

断層変位を受ける地中構造物の耐震継手 対策の有効性に関する研究

大塚 久哲¹・相部 岳暁²・副島 すみれ子³

¹九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門教授
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

E-mail:otsuka@doc.kyushu-u.ac.jp

²九州大学大学院建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

E-mail:aibe@doc.kyushu-u.ac.jp

³前澤工業株式会社 (〒332-0022 埼玉県川口市仲町 5-11)

E-mail:sumireko_soejima@maezawa.co.jp

現行の耐震設計では、地震による“揺れ”については多くの研究がされており、その対策について検討されている。しかし、断層運動による“ずれ”の影響が考慮されている研究はほとんどない。本研究では地盤－地中構造物－断層系の詳細な3次元有限要素解析を行い地盤－構造物間の滑り・剥離の影響を考慮した断層変位による地中構造物への影響を評価する。更に地震の揺れに対する対策として利用されている耐震継手の断層変位に対する適用性についても検討する。

Key words : fault displacement, underground structure, earthquake-resistant joint

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・集集地震では断層が地表に出現し、その影響で橋梁や地中構造物など、多くの土木構造物に甚大な被害が生じた¹⁾²⁾³⁾。こういった背景から、橋梁分野では断層変位に対する影響評価・対策に関する研究が行われるようになり、実績も多くある⁴⁾⁵⁾。

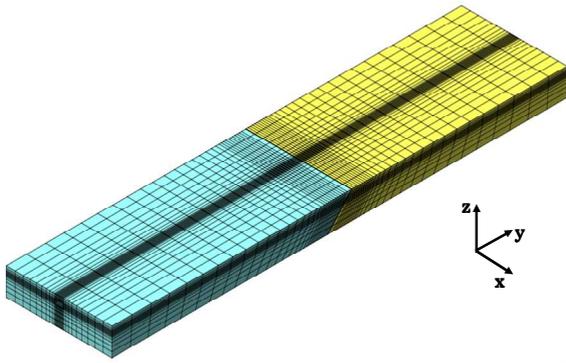
一方、地中構造物に関しては地震動による地盤のせん断変形に対しては対策がとられているが、断層変位による相対変位対策があまりないのが現状である⁶⁾。しかし、日本では確認されているだけでも約2000の活断層があり、線状に長いトンネルなど全ての構造物が断層を避けることは困難であり、断層と交差せざるを得ない場合がある。以上のことから、断層変位に対して地中構造物の安全性を確保するための研究を行うことは重要である。想定される地盤変位に対して構造物がどのような状態になるのかを詳細に検討し、適切な対策を講じる必要がある。

これまで、断層変位を受ける地中構造物に関連する研究として、海外でも Lei Zhao⁷⁾らにより構造物が受ける影

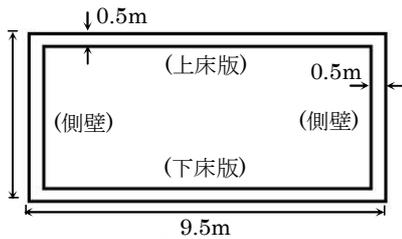
響について検討されたものなどがある。

そこで、本研究では、断層変位により構造物にどのような影響が生じるのかを詳細に分析することを目的として、地盤－地中構造物－断層系の詳細な3次元有限要素解析を実施した。筆者らはこれまでに、地中構造物の断層変位対策として免震工法の効果について検討してきた⁸⁾。この研究では、免震層の厚さ・長さをパラメーターとして解析を行っていた。

本研究では、地盤－構造物間の滑り・剥離を考慮した解析を実行しその影響について評価した。また、さらに有効な断層変位対策として免震層以外の工法についても検討した。地盤の揺れや変位に対して柔構造化を図る耐震継手があり、地中構造物への有効性が確認されている。これまで、断層変位対策として耐震継手の有効性に関する研究はされていない。そこで本研究では、耐震継手の間隔・設置個数をパラメーターとして断層変位による地中構造物の影響低減効果を検討する。



