

土木構造物における 地震断層の工学的対応に関する考察

常田賢一¹

¹正会員 工修 独立行政法人土木研究所耐震研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)
E-mail:tokida@pwri.go.jp

本研究は、近年重要性が高まっている地震断層について、土木構造物における工学的な対応の方向性を考察する。対象とする土木構造物は橋梁、堤防・道路盛土・平坦道路および埋設管とし、既往地震履歴による地震断層の発生特性および構造物の被害特性に基づいて、地震断層の発生形態と土木構造物の構造形態毎の被害形態を体系的に整理した。また、地震断層と構造物の相互関係の簡易モデルに基づいた数値計算により、土木構造物に対する地震断層の影響を明らかにした。さらに、地震断層に対する既存技術の適用性に基づいて、「吸収する」、「追従する」および「避ける」の3つの基本姿勢を提示し、土木構造物の計画、設計、地震直後および復旧の各事業段階に着目して、地震断層の工学的な対策を体系的に考察した。

Key Words: surface faulting, countermeasure, civil engineering structure, engineering viewpoint

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震では、淡路島において野島断層のずれが地表に出現するとともに、工事中の明石大橋では主塔間の断層のずれにより橋長が約1.1m拡大した。その後も1999年のトルコのコジャエリ地震や台湾の集集地震において大規模な地表地震断層が出現し、橋梁等の構造物に甚大な被害を及ぼした。このような活断層が地表に出現する地表地震断層（以下、地震断層と呼ぶ）による地震災害の経験を契機として、我が国では従来から考えられているプレート境界型地震に加えて内陸直下地震に対する関心が高まっている。

ここで、内陸直下地震の影響としては、近い震源からの強い地震動および地震断層のずれの変位が考えられる。前者については、レベル2地震動としてその評価手法およびそれを考慮した橋梁等の耐震設計法に関して詳細な調査研究が実施されている。一方、後者については、従来から土木構造物の計画や設計においては基本的に地震断層を避けることが前提とされており、工学的な視点からの地震断層の対応について、体系化、具体化されていないのが実情である。

しかし、地震調査研究推進本部により活断層の調査・研究が進捗する環境下において、特に構造的に長尺である土木構造物の構築に際しては活断層の存在が無視できない状況が予想されるので、地震断層を避けることが困難である場合も含めて、地震断層に対して工学的な視点による取り組みの方向性を明らかにしておくことが重要

である。

本研究は、土木構造物の代表的な構造形態である橋梁、堤防・道路盛土・平坦道路および埋設管を対象として、既往地震履歴における地震断層の発生特性および土木構造物の被害特性を把握するとともに、それらに基づいて地震断層と土木構造物との関係を体系的に整理した。また、地震断層と構造物の相互関係を簡易なモデルで表現した数値計算により、土木構造物に対する地震断層の影響に関する基礎的検討を行った。さらに、地震断層の影響および地震断層に対する既存技術の適用可能性を検討するとともに、それらに基づいて土木構造物における地震断層に対する工学的対応に必要な基本姿勢を提示し、さらに土木構造物の計画、設計、地震直後および復旧の各事業段階に区分して、地震断層に対する対応の工夫および対策技術を体系的に考察した。

2. 既往地震履歴による地震断層の発生特性および土木構造物の被害特性に関する検討

(1) 地震断層の発生特性

松田²⁾によると、我が国での活断層数は約2,000であり、そのうち活動度がA級の断層数が80程度、B級のものが700以上とされているが、過去100年余の間における顕著な地震断層の発生数はそれほど多くない。日本における地震断層の変位量とマグニチュードの関係例として、松田²⁾は日本国内における1891年濃尾地震から

表-1 活断層のマグニチュードと最大変位量の関係³⁾

log(MD) = a + b * M				
活断層形態	係数		データの範囲	
	a	b	活断層数	マグニチュード
横ずれ断層	-7.03	1.03	43	5.6~8.1
逆断層	-1.84	0.29	21	5.4~7.4
正断層	-5.9	0.89	16	5.2~7.3
全断層	-5.46	0.82	80	5.2~8.1

1970年秋田県南東部地震までの14の地震における19の断層(うち、地震断層は9断層)の履歴から、地震のマグニチュードと断層変位量を関係付けている。なお、代表的な地震断層は1891年濃尾地震(M=8.0)の根尾谷断層(左横ずれ:8m)、1930年北伊豆地震(M=7.3)の丹那断層(左横ずれ:2m)、1945年三河地震(M=6.8)の深溝断層(逆断層:2m)等であるが、これら以外で最近活動した活断層としては兵庫県南部地震(M=7.2)の際の野島断層(右横ずれ:2m)がある。

また、断層の発生形態を考慮した断層変位量とマグニチュードの関係例として、Wells & Coppersmith³⁾は1957年~1993年の期間における世界の80の地震断層の特性を整理して、地震のマグニチュード(M)と地震断層の最大変位量(MD:m)を関係付けている(表-1参照)が、地震断層の発生形態、つまり横ずれ断層、逆断層および正断層別に整理するとともに、これらを集約した全形態についても関係を明示している。ここで、表-1における原データには松田²⁾のデータが含まれているが、同表によると横ずれ断層の最大変位量は14.6mであり、逆断層および正断層ではそれぞれ6.5mおよび6.1mである。なお、1999年台湾・集集地震での上下方向の最大変位量は10m程度である⁴⁾。

さらに、松田²⁾は日本の活断層の動き方にかかわる性質として、①間欠的に活動する、②いつも同じ向きにずれる、③ずれの速さは断層毎に大きく異なる、④1回のずれ量は最大数メートル、⑤マイペースで動く:活動間隔やずれの量(=地震の規模)は断層ごとにほぼ決まっている、⑥活動間隔はきわめて長い、⑦長い断層ほど大地震をおこす、⑧東西圧縮のもとでずれる:断層のずれの向きに日本列島に共通した規則性がみられることを指摘している。

以上の地震断層の既往履歴によれば、土木構造物と地震断層について以下の関係を読みとることができる。

- 1) 地震断層の発生形態により最大変位量は異なり、逆断層および正断層の最大変位量は横ずれ断層より小さく、地震断層で想定される最大変位量は横ずれで15m程度、上下方向のずれで10m程度である。
- 2) マグニチュードの規模により地震断層の発生の有無あるいは形態が異なること、地震断層のずれの方向およびその量(=変位量)は個々の地震断層毎にほぼ決

