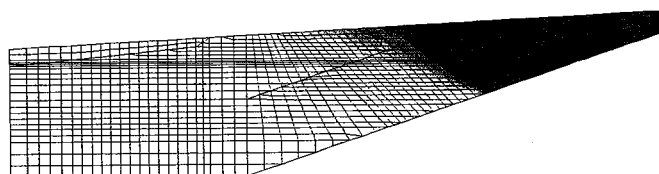
図-4 全体変位図

Output Set: Interval 1, Step 100
Deformed(0.919) Total Translation



(1) ケース2 コンター図

Output Set: Interval 1, Step 1
Contour: Y Translation



(2) ケース3 コンター図

Output Set: Interval 1, Step 100
Contour: Y Translation



図-5 鉛直変位コンター図

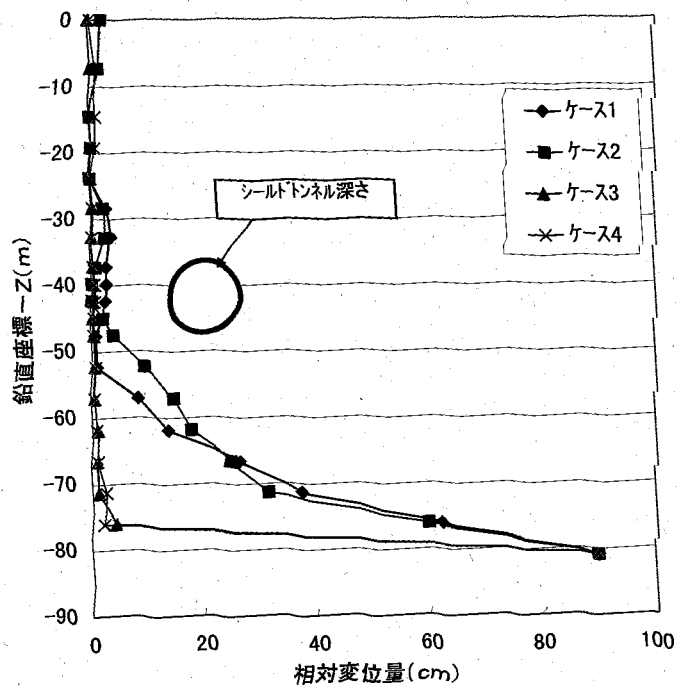


図-6 断層ずれ量

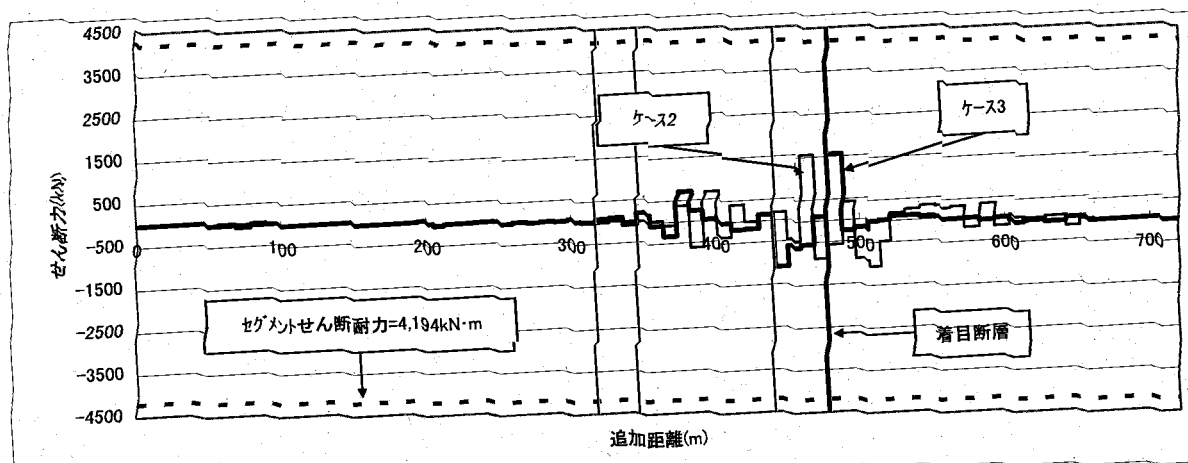
5. 梁-バネ系モデルによるシールドトンネルの影響検討

シールドトンネルを梁要素で、周辺地盤をバネ要素でモデル化し、前節にて算出された断層変位によるトンネル位置での地盤変形をバネ先に入力する応答変位法により、構造物への影響を検討した。