(a) モデル全体図



(b) 地中構造物断面図

図-1

表-1 物性値

	ポアソン比	ヤング率 (kN/m ²)	単位堆積重量 (kN/m ²)
トンネル	0.2	25,000,000	23.5
地盤	0.49	218,938	18.0

2. 解析概要

(1) 解析モデル

解析の対象構造物は図-1の鉄筋コンクリート製の1層矩形開削トンネルである。表-1に地盤と構造物の物性値を示す。設計耐力は、軸圧縮 $2.58 \times 10^5 \text{kN}$ 、曲げ $8.42 \times 10^4 \text{kNm}$ 、せん断 $1.61 \times 10^4 \text{kN}$ である。対象とする地盤は表層地盤とし、モデルの軸方向の長さは 1000m、幅 120m、深さ 30m としている。

地中構造物は線形材質のシェル要素、地盤は非線形特性を有するソリッド要素でモデル化した。地盤の非線形性は Mohr-Coulomb で表現している。地中構造物の断面内要素数は Z 方向に 8 個、X 方向に 16 個である。断層のモデル化として断層面は不連続となるため、断層境界面における上盤側と下盤側の重複節点に断層面平行方向のジョイント要素を配置した。ただし、地中構造物部は連続であるためジョイント要素は配置していない。地中地盤-構造物間に非線形ばねを設置し、滑り・剥離を表現した。ばねの非線形性を図-2に示す。このばねは、引張方

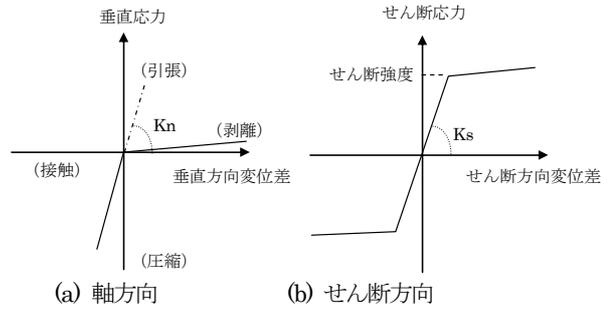


図-2 地盤-構造物間ばねの特性

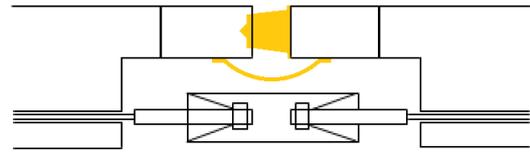


図-3 耐震継手

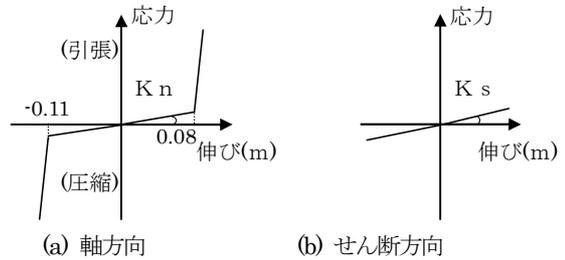


図-4 耐震継手の特性

向の力は負担せずに剥離が生じ、圧縮方向にはばね定数 K_n に応じた力を負担する。一方、せん断方向ばねでは、せん断応力がせん断強度に達するまではばね定数 K_s に応じた力を負担し、せん断強度に達すると滑りが生じるようになっている。せん断強度は Mohr-Coulomb により計算する。

解析は Pushover 解析を実行し、断層変位は断層面に沿って 0.5m とし、200 ステップに分割して変位を漸増させている。今回は縦ずれ逆断層を解析の対象としており、上盤の基盤面に変位を与えている。