まっていることから、土木構造物において工学的に対象とすべき地震断層の選択とその影響を評価するための地震断層の特性の設定は可能である。

(2) 地震断層による土木構造物の被害特性

近年の地震断層に起因する土木構造物の主な被害事例を表-2に示す^{4)~6)}。地震断層による土木構造物の被害は、地震断層の発生形態、土木構造物と地震断層の交差角度、土木構造物の構造特性および要求される機能等の諸要因によって異なる。従って、工学的視点により対象とすべき地震断層の特性は、単に現象として出現する変位量(本文では、「発生変位量」と呼ぶ)ではなく、上記の諸要因が加味された直接的に土木構造物の被害に関係する変位量(本文では、「影響変位量」と呼ぶ)である。このため、表-2では地震断層の変位量を「発生変位量」と「影響変位量」で区分した。例えば、断層の変位量と呼ぶ場合は「発生変位量」を意味しており、橋桁の移動量、相対変位量あるいはずれ変位と呼ぶ場合は「影響変位量」を意味する。

同表によれば、集集地震において、「稗豊橋」では橋梁を横断する地震断層により落橋したが、川島⁵⁾は橋軸直角方向の水平移動量および橋軸と地震断層との交差角度から水平方向の断層の変位量を6m、橋軸方向の桁の移動量を4.5mと推定し、桁の掛け違い長(0.3~0.4m)よりもかなり長いとしている。一方、上下方向は桁両端の相対変位を3mと見込み、これによる橋軸方向の桁のずれ変位(0.18m)は大きくないとしている。同様に落橋した「烏溪橋(旧橋)」では橋軸直角方向の水平移動量および交差角度から、断層の変位量を3.1m、橋軸方向の桁の水平移動量を2.4mと推定している。また、兵庫県南部地震の際、建設中の明石海峡大橋は震源近傍に位置しており、地震前に全長3,910mであった橋長が3,911mに拡大したが、2Pおよび3Pの主塔間の橋軸方向および橋軸直角方向の相対変位量はそれぞれ0.78mおよび0.82mであった⁷⁾。ここで、主塔間において地震断層の発生の有無は確認されていないが、仮に主塔間を横切る実在の断層と同じ方向に地震断層が発生し、主塔位置と同じ相対変位を生じたとして、周辺の活断層分布から交差角度を45°と仮定すると、地震断層の水平方向の発生変位量は1.02mと推算される。

一方、河川構造物では、集集地震において石岡堰が上下方向の約10mの断層変位による洪水吐の決壊被害を受けている⁴⁾。また、平坦道路の一例として、1990年フィリピン・ルソン島地震の際、道路を横断する変位量約5mの地震断層によりコンクリート舗装が横ずれをしているが、その変位量は2車線の内の1車線分相当(推定2.5m程度)であり、路肩の余裕から致命的な被害に至っていない事例⁸⁾もある。

表-2 地震断層による土木構造物の被害事例と変位量

構造物	地震名	被害構造物	構造特性と被害	地震断層特性		影響変位量	文献
				発生変位量	交差角度		
橋梁	1999年台湾集集地震	神豊橋	1 3 径間単純桁：径間長約 2.5 m 3 径間が落橋	水平 6.0 m 上下 3.0 m	42° —	橋軸：水平変位 4.5 m 橋軸直角：水平変位 4.0 m	5)
	1999年台湾集集地震	烏溪橋（旧橋）	1 7 径間単純桁：径間長約 3.0 m 2 径間が落橋	水平 3.1 m 上下 1.8 m	40° —	橋軸：水平変位 2.4 m 橋軸直角：水平変位 2.0 m	
	1999年トルココジャエリ地震	Arifiye橋	4 径間単純 P C 斜橋 径間長 2.6 m	水平 4.0 m	65°	橋軸：水平変位 1.69 m 橋軸直角：水平変位 3.63 m	6)
	1995年兵庫県南部地震	明石海峽大橋	工事中 橋長 3, 9 1 0 m が 1 m 拡大	水平 1.02 m *	45° *	橋方向 0.78 m 橋軸直角方向 0.82 m	7)
堤防・道路盛土・平坦道路	1999年台湾集集地震	石岡堰	重力式コバルダム：堤高 2.5 m 洪水吐の伏壊	上下 10 m	60°	上下変位 約 10 m	4)
	1990年フィリピンソロン島地震	リサール郊外の平坦道路	コンクリート舗装道路	水平 5 m	—	水平 2.5 m 程度 *	8)
埋設管	1999年台湾集集地震	送水管	鋼製：管径 φ 2 m Z 字型に変形	上下 7 m	—	上下 7 m 水平 3 m（推定）	9)
		ガス導管	φ 1 0 0 mm、φ 2 0 0 mm Z 字型に変形	—	—	上下 0.2 m（推定） 水平 1.2 m（推定）	9)
	1999年トルココジャエリ地震	排水ヒューム管	コンクリート製：管径 φ 1. 4 m 管の横ずれ	水平 3.5~4.3 m	90°	軸線直角：水平変位 3.6 m	6)

*：本研究の推定による

さらに、埋設パイプラインについて、鈴木ら⁹⁾は集集地震の際に発生した鉛直 7m の逆断層変位による鋼製送水管の圧縮変形による被害に関して、FEM 変形解析により鉛直 7m、水平 3m の変位量を想定して送水管の変形を再現している。また、φ100mm および φ200mm のガス導管の屈曲変形状況を解析で再現し、逆断層の変位量を鉛直 0.2m、水平 1.2m と推定している。さらに、コジャエリ地震における φ1.4m の排水ヒューム管の横ずれ被害については、軸線直角方向に 3.6m の変位量が報告されている⁶⁾。

以上の被害事例によれば、土木構造物と地震断層について以下の関係を読みとることができる。

- 1) 土木構造物の構造形態、地震断層の発生形態および両者の相互関係により、土木構造物に対する地震断層の影響の有無、程度および被害形態が異なる。
- 2) 構造物の被害に関与するのは、地震断層の発生変位量ではなく、構造物の挙動に係わる影響変位量である。
- 3) 影響変位量の規模は、発生変位量を上限とし、地震断層と構造物の軸線との交差角度あるいは橋梁の径間長等の構造形態に関係する。
- 4) 平坦道路のように、地震断層による被害を受けた場合でも、機能の一部が保持されることにより致命的な被害に至らない場合がある。

