

断層変位を受ける地中構造物の耐震安全性の検討と対策に関する研究

大塚 久哲

1. はじめに

1999年に発生したトルコ・コジャエリ地震や台湾・集集地震では、断層による永久変位が原因となり橋梁や地中構造物など多くの構造物に被害が生じた¹⁾²⁾。これらの被災を受けて我が国でも近年では設計において、断層変位による影響への配慮を発注者から求められることが多くなっている。しかし、既往の研究では、地盤振動による“揺れ”のみが考慮されており、断層運動による“ずれ”の影響は考慮されていない。これはトンネルなどの線状地中構造物を断層変位に抵抗するよう設計することが困難と考えられているためである。そこで、本研究では断層変位を受ける地中構造物の影響を評価し、有効な断層変位対策を数値シミュレーションにより検討することを目的とする。

解析では、汎用有限要素解析ソフト **SoilPlus** により、地盤—地中構造物—断層面の詳細なモデルを作成し、地中構造物が受ける影響を断層面のモデル化の有無、傾斜角により評価する。その後、断層変位対策として周辺地盤に比べ剛性の小さい免震層と伸縮可能な耐震継手の効果を検討していく。免震層には断層変位を吸収して構造物の変形を抑える役割を期待しており、免震層の厚さと長さをパラメーターとして比較検討を行っていく。既往の研究によると、傾斜角 90°の水平横ずれ断層を対象にした免震層の断層変位への適用性については西山らの研究³⁾があり、免震層の効果が確認されており、免震層が厚いほど断面力の低減効果が高いことが示されている。しかし、3次元解析では地盤と免震層を非線形として扱っている研究はないため、本研究では、正断層・逆断層などの縦ずれ断層に対して、地盤の非線形性を考慮した上で免震層の適用性を検討する。また、耐震継手には継手の伸縮により構造物の変形を抑える役割を期待しており、耐震継手の剛性・設置間隔などをパラメーターとして比較検討を行っていく。既往の研究では耐震継手の断層変位に対する適用性については検討されていない⁴⁾。本研究では免震層や耐震継手など実現可能な手段を用いて断層変位に対処する方法を研究しており、社会基盤の安全性を高める上でも重要な研究である。

2. 解析モデル

解析モデルを図-1に示す。厚さ 35m の表層地盤を浅をモデル化し、基盤面に断層変位が発生すると仮定した。解析モデルは地盤と免震材をソリッド要素（非線形）、トンネルをシェル要素（線形）でモデル化した。地盤の非線形性は **Mohr-Coulomb** で表現した。断層変位は断層面に沿って 0.5m とし、上盤の底面を固定し、下盤の底面に強制変位を与えることで表現した。

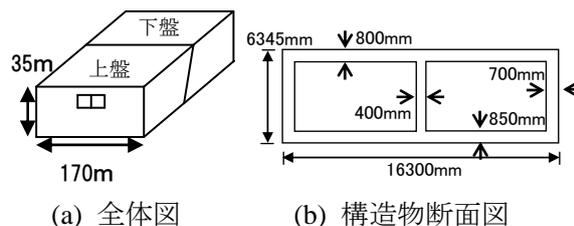
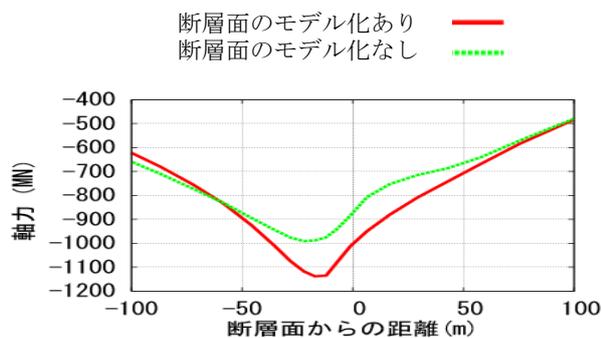