耐震継手は図-3のようなゴムガスケットと PC ケーブルから成る伸縮継手を想定しており、構造物の各横断面にばね要素として設置した。この継手は、圧縮力に対してはゴムガスケットが抵抗し、引張に対しては PC ケーブルが抵抗する。伸縮方向それぞれ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-4に継手の非線形特性を示す。継手は断層面を挟み、上盤・下盤方向同距離に設置している。

(2) 解析ケース

初めに地盤-構造物間のばね有無による解析結果の比較を行う。次に、各断層面の傾斜角に対する耐震継手の

表-2 解析ケース

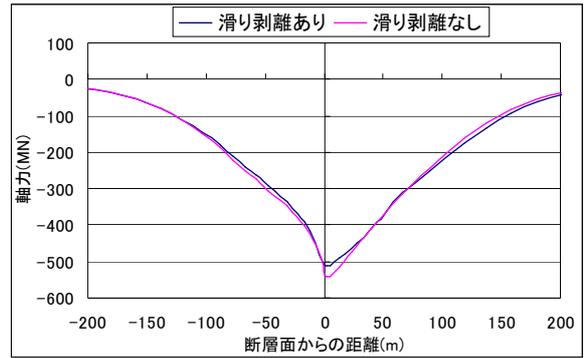
case	断層面の傾斜角	継手の間隔(m)	継手の个数
1	30°	-	-
2		地盤-構造物間の滑り剥離なし	
3		10	2
4			4
5			6
6		20	2
7			4
8			6
9		40	2
10		100	2
11		150	2
12		200	2
13	60°	-	-
14		地盤-構造物間の滑り剥離なし	
15		10	2
16			4
17			6
18		20	2
19			4
20			6
21		40	2
22		100	2
23		150	2
24		200	2

有効性について検討するため、継手の設置間隔・設置個数をパラメータとして解析を行う。全解析ケースを表-2に示す。case1 と case13 は継手なし、case2 と case14 は構造物-地盤間の滑り・剥離なしを示している。

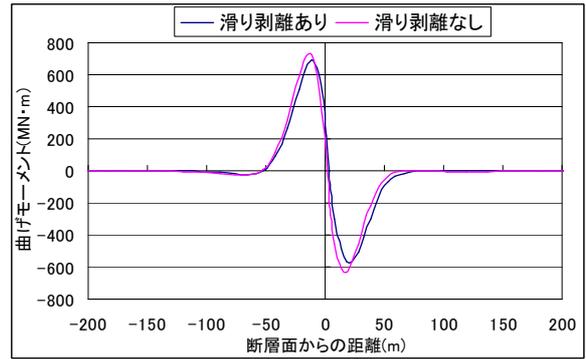
3. 地盤-構造物間の滑り・剥離の影響

地盤-構造物間は完全付着ではなく、実際には滑りや剥離といった現象が生じる。これまで、多くの研究で滑り・剥離の影響を無視した解析が行われているため、本節では初めに傾斜角 60° に対してその影響を比較した。結果として、図-5 に軸力・曲げモーメント・せん断力を示す。断面力は各要素の応力を積分して算出し、曲げモーメントは上床版の引張を正としている。

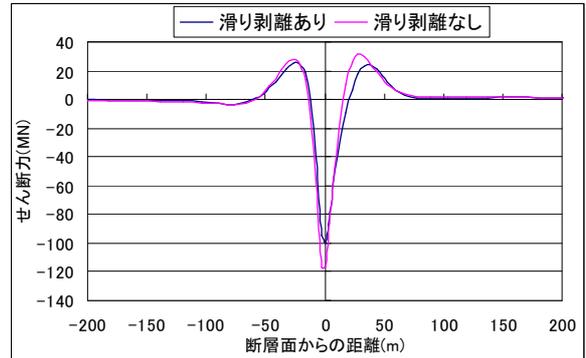
いずれの断面力でも滑り・剥離ありの方が最大値が小さくなる結果となり、軸力は約 5.5%、曲げモーメントは上盤側で 4.7%・下盤側で 11.5%、せん断力は 18.7% の差が生じた。これは、滑り・剥離を考慮することで構造物が地盤から受ける影響を減少させていることが要因であると考えられる。図-6 に構造物側壁とその上下地盤の縦断方向の変位コンター（実寸法の 30 倍）を示すが、継手ありでは下盤側の下床版で剥離が生じており、また構造物と地盤間で変位が不連続になっていることから滑りも