(3) 地震断層と土木構造物の被害形態の関係

地震断層の発生形態として正断層および逆断層による上下方向のずれおよび横ずれ断層による水平方向のずれがある。実現象として両方向のずれが同時に発生する場合もあるが、その場合は方向別に分けて考えることとし、本文では①横ずれ断層による圧縮方向の作用あるいは引張方向の作用、②正断層による引張方向の作用および③逆断層による圧縮方向の作用に大別する。さらに、

地震断層による土木構造物への影響は土木構造物の構造形態によっても異なることから、橋梁、堤防・道路盛土および埋設管のそれぞれの構造形態に対して地震断層の発生形態を対応させると、両者の関係は図-1(a)、(b)および(c)により概念的に対応付けることができる。ここで、地震断層と構造物は、橋梁の橋軸方向、堤防・道路盛土の縦断方向および埋設管の管軸方向に対する地震断層の交差角度あるいは傾斜角度で関係付けられる。

つまり、橋梁の場合、横ずれ断層および正断層による引張方向の作用により、桁と下部工が離れる方向の変位によって桁の落下等が発生し、横ずれ断層および逆断層による圧縮方向の作用により、桁と下部工が近づく方向の変位によって衝突等が発生する。また、堤防や盛土のような土構造物の場合、横ずれ断層により堤体の軸方向の断面積の連続性に欠損が生じ、逆断層や正断層により堤体の軸方向の天端高や河床高に不陸が発生する。さらに、埋設管の場合、管路の周辺地盤の拘束により、管路の変形は地震断層近傍で局所的に発生するが、横ずれ断層および正断層による引張方向の作用により埋設管に曲げや伸びが発生し、横ずれ断層および逆断層による圧縮方向の作用により埋設管の圧壊が発生する。

3. 簡易モデルによる土木構造物に対する地震断層の影響に関する検討

本章では、地震断層による発生変位量と土木構造物への影響変位量の関係を定量的に把握するために、代表的な構造特性を有する橋梁、堤防・道路盛土および埋設管を対象として、地震断層とこれらの構造物との関係を簡易モデルにより模擬して基礎的な検討を行った。

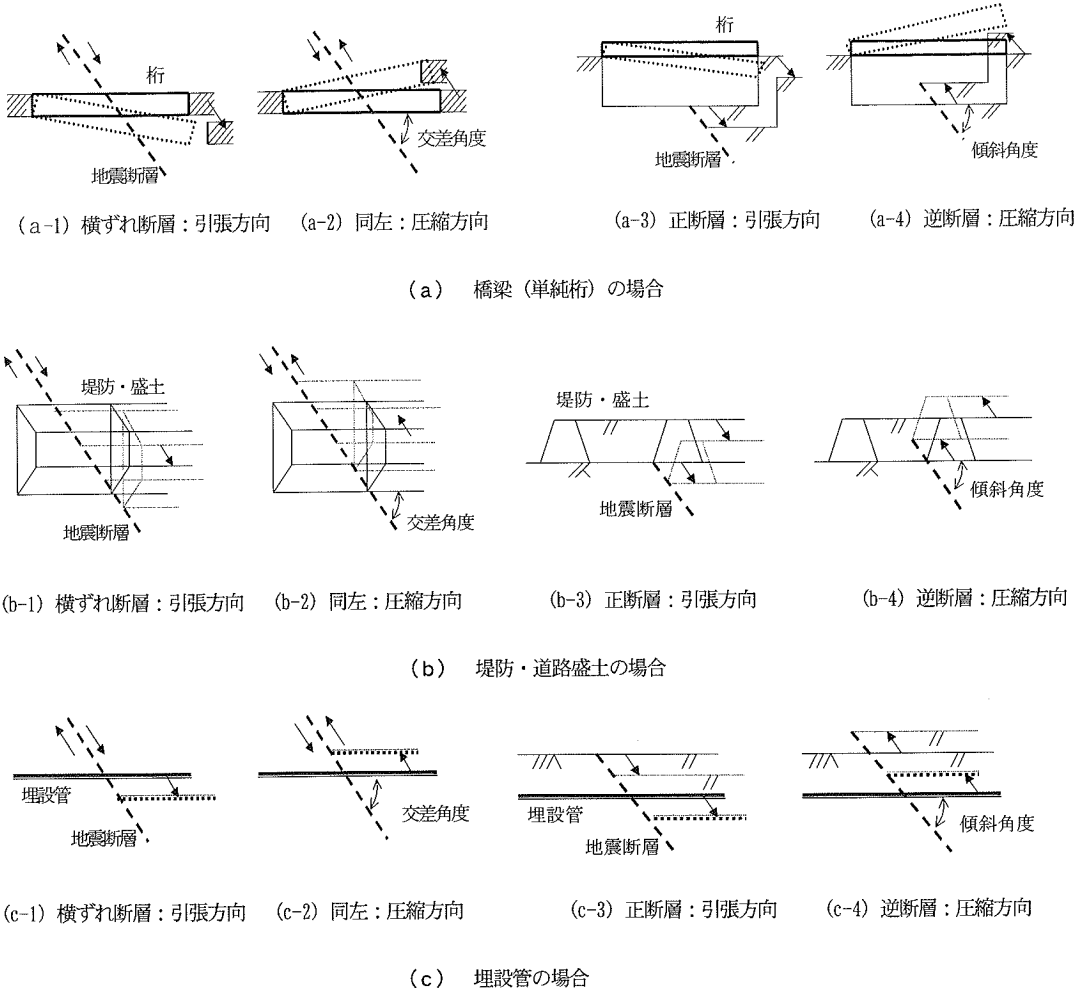


図-1 地震断層の発生形態と土木構造物の構造形態の関係の概念

(1) 橋梁

橋梁の場合、地震断層の影響は地震断層を横断する橋桁と下部工との相対的なずれ量が問題となる。特に、引張方向のずれは桁の落下が想定されるので、ここでは図-2のように地震断層と橋桁の引張方向の関係を簡易にモデル化する。つまり、 P_1 および P_2 を支承位置とする支間長が L である単純桁に対して、左横ずれ断層A-Aが橋軸方向に対して交差角度 θ ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)で交差している場合において、変位量 D で左横ずれが発生すると想定する。この際、桁の動きを単純化するために、 P_1 は不動点として P_2 側が(発生)変位量 D で相対移動するものとし、下部工側の P_2 相当位置が P_2' に移動するのに伴って、桁側の P_2 は P_2' 方向に回転移動すると想定する。そして、地震断層による桁への影響として、 P_2' と P_2 間の橋軸方向の相対変位量および橋軸直角方向の相対変位量に着目する。これらの相対変位量は図-2に基づいて、それぞれ式(1)および式(2)で算出できる。