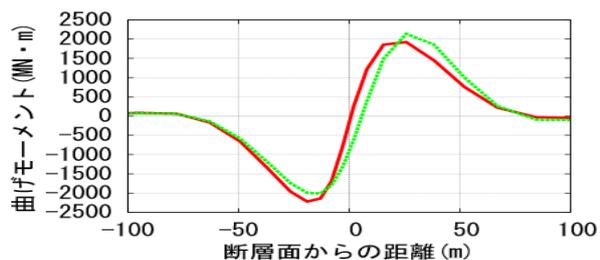
図-1 解析モデル

3. 断層面のモデル化の有無の比較

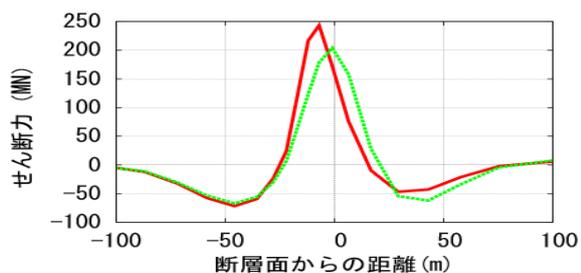
断層のモデルを作成する際に断層面をジョイント要素でモデル化するケースを断層面のモデル



(a) 軸力

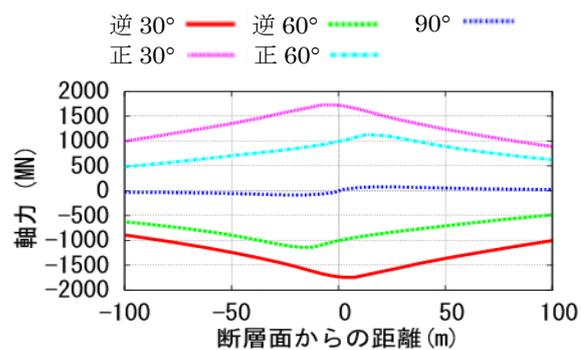


(b) 曲げモーメント

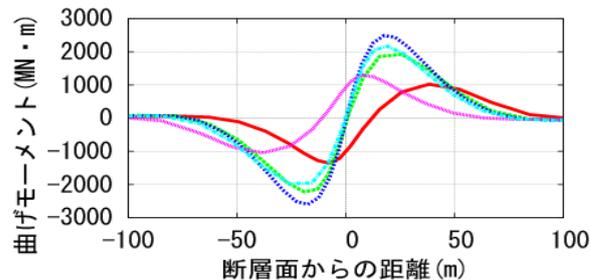


(c) せん断力

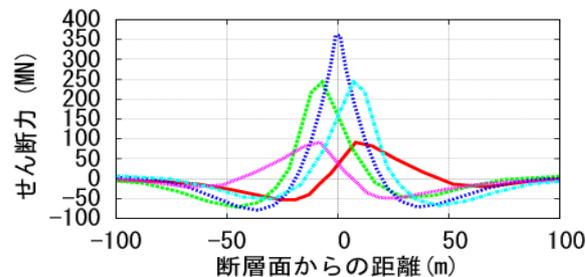
図-2 断層面のモデル化の有無による断面力の比較



(a) 軸力



(b) 曲げモーメント



(c) せん断力

図-3 断層面の傾斜角の違いによる断面力の比較

化あり、断層面を設けず、下盤と上盤で節点を共有させるケースを断層面のモデル化なしとする。断層面の摩擦や断層破碎帯の存在から、断層面のモデル化は困難なため、このような両極端な 2 ケースを比較する。

地中構造物に作用する軸力、曲げモーメント、せん断力分布の比較を図-2 に示す。ここでは逆断層 60°のケースの断面力の比較のみを示す。軸力とせん断力は断層面のモデル化なしの方が小さくなっている。一方、曲げモーメントは正負で違いはあるが、絶対値としてはほぼ同じ結果となっている。これは、断層面のモデル化なしでは、断層変位の影響を地盤が吸収し構造物に伝わりにくくするため、断面力が小さくなっているものと考えられる。安全側で評価することが重要であると考えられるため、以後の解析結果は断層面のモデル化ありで比較検討を行っていく。