(a) 軸力

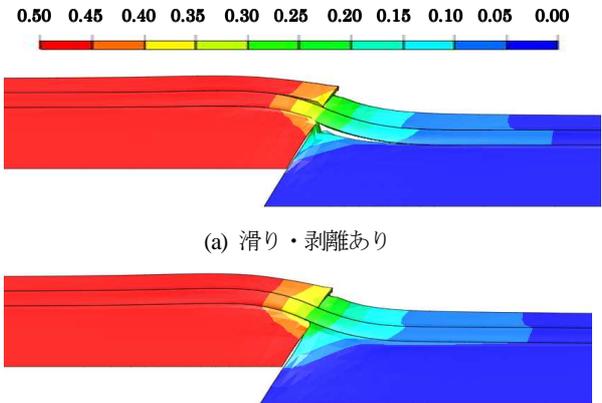


(b) 曲げモーメント



(c) せん断力

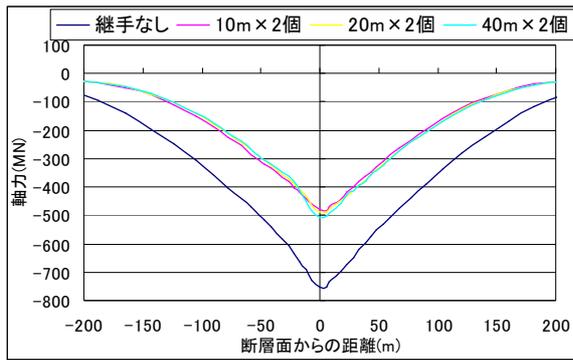
図-5 地盤-構造物間の滑り・剥離の影響の比較



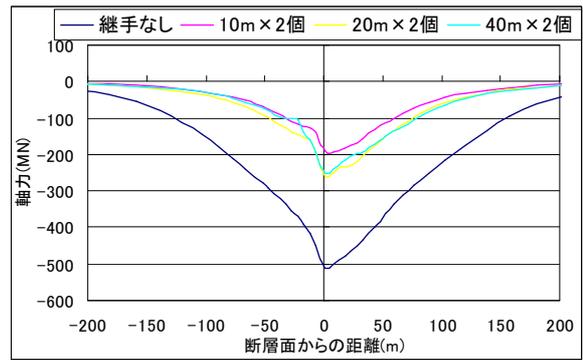
(a) 滑り・剥離あり

(b) 滑り・剥離なし

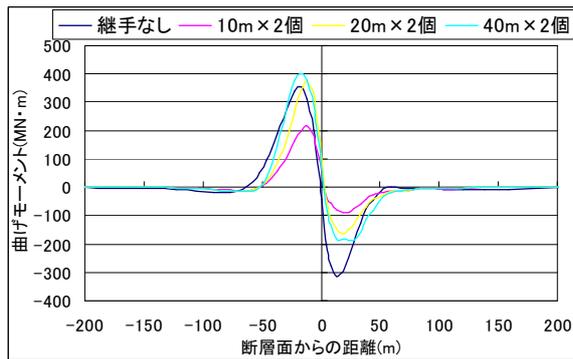
図-6 変位コンター



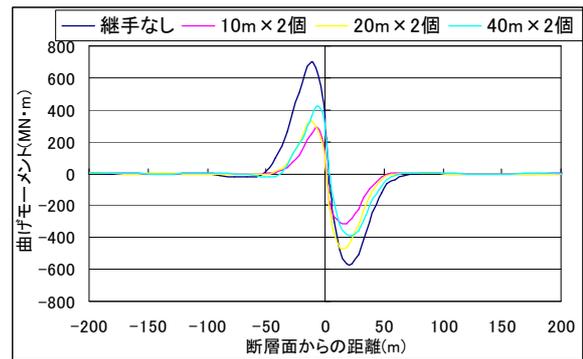
(a) 軸力



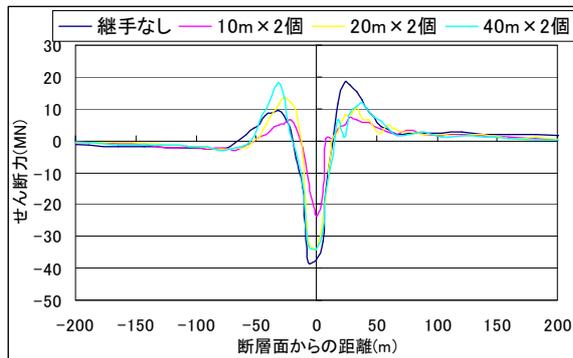
(a) 軸力



(b) 曲げモーメント

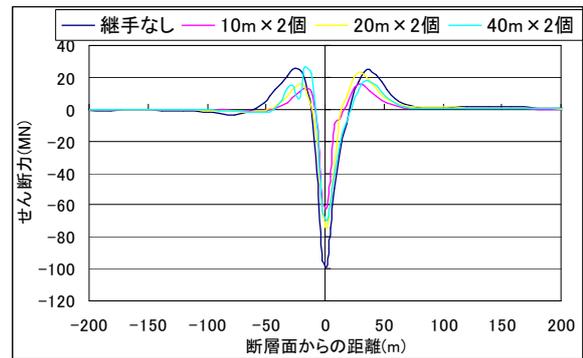


(b) 曲げモーメント



(c) せん断力

図-7 断面力の比較 (30°)



(c) せん断力

図-8 断面力の比較 (60°)

確認できる。その結果、継手なしと比較して変位分布が緩やかになっている。

より実現に近い解析を行うためには、以後の解析は地盤-構造物間の滑り・剥離を考慮したモデルで行う。