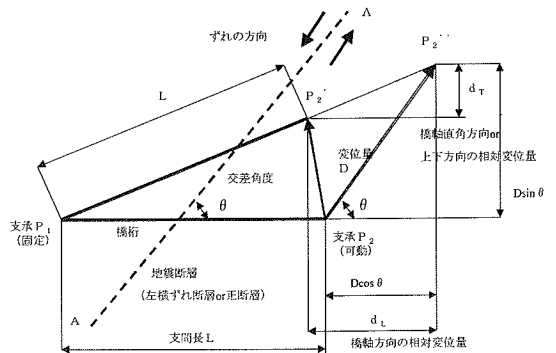


図-2 地震断層の変位と橋桁の移動のモデル化

$$d_L = (D \cos \theta + L) \left\{ 1 - \frac{L}{\sqrt{(L + D \cos \theta)^2 + (D \sin \theta)^2}} \right\} \quad (1)$$

$$d_T = (D \sin \theta) \left\{ 1 - \frac{L}{\sqrt{(L + D \cos \theta)^2 + (D \sin \theta)^2}} \right\} \quad (2)$$

ここで、

d_L : 橋桁と下部工の橋軸方向の相対変位量 (m)

d_T : 橋桁と下部工の橋軸直角方向の相対変位量 (m)

D : 地震断層の (発生) 変位量 (m)

L : 地震断層を横断する橋桁の支間長 (m)

θ : 橋軸方向と地震断層の水平方向の交差角度 ($^\circ$)

($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)

簡易モデルの妥当性に関しては被害事例への適用が考えられるが、表-2に示すように被害事例が少ないこと、被害事例があったとしても断層変位量が不明あるいは間接的な推定値であるために、適用が困難である。例えば、表-2の卑豊橋および鳥溪橋における断層の発生変位量は交差角度と桁の橋軸直角方向の移動量からの間接的な推定値であり、唯一 Arifiye 橋において断層変位量と橋軸との交差角度が1次情報として得られている。そこで、Arifiye 橋に対して式(1)および式(2)を適用すると、 d_L および d_T は、それぞれ 1.91mおよび 0.25mと推定できる。これによると、橋軸直角方向の相対変位量は小さいので、橋軸方向の大きい相対変位量により桁が外れて落下したと推察される。

式(1)により交差角度および支間長を変数として橋桁と下部工の橋軸方向の相対変位量を試算したが、図-3は $\theta=90^\circ$ および 60° で、支間長(L)が25m, 50mおよび100mにおける橋軸方向の相対変位量である。

図-3によれば、交差角度が 90° の場合、いずれの支間長についても変位量の増加に伴って橋軸方向の相対変位量は増加するが、全体的に相対変位量は小さく、例えば、 $L=25m$ の場合、変位量が8mであっても相対変位量は1.19mに過ぎない。また、支間長が大きい程相対変位量は小さい。言い換えれば、 $L=100m$ の場合、橋軸方向の相対変位量が1m程度まで許容されるとすると、対応できる地震断層の発生変位量は14m程度と想定できる。

一方、交差角度 60° の場合、支間長の増加による相対変位量の低減の度合いは交差角度 90° の場合よりも小さく、支間長の増加による相対変位量の低減はそれほど期待できない。また、交差角度が 90° の場合と比較して相対変位量の絶対値も大きい。

図-3の結果から、地震断層の変位量、交差角度および

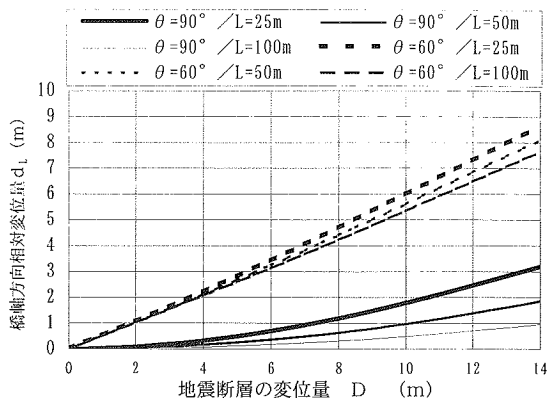


図-3 地震断層の変位量と橋桁の橋軸方向の相対変位量

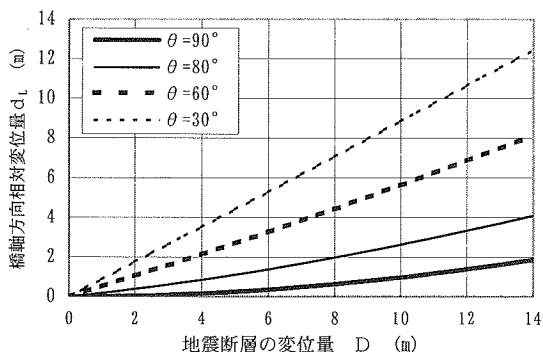


図-4 橋桁の橋軸方向の相対変位量と交差角度(L=50m)

橋桁の支間長により橋軸方向の相対変位への影響が異なることが明らかとなったが、 $L=50m$ の場合について相対変位量に対する交差角度の影響を図-4に例示する。同図によれば、交差角度が 90° から低減するのに伴って相対変位量は急増する。