4. 断層面の傾斜角による地中構造物の断面力の比較

断層面の傾斜角が地中構造物の応答特性に及ぼす影響を比較するため、逆断層 30°・60°、正断層 30°・60°・90°の比較を行う (図-3)。軸力は逆断層の場合は圧縮力、正断層の場合は引張力が主に働く。いずれの傾斜角においても、断層面近傍で最大・最小値が生じており、傾斜角の小さいケースほど最大軸力が大きい。これは、今回の解析では断層変位は断層面に沿って 0.5m として

おり、傾斜角の小さいケースほど軸方向の変位が大きいためである。一方、曲げモーメント、せん断力は傾斜角が大きいケースほど大きくなっており、これは傾斜角が大きいケースほど軸直角方向の変位が大きいためである。いずれの傾斜角においても曲げモーメント、せん断力が主に生じている範囲は断層面を中心に片側約 75m となっており、それより遠方ではほぼ 0 である。逆断層と正断層を比較すると、軸力は正負の違いはあるが絶対値はほぼ同じ値をとっている。また、曲げモーメントも正負の違いはあるが、分布の傾向としては原点対象となっており、絶対値はほぼ同じ値をとっている。そして、せん断力は断層面を中心に左右対称となっている。以上のことから、逆断層、正断層のいずれかを検討することで、もう一方の結果も推定できると考えられる。

5. 免震層の効果

免震層は周辺地盤のせん断変形に対し使用されているが、ここでは断層変位対策への適用性について検討する。免震層を検討した理由としては、軸力に対しては免震層のせん断変形、曲げやせん断に対しては免震層の伸縮変形が効果があると考えられるためである。

免震材としてはポリビニルアルコール系ポリマー材（ポリマー材）を想定している。ポリマー材は変形性、耐久性に優れていることが確認されているため、断層変位による地中構造物への影響を低減できると期待される。免震層は地中構造物の全周に配置し、軸方向には断層面を中心に対称に設置している（図-4）。

表-1 に免震層の厚さと長さをパラメーターとした、各断面力の最大値の低減率を示す。軸力はいずれの傾斜角においても免震層の厚さによる低減率の差はほとんどないことが分かる。しかし、免震層の長さは軸力の低減に大きく関係し、免震層が長いほど低減率は大きくなっている。本研究では、免震層の長さは 200m までとしたが、断層面の傾斜角 30°と 60°のケースでは軸力の生じている範囲が広く、30°のケースでは約 1600m の範囲であったため、免震層を長くすることにより更なる軸力の低減が期待できる。

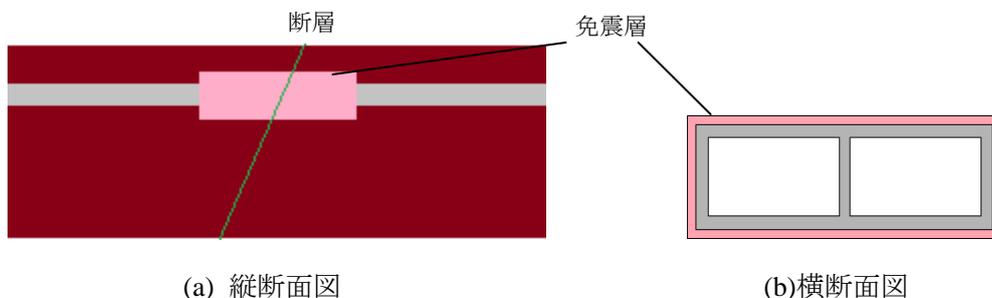


図-4 免震層の設置

表-1 免震層による断面力の低減率 (%)