4. 耐震継手の効果

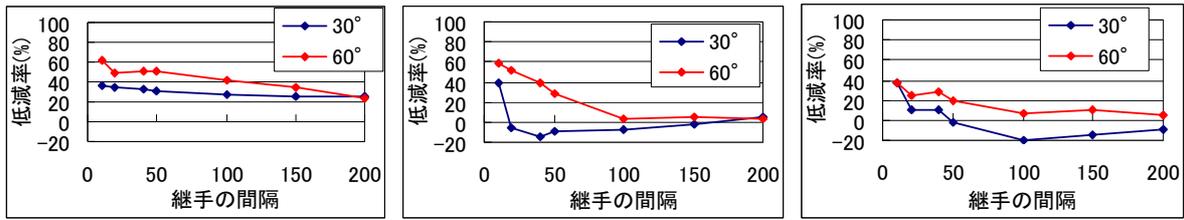
(1) 断面力の分布

耐震継手は地震動による地盤変位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。図-7、図-8に継手あり(間隔10、20、40m)と継手なしの比較を示す。耐震継手の設置により、30°・60°いずれの傾斜角でも軸力・せん断力の低減が見られる。一方、曲げモーメント(上盤側)では傾斜角30°のケースによっ

ては増大することもある。60°の継手を設置したケース以外は全て設計耐力以上の断面力が生じている。

(2) 耐震継手の設置間隔と個数の影響

耐震継手の設置間隔と個数が地中構造物の応答に及ぼす影響として、図-9に低減率を示す。図-9(a)は、設置間隔を比較したものであり、図-9(b)(c)は個数を比較したものである。傾斜角60°では設置間隔が小さいほうがいずれの断面力も低減率が大きくなる。また、継手の設置個数が多いケースほど低減効果が高まる。一方、傾斜角30°の軸力は60°と同様の傾向を示すが、曲げモーメントとせん断力は間隔や個数に法則性が見られず、断面力が増大するケースもある。しかし、継手の間隔が10mで個数が