一方、式(2)より交差角度および支間長を変数として橋桁と下部工の橋軸直角方向の相対変位量を試算したが、図-5は $\theta=90^\circ$ および 60° で、支間長が25m, 50mおよび100mの場合の結果である。図-5によれば、いずれの支間長についても変位量の増加に伴って橋軸直角方向の相対変位量は増加するが、交差角度が 90° の場合の相対変位量はかなり小さく、支間長が大きい程、相対変位量は小さい。さらに、橋軸方向と同様に交差角度が 90° から 60° へ低減するのに伴って相対変位量は増加する。

さらに、図-6(a)および(b)はそれぞれ $\theta=90^\circ$ および 60° で、支間長が25m, 50mおよび100mの場合の橋軸方向と橋軸直角方向の相対変位量を比較した結果である。

図-6(a)によると、橋軸方向の相対変位量は橋軸直角方向の相対変位量よりも大きい。また、支間長の増加による相対変位量の減少率は橋軸直角方向の方が橋軸方向よ

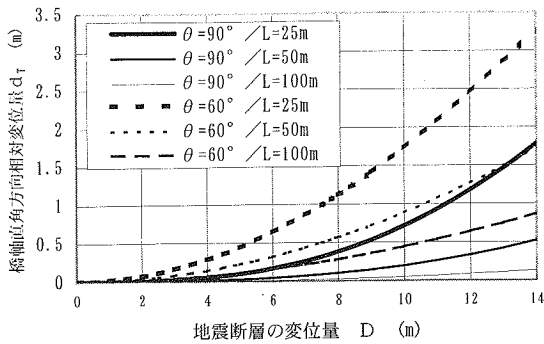


図-5 地震断層の変位量と橋桁の橋軸直角方向の相対変位量

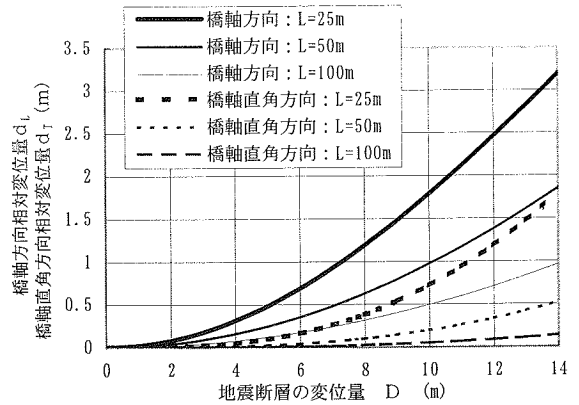
りも大きい。また、図-6(b)の交差角度が 60° の場合、橋軸方向の相対変位量は橋軸直角方向の相対変位量よりも大きいのは交差角度が 90° の場合と同様であるが、橋軸直角方向の相対変位量に対する橋軸方向の相対変位量の倍率は交差角度が 60° の場合の方が大きい。また、支間長の増加による相対変位量の減少率は、交差角度が 90° の場合と同様に橋軸直角方向の方が橋軸方向よりも大きい。

一方、上下方向の断層変位の場合、正断層の引張方向の作用による桁の落下が想定されるが、この場合の地震断層と橋桁の関係は図-2の平面図を立面図に置き換え、交差角度を傾斜角度に読み替えることによりモデル化できる。この場合、橋軸方向の相対変位 d_L は水平方向の結果(図-3、図-4および図-6)と同様であり、変位量 d_T は支承 P_2 が落下しないとした場合の上下方向の相対変位量と読み替えられるので、図-5および図-6と同様な特性となる。つまり、橋軸方向と上下方向の相対変位量は地震断層の変位量の増加に伴い増加するが、支間長あるいは傾斜角度を大きくすると低減する。また、橋軸方向の相対変位量は上下方向のそれよりも大きい。

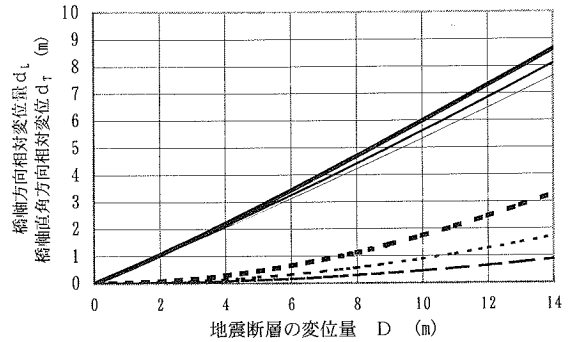
なお、逆断層あるいは図-2での右横ずれ断層のように地震断層と橋桁が圧縮方向の関係ある場合は、落橋しなくとも桁端部の圧壊や隣接桁への影響等が想定されるので、引張関係への移行、橋軸方向との相対的な傾斜角度の直交化あるいは支間長の拡大等により地震断層の影響を低減するのがよい。

(2) 堤防・道路盛土

堤防あるいは道路盛土(以下、堤防等)は地震断層により構造的に直接的な作用を受けるが、堤防等と地震断層の関係を図-7で簡易にモデル化する。つまり、横ずれ断層A-Aが堤防等の軸方向に対して交差角度 θ ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)で交差している場合において、(発生)変位量Dで左横ずれを発生すると想定する(右横ずれでも同様)。この際、地震断層位置における堤防等の断面につ



(a) 交差角度 $\theta=90^\circ$



(b) 交差角度 $\theta=60^\circ$

図-6 橋桁の橋軸方向と橋軸直角方向の相対変位量

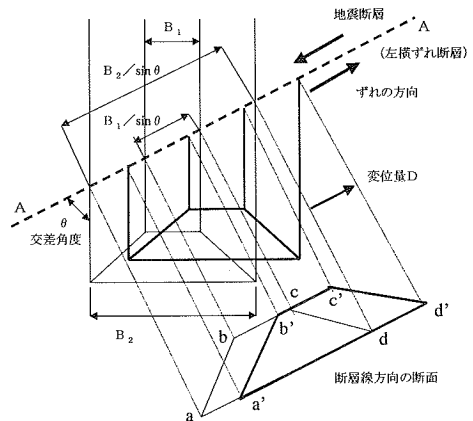


図-7 地震断層の変位と堤防等の移動のモデル化

いて、移動前の $a-b-c-d$ が移動後に $a'-b'-c'-d'$ に移動したとする。地震断層による堤防等への影響について、本文では「堤体積の残存の程度」、つまり断面 $a-b-c-d$ と断面 $a'-b'-c'-d'$ の重複部分を堤防等の横断方向へ投影した面積を残存断面積 A_r 、また重複