	免震層の厚さ (cm)	免震層の長さ(m)											
		30°				60°				90°			
		20	50	100	200	20	50	100	200	20	50	100	200
軸力	25	0.0	5.3	13.3	25.4	2.9	8.9	17.9	30.5	42.5	72.0	83.9	85.0
	50	0.1	5.7	14.4	28.0	3.1	9.4	19.1	33.1	47.4	90.7	88.6	89.3
	100	0.4	6.2	15.4	29.9	3.1	9.4	19.1	33.1	51.8	82.7	89.7	90.2
せん断力	25	3.6	6.3	0.8	-5.5	14.9	24.7	24.4	24.1	15.1	24.7	25.7	25.9
	50	8.2	19.0	11.9	6.1	18.0	31.3	32.0	32.9	9.2	20.0	32.4	34.3
	100	13.3	26.9	26.6	22.0	21.4	39.4	41.8	42.0	25.3	41.9	44.5	44.9
曲げモーメント	25	5.1	18.1	21.4	19.5	0.7	11.2	12.8	12.8	-2.3	5.1	9.1	9.6
	50	5.9	22.8	28.1	26.7	1.2	16.2	19.4	19.8	-2.8	7.8	14.5	15.9
	100	7.2	28.0	37.1	36.8	1.9	20.8	28.6	29.5	-3.2	11.6	22.0	23.0

曲げモーメントの低減率はいずれの傾斜角も同様の傾向を示しており、免震層の長さが 100m 以上になると横ばいになる。これは曲げモーメントの生じている範囲が断層面を中心として約 150m と狭いことが原因であると考えられる。免震層の厚さの影響も生じており、免震層が厚いケースほど低減率が大きくなる。そのため、曲げモーメントの低減には免震層の長さより厚さを増やすほうがよいと考えられる。

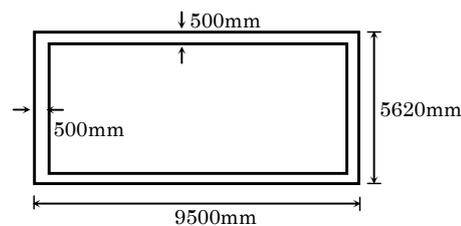


図-5 構造物の断面

せん断力の低減率は曲げモーメントの低減率と類似した結果となっているが、断層面の傾斜角 30°では免震層の長さが 100m 以上で低減率が逆に減少している。しかし、厚さに関しては、曲げモーメント同様、免震層が厚いケースほど低減率が大きくなる。

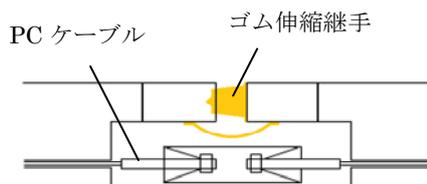
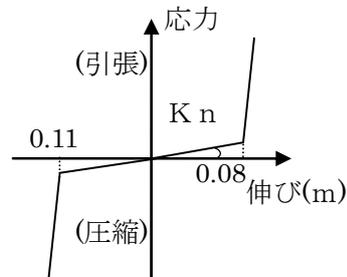


図-6 トンネル接合部

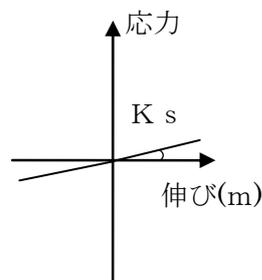
6. 耐震継手の効果

本研究では耐震継手を検討する際に、構造物の断面を図-5とした。耐震継手は、図-6のようなPCケーブルとゴム伸縮継手を想定しており、トンネル各横断面にジョイント要素として設置した。ゴム伸縮継手は、ゴムガasketが主に圧縮力に対して抵抗する構造部材であり、引張に対してはPCケーブルが抵抗する。また、それぞれ伸縮に対してロック機能も備えており、ある変位以上伸縮すると剛体のような挙動を示す(図-7)。耐震継手は、断層面を中心設けており、設置間隔を 10m~40m、設置箇所数を 2~6 箇所としている。



a) 軸方向

表-2 に耐震継手の設置間隔と設置箇所数をパラメーターとした解析結果を示す。耐震継手を設置したケースでは断面力が低減しており、特に軸力と曲げモーメントが大幅に低減していることが分かる。これは、継手が伸縮することで断層変位を吸収し、トンネルへの負荷(軸ひずみ、曲げ曲率)を軽減させているためである。また、耐震継手の設置間隔は短く、設置箇所数は多いほうが低減効果が大きくなる。しかし、



b) せん断方向

図-7 耐震継手の特性

表-2 耐震継手による断面力の低減率(%)