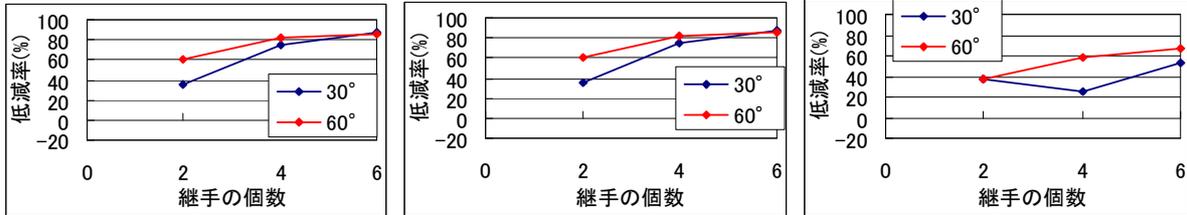


(a) 軸力

(b) 曲げモーメント

(c) セン断力

(1) 継手の間隔による比較

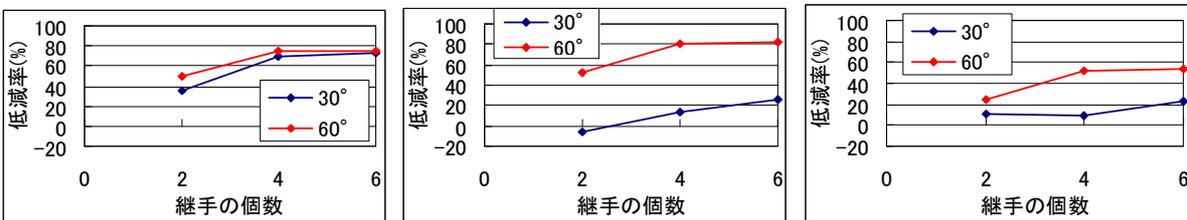


(a) 軸力

(b) 曲げモーメント

(c) セン断力

(2) 継手の個数による比較 (10m)



(a) 軸力

(b) 曲げモーメント

(c) セン断力

(3) 継手の個数による比較 (20m)

図-9 低減率

6 個の場合、断面力の低減が大きく、60°のせん断力以外は設計耐力を下回る結果となった。

(3) 考察

30°・60°いずれの傾斜角でも軸力が低減した理由は、継手の伸縮により、構造物の軸方向の変形が小さくなったことである。設置個数が多いほうが低減率が大きくなったのは伸縮可能量が増えたことが原因である。また、60°の曲げモーメント・せん断力が低減したことも同様の理由である。一方、30°の曲げモーメント・せん断力に対して、継手の効果があまり発揮されなかったのは、継手のロック機能が原因であると考えられる。いずれの傾斜角でも下盤側の継手に着目すると圧縮力と曲げの影響で継手が図-10のように変形し、下床版の継手でロック機能が先に働く。60°では強制変位が160ステップ目の段階で下床版の継手のロック機能が働く。一方、30°では強制変位が100ステップ目の段階で下床版の継手のロック機能が働く。ロック機能が働くと、その節点は剛結となり力が軽減されることなく伝わるようになる。その結果、構造物の上床版と下床版で応力差が大きくなり曲げモーメントが大きくなったと考えられる(図-11)。また、いずれの断面力の比較においても60°の方が30°に比べ低減効果が