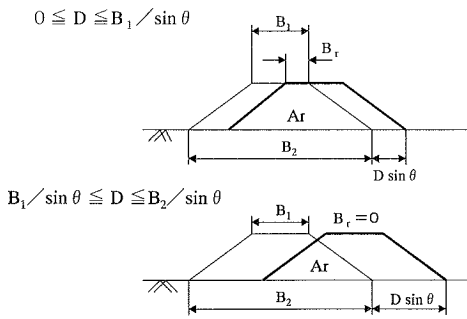


図-8 堤防等の残存断面積および残存天端幅

部分の天端を横断方向へ投影した残存天端幅 B_r と定義する。したがって、図-8 に基づいて、残存断面積 A_r は式(3)、また残存天端幅 B_r は式(4)で算定できる。

$$0 \leq D \leq B_1 / \sin \theta$$

$$A_r = \frac{H}{2} \times (B_1 + B_2 - 2D \sin \theta) \quad (3-1)$$

$$B_r = B_1 - D \sin \theta \quad (4-1)$$

$$B_1 / \sin \theta \leq D \leq B_2 / \sin \theta$$

$$A_r = \frac{H}{2} \times \frac{(B_2 - D \sin \theta)^2}{(B_2 - B_1)} \quad (3-2)$$

$$B_r = 0 \quad (4-2)$$

ここに、

A_r : 堤防等の横断方向の残存断面積 (m²)

B_r : 堤防等の横断方向の残存天端幅 (m)

D : 地震断層の(発生)変位量 (m)

B_1 : 天端幅 (m)

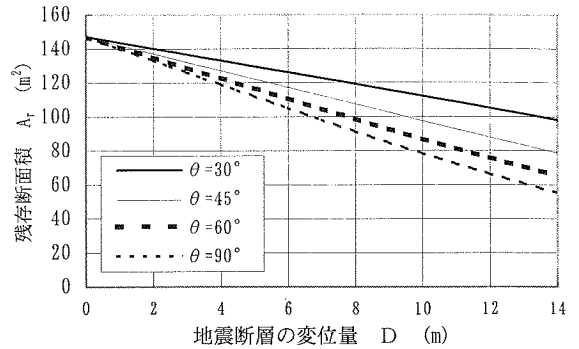
B_2 : 底面幅 (m)

H : 堤高 (m)

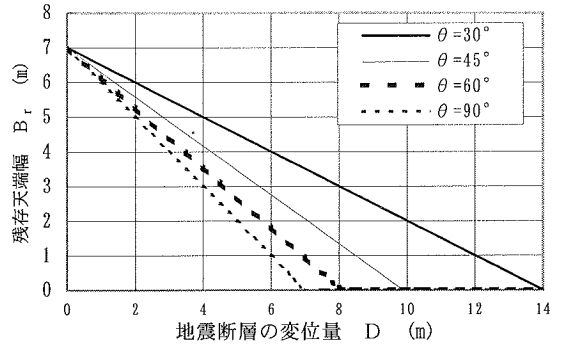
θ : 交差角度 (°) ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)

ここで、天端幅、底面幅および堤高をそれぞれ 7m、35m および 7m と仮定した堤防等について、式(3)および式(4)に基づいて、交差角度を変数として残存断面積を試算した。図-9(a)および(b) はそれぞれ $\theta = 30^\circ$ 、 45° 、 60° および 90° の場合について、地震断層の変位量に対応した堤防等の残存断面積および残存天端幅を示す。

図-9によれば、同一の変位量に対して交差角が大きいほど横断方向の残存断面積あるいは残存天端幅は小さくなる。また、天端部分が残存する限界の変位量は、 $\theta = 30^\circ$ 、 45° 、 60° および 90° の場合について、それぞ



(a) 残存断面積と交差角度



(b) 残存天端幅と交差角度

図-9 地震断層位置における横断方向の堤防等の残存断面積および天端幅(試算例)

れ 14.0m、9.90m、8.08m および 7.0m であり、交差角度が小さいほど大きな地震断層の変位量に対して、部分的ではあるが天端が残存した状態となる。

なお、正断層あるいは逆断層による影響については、図-1(b)に示すように地震断層の傾斜角度が関係してくるが、いずれの場合も傾斜角度が小さいほど堤防等の天端の上下方向のずれ変位が小さくなることが想定できる。

(3) 埋設管

埋設管の場合、地震断層の影響は地震断層を横断する管路の圧縮あるいは引張が問題となるが、本文では圧縮方向となる横ずれ断層を想定し、埋設管と地震断層の関係を図-10 で簡易にモデル化する。ここで、地震断層による管路の変形形態を簡易的に表現するために、管路の周辺地盤の拘束は無い状態を想定する。つまり、埋設管の軸と交差角 θ ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) で交差する地震断層 A-A' が(発生)変位量 D で左横ずれすることにより、 P_1 および P_2 の 2 点間で想定した変状区間の延長 L が L' に変動したとする。埋設管の動きを単純化するために、 P_1 は不動点として P_2 側が変位量 D で P_2' に相対移動するとする。地震断層による埋設管への影響につい

て、本文では「当初の想定変状区間長に対する変状後の区間長の変化の程度」、つまり想定変状区間長 L の変化比に着目する。この場合、想定変状区間長の変化比 L_r は式(5)で算定できる。ここで、便宜的に変状区間長を想定するのは、地震断層の特性が埋設管に与える影響をマクロに把握するために埋設管の変形程度を表す指標が必要であることから、その一つとして或る区間における平均的な変形状態(ここでは、引張ひずみあるいは圧縮ひずみ)に着目したためである。さらに、後述の地震断層対策として提示している、埋設管の地上横断化や周辺地盤の低剛性化の対策範囲等を明らかにするためである。

$$L_r = \frac{L'}{L} = \frac{1}{L} \times \sqrt{(D \sin \theta)^2 + (L - D \cos \theta)^2} \quad (5)$$

ここに、

- L_r : 想定変状区間長の変化比
- L : 想定変状区間長 (m)
- L' : ずれた後の想定変状区間長 (m)
- D : 地震断層の(発生)変位量 (m)
- θ : 交差角度 ($^\circ$) ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)