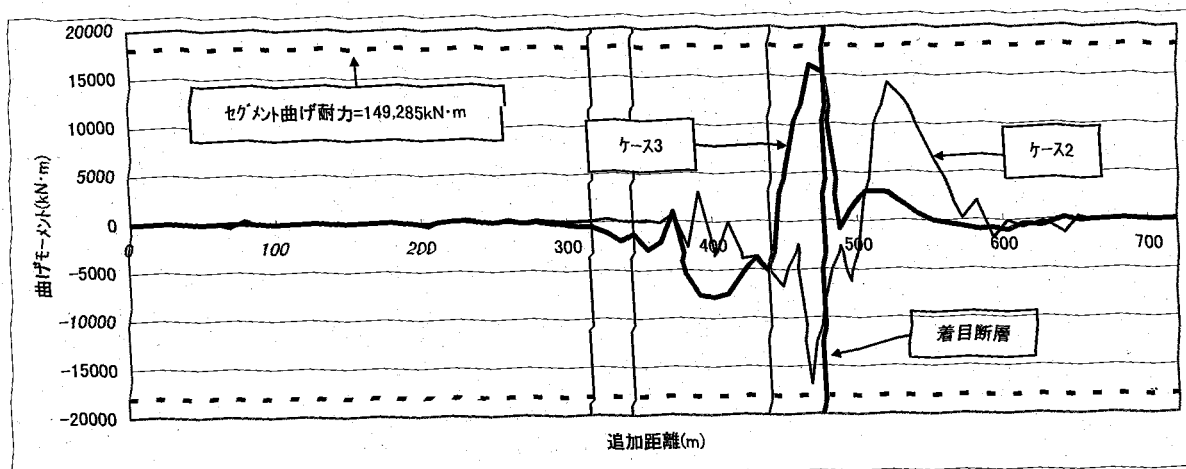
シールドトンネルの耐力は、セグメント本体の耐力と、その間に設置される嵌合継手(オス型の継手部がメス型の継手部に挿入されることにより構成される継手)の耐力のうち、値の小さい嵌合継手の耐力をシールドトンネルの耐力とし照査を行った。継手1個当りの強度は、事前の引張り試験により確認された値(破断まで至っていない値)を用いた。

断面力図を図-7に、変位図を図-8に示す。

曲げモーメントおよびせん断力について照査した結果、両者とも耐力を満足する結果を得た。



(1) せん断力



(2) 曲げモーメント

図-7 トンネルの断面力

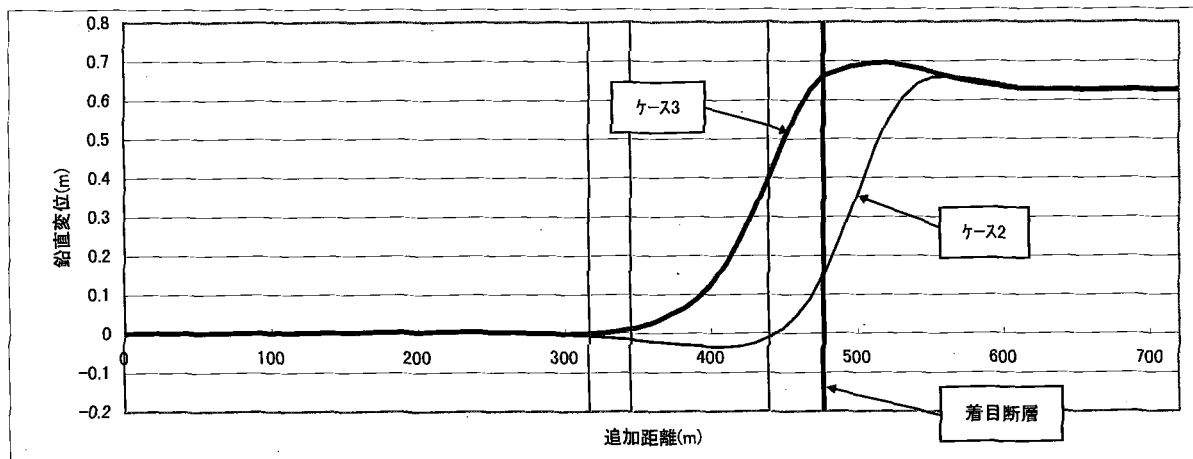


図-8 トンネル位置での地盤変位

6. おわりに

断層変位による、堆積地盤の応答性状をFEM解析により適切に表現できたと考える。

また、梁-バネモデルによるシールドトンネルの影響検討では、FEM解析により得られたトンネル位置での2種類の地盤変位、即ち、断層面の変位が卓越する場合（地盤を線形要素でモデル化したケース2）および、広がりを持つ範囲で断層変位が吸収される場合（地盤を非線形要素でモデル化したケース3）について安全性を確認できた。

本件の場合、基盤面の変位に対して、比較的堆積層が厚かったため、基盤での断層変位が堆積層内で吸収され、結果としてトンネル構造物への影響が最小限にとどまった。

このように、たとえ地中構造物が活断層を横切った場合でも、堆積層が十分厚く、またトンネル位置が浅い場合は、断層変位による影響は小さいことが判明した。

最後に、本検討に際しては、阪神高速道路公団技術審議会基礎・地下構造分科会（京都大学大学院教授足立紀尚主査(当時)）、同耐震分科会（京都大学大学院教授土岐憲三主査(当時)）の委員の皆様にご指導をいただきましたことを厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 松田時彦：活断層から発生する地震規模と周期について、地震、第2回輯、第28巻、1998、pp269-283
- 2) 佐藤良輔編著、阿部勝征、岡田義光、島崎邦彦、鈴木保典著：マグニチュードと断層パラメータとの関係、日本断層パラメータハンドブック、第II部、第2章、鹿島出版、1989、pp82-92
- 3) 武村雅之：日本列島における地殻内地震のスケリング則—地震断層の影響及び地震被害との関連—、地震、第2号輯、第51巻、1998、pp221-228
- 4) Donald L., et al.: New empirical relationships among magnitude rupture length rupture width, rupture area, and surface displacement, Bulletin of the seismological society of America, Vol. 84, No. 4, August 1994, pp974-1002
- 5) 足立幸郎、吉村敏志、中田恒和：断層運動に伴う地盤変位が地中構造物に及ぼす影響に関する一解析、構造工学論文集、Vol. 49A、2003、pp353-360