継手設置間隔		10m			20m			30m		40m
継手設置箇所数		2	4	6	2	4	6	2	4	2
軸力	30°	36.7	73.4	83.9	31	64.5	69.3	30.8	60.6	29.4
	60°	58.7	79.7	67.6	42.1	68.1	69.4	49	63.7	47.3
	90°	49.8	60.6	72.9	35.4	55.7	56.3	51.9	58.1	65.1
せん断力	30°	70.7	77.7	69.1	21.6	31.7	32.7	27.8	22.4	15.8
	60°	14.1	39.3	41.2	15.6	30.5	31.4	14.3	25.4	13.1
	90°	69.6	76.8	77.5	72.9	74.3	74.4	69	69	64.8
曲げモーメント	30°	25.1	55.6	75.2	2.5	32	51.3	41	36.8	24.6
	60°	67.1	94.2	36.9	72.2	91.9	91.9	56.4	72.9	50.6
	90°	88.2	97.2	97.2	93.1	93.6	93.6	83.3	83.5	72.3

継手の設置箇所数は、断面力における 4 箇所と 6 箇所設置の値がほぼ同じ値に収束していることから、断層面近傍に数箇所設置できていれば、その効果は大きく変わらないことが分かる。一方、せん断力は耐震継手の設置間隔が小さいほど低減率は大きくなるが、設置個数としては多いものほど低減率が高くなるとは言えない結果となった。

7. 結論

免震層を設けることにより、断面力が低減することが確認できた。軸力の場合は免震層の長さより長さを長くすることにより低減効果に期待でき、傾斜角の小さいケースほどその効果は大きい。曲げモーメントとせん断力の場合は免震層の長さがある一定の長さを超えると低減率が横ばいになるため、長さより厚さを変える方が低減効果を期待できる。断層面の傾斜角により断面力の低減効果に差は生じるが、どの断面力の低減を期待するかにより免震層の適切な厚さと長さを検討する必要がある。

耐震継手の設置間隔は短いほど効果的である。耐震継手が伸縮することにより、断層変位による負荷(軸ひずみ、曲げ曲率)や、トンネル躯体の変位を吸収し緩和する効果がある。耐震継手の設置間隔が短く、設置箇所数は多いほど、断面力を低減できる。今回の解析ケースでは断層面を挟んで約 200m の範囲に断面力が発生したため、その範囲において施工費や止水性の確保、沈下などの影響も考慮した上で耐震継手を設置するのが望ましいと考えられる。

8. 今後の課題

今回の解析では地盤－構造物間の節点を共有としていたが、実際には滑りや剥離といった現象が生じるため、今後はこういった問題に取り組んでいきたい。

・参考文献

- 1) 能島暢呂：1999 年トルコ・コジャエリ地震の被害調査報告，土木計画学シンポジウム，2000
- 2) 九州大学建設振動工学研究室編：921 集集地震（台湾）被害調査報告書，2002
- 3) 西山誠治，川満逸雄：地下構造物の断層変位対策としての免震構造の適用性，第 27 回土木学会地震工学研究発表論文集，No.212，2003
- 4) 清宮理，藤澤孝夫，山田昌郎，本多宗隆：沈埋トンネル柔継手の載荷試験，構造工学論文集，Vol.39A，1993

・発表論文

大塚久哲，古川愛子，相部岳暁：断層変位を受ける地中構造物の耐震性と免震対策の適用性，土木学会地震工学論文集第 31 巻，2010