想定変状区間長を 10m および 30m と仮定した埋設管について、式(5)により地震断層の変位量および交差角度を変数として変化比 L_r を試算した。図-11(a)および(b)はそれぞれ想定変状区間長が 10m および 30m の場合について、地震断層の変位量に対応した想定変状区間長の変化比を示す。

図-11(a)によれば、想定変状区間長が 10m の場合、交差角度が 90° ではないずれの変位量に対しても変状区間長の変化比は 1.0 以上で引張が作用し、変位量の増加に伴って変化比は増加する。一方、交差角度が 90° 未満の場合、変位量の増加に伴う変化比は 1.0 より小さく圧縮が作用するが、或る変位量以上になると変化比は増加に転じ、交差角度が大きい場合は 1.0 以上となり引張が作用する。なお、変化比が増加に転ずる変位量は、 $\theta = 30^\circ$ 、 60° および 80° に対して、それぞれ 8.66m、5.0m および 1.74m である。

ここで、埋設管の想定変状区間長の変化比について、仮に $\pm 20\%$ が許容範囲とすると、 $\theta = 30^\circ$ 、 60° 、 80° および 90° での地震断層の限界変位量はそれぞれ 2.42m、13.31m、8.59m および 6.63m となり、橋梁あるいは堤防等と異なり交差角度による一義的な傾向は見られない。しかし、許容範囲が $\pm 10\%$ の場合、 $\theta = 30^\circ$ 、 60° 、 80° および 90° での地震断層の限界変位量はそれぞれ 1.18m、2.58m、6.64m および 4.58m となり、交差角度が大きい (80° あるいは 90°) ほど限界変位量が多い。

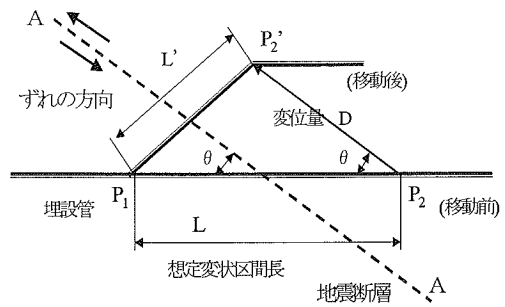
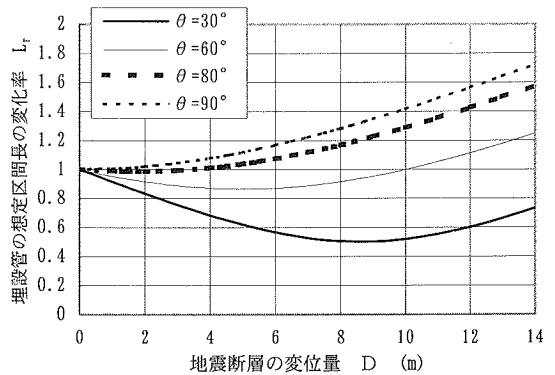
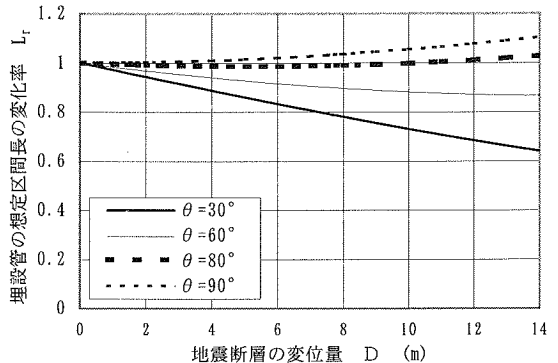


図-10 地震断層の変位と埋設管の想定変状区間長の移動のモデル化



(a) 想定区間長: 10mの場合



(b) 想定区間長: 30mの場合

図-11 埋設管の想定変状区間長と交差角度

一方、図-11(b)によれば、想定変状区間長が 30m の場合、交差角が 90° での変位量についても変化比は 1.0 以上であり引張が作用し、変位量の増加に伴って変化比は増加するが、想定変状区間長が 10m の場合に比較して微増である。一方、交差角度が 90° より小さい場合、変位量の増加に伴う変化比は 1.0 より小さく圧縮作用が見られるが、交差角度が 80° では変位量 5.21m 以上で変化比は増加に転じ、さらに変位量 10.42m では 1.0 以上になり引張が作用する。しかし、交差角度が 30° および

60° での変化比は低減のみの傾向にあり、増加に転ずるのは 14m を超える変位量にある。ここで、埋設管の想定変状区間長の変化比について、許容範囲を±20%とすると、 $\theta=30^\circ$ の場合の限界変位量は 7.25m であるが、 $\theta=60^\circ$ 、 80° および 90° では変位量 14m において許容範囲にある。また、許容範囲が±10%の場合、 $\theta=30^\circ$ 、 60° および 90° での限界変位量は、それぞれ 3.53m、7.65m および 13.75m であるが、 $\theta=80^\circ$ での限界変位量は 14m を越えており、交差角度が大きいほど限界変位量を大きくできる。

一方、図-10 で右横ずれ断層を想定して地震断層と橋桁が引張方向の関係ある場合は、圧縮方向と異なり交差角度、想定変状区間長あるいは地震断層の変位量に係わらず引張状態にあるために、交差角度を大きくすることにより、地震断層による影響変位量を低減できる。

なお、逆断層あるいは正断層の影響については、それぞれ圧縮方向あるいは引張方向の横ずれ断層と同様な挙動が上下方向に発生するが、図-10 の平面図を立面図に置き換えることによりモデル化できるので、横ずれ断層と同様な特性となる。

(4) まとめ

地震断層と橋梁、堤防等および埋設管の簡易モデルによる計算結果により、地震断層の影響およびその対応について以下の知見が得られた。

1) 地震断層を横断する橋梁について、地震断層により単純桁が落下する左横ずれ断層あるいは正断層に関する簡易モデルによれば、支間長の増加により地震断層による橋軸方向の相対変位量 (=影響変位量) を低減できる。また、いずれの支間長でも交差角度の増加により橋軸方向の相対変位量を低減でき、交差角度が 90° の場合が最小となる。ここで、交差角度の低減に伴って、支間長の増加による相対変位量の低減効果は低下する。