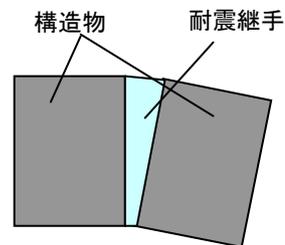


図-10 継手の変形

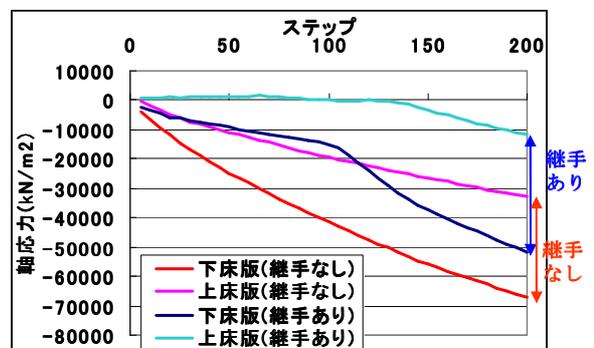


図-11 上下床版の応力差

高いのは前述の通り継手のロック機能が働くステップが遅いことに起因する。しかし、60°では30°よりロック機能が働き出した変位が遅かったため低減効果が高かったが、仮に断層変位量が1mとなった場合は低減効果があるとは言えない。しかし、継手の個数を増やす、または伸縮可能量を大きくすることでロック機能が働くまでの伸縮量が増えるため、耐震継手による低減効果に期待できる。

5. 結論

地盤-構造物間を節点共有で解析すると断面力の過大評価となる。滑り・剥離の影響を考慮した解析する為にはばねでモデル化する必要がある。

断層変位量が0.5mの場合の耐震継手の効果として、傾斜角60°のケースでは継手の間隔が狭い程、また、個数が多いほど断面力の低減効果が大きい。一方、30°のケースでは耐震継手により軸力は低減したが、曲げモーメントとせん断力は継手の個数が2個で間隔が20m以上のケースで増大した。これは、上床版と下床版の継手のロック機能が働き出す変位ステップの差が原因である。しかし、継手の個数を増やすことで低減率が改善される。これは、継手が増えることで総伸縮可能量が増え、ロック機能が働かないからである。そのため、耐震継手の効果を高めるには、継手の個数を増やす、または伸縮可能量の大きい継手を使用するといった方法が考えられる。

傾斜角60°の方が傾斜角30°に比べ耐震継手による断面力の低減効果が高いのは、60°の方が軸方向に働く力が小さく、継手のロック機能が働く変位ステップが遅くなるからである。

断層変位対策として耐震継手を使用する際には、継手の性能に応じて設置個数や伸縮可能量を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 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，2000
- 2) 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
- 3) R.Ulusay, O.Aydan and M.Hamada：THE BEHAVIOR OF STRUCTURES BUILT ON ACTIVE FAULT ZONES：EXAMPLES FROM THE RECENT EARTHQUAKES OF TURKEY, A Workshop on Seismic Fault Induced Failures, Tokyo, pp. 1-26, 2001
- 4) 大塚久哲監修：断層変位を受けるコンクリート系橋梁の耐震安全に関する研究専門委員会報告書，日本コンクリート工学協会・九州支部，2002
- 5) 土木学会地震工学委員会：「断層変位を受ける橋梁の計画・耐震設計に関する研究小委員会」報告書，九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門，2008
- 6) 大塚久哲監修：最新地中・基礎構造の耐震設計，九州大学出版会，2001
- 7) Lei Zhao, Chengchen Cui and Xiaojun Li：Response analysis of buried pipelines crossing fault due to overlying soil rupture, EARTHQUAKE SCIENCE, Vol.23, pp.111-116, 2010
- 8) 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 vol.31, 2010

Study on the effectiveness of earthquake-resistant joint against seismic performance of underground structure

Hisanori OTSUKA, Takeaki AIBE, Sumireko SOEJIMA

In the current seismic design, only earthquake shaking is considered and the influence of fault displacement is not considered. However, since linear underground structure such as tunnels have a possibility to be constructed across faults, they have a probability to get severe damage due to the fault displacement. In this study, seismic performance of a tunnel that cross a fault and the effectiveness of earthquake-resistant joint.