一方、地震断層による橋軸直角方向の相対変位量は橋軸方向と同様に、支間長あるいは交差角度の増加により低減できる。また、橋軸直角方向の相対変位量は橋軸方向のそれより小さく、支間長の増加による相対変位量の減少率は橋軸方向よりも大きい。

2) 地震断層を横断する堤防等について、基礎地盤の地震断層による横ずれ変位に追従する堤防等の簡易モデルによれば、交差角度が小さいほど断層位置における堤防等の残存断面積あるいは残存面積率を大きくできる。換言すれば、交差角度を小さくするほど大きな地震断層の変位量に対して堤防等の天端を残存させて堤防等の機能を保持できる。

3) 地震断層を横断する埋設管について、周辺地盤の拘束を除いて地震断層により発生する平均的な変形状

態を想定した想定変状区間長による埋設管の簡易モデルによれば、想定変状区間長を長くするほど横ずれ断層あるいは正・逆断層の変位量の影響を低減できる。また、変状区間長が小さい場合であっても、適当な交差角度により変位量の影響を低減することができる。

従って、地盤の拘束が無い場合、管路はある程度の自由度をもった変形追従性が期待できるので、水平方向あるいは上下方向のいずれの方向についても、地震断層を横断する位置において地盤の拘束を低減、除去することによる対策が有効である。

4. 地震断層に対する既存技術の適用性の検討

地震断層の変位に対する対策について、これまでは回避する以外に特別考慮されることは皆無であったが、道路、堤防等あるいは埋設管のように長尺な土木構造物の場合は回避が困難となることが想定される。その場合、地震断層に対する工学的な対応を考える前提として、現行の設計法あるいは耐震技術により対応が可能な断層変位量を明らかにし、既存技術の適用範囲を把握しておくことが必要である。

そのため、本章では橋梁、堤防・道路盛土・平坦道路および埋設管に関する現行の設計法あるいは技術において、地震断層による変位量に関係付けられると思われる事項について表-3 により例示的に整理し、以下の通り検討した。

(1) 橋梁

橋梁の場合、道路橋示方書・耐震設計編¹⁰⁾ではけたかかり長が地震断層の変位に対して有効と考えられるが、現行の示方書が対象とする橋長 200m までの橋梁では橋桁の落下を防止するために、橋軸方向のけたかかり長の最小値として最大で 1.7m の変位量が想定されているので、1.7m 程度の変位量に対しては現行の設計法で対応できると考えられる。また、免震橋における継手部での大変位に対する構造として提案されている大変位吸収システム¹²⁾は、橋軸方向の最大 0.6m までの変位に対応できる構造である。

さらに、近年開発されている免震支承は通常 0.5m 程度の変位を想定して設計されているが、支承の規模により技術的にはかなりの変位量までの対応が可能である。例えば、Friction Pendulum Bearing (FPB) 支承では橋軸方向および橋軸直角方向の最大で 1.2m までの変位に耐える構造も開発されており、米国の Benicia-Martinez 橋に適用されている¹³⁾。また、米国の Coronado 橋では近傍の活断層で推定されている約 0.5~0.8m の移動量に対して免震支承を採用している¹³⁾。さらに、Thorndon

表-3 地震断層による影響変位量に対する既往技術の適用性

構造物	適用性の検討事項	現状技術により可能な変位量想定の見所		想定最大変位量		文献
				水平	上下	
橋梁	1. けたかかり長	道路橋示方書・耐震設計編	最小値: $S_{0m}=70+0.5L$ 200m $\geq L$ (支間長)	≥ 1.7 m	—	10)
	2. たわみの許容値	道路橋示方書・鋼橋編	鋼げた形式: $L/2000 \sim L/500$ (m) 吊橋形式: $L/350$ (m) L: 支間長 (m) 例: 鋼桁 $L=200$ m, 想定: 端部=中央 $\times 2$	—	例 0.8 m	11)
	3. 桁端変位吸収	大変位吸収システム	産装の破損は容認	0.6 m	—	12)
	4. 免震支承	実橋: Coronado橋 (米国)	断層用耐震補強	0.5 ~ 0.8 m	—	13)
		実橋: Benicia-Martinez橋 (米国) トラス橋・最大支間長161 m	断層用耐震補強 FPB 支承	1.2 m	—	
	5. けたかかり長の拡大	実橋: Thorndon高架橋 (ニュージーランド)	断層用耐震補強: キャタリバー桁の落下防止 特異条件: 吊桁端が橋脚に近い(4 m程度)	橋脚間4.3 m (断層変位5 m)	—	14)
	6. 桁のサポートの増設	実橋: Coltonインターチェンジ高架橋 (米国)	断層用耐震補強: 桁のベント 橋脚新設	任意	—	15)
7. 新形式上部構造・基礎構造	実橋: リオン-アンティリオン橋 (ギリシャ)	断層変位を考慮した耐震設計 5 径間連続斜張橋・補強土上の主塔基礎	2 m	2 m		
堤防・道路盛土・平坦道路	1. 橋梁・高架の接続盛土部の沈下量	軟弱地盤対策工指針: S61.1.1	許容沈下量	—	0.1 ~ 0.3 m	16)
	2. 道路の縦断勾配	道路構造令	車道の縦断勾配: 設計速度60 km/h で5%+2 ~3% = 7 ~8% 例: 想定縦断線形修復延長100 m	—	例: 7 ~ 8 m	17)
	3. 堤防の沈下量の想定	河川堤防耐震点検マニュアル: H7.3	想定沈下量=(堤高) $\times 0.25 \sim 0.75$ 例: 堤高6 m	—	例: 1.5 ~ 4.5 m	18)
	4. 既往地震における堤防の沈下状況	既往地震による堤防の被害事例調査	最大沈下量 $S_{max}=0.75H$ H: 堤高(m) 例: 堤高6 m	—	例: 4.5 m	19)
埋設管	1. 液状化による管路の想定沈下量	下水道施設耐震設計指針: H9.8	δ (cm) = H_{FL} (m) $\times 0.05 \times 100$ 例: 液状化層厚 $H_{FL}=1.0 \sim 1.5$ m	—	0.5 ~ 0.75 m	20)
	2. 液状化による管路への側方流動の影響	下水道施設耐震設計指針: H9.8	影響を考慮しない流動量の上限	0.5 m	—	
	3. 液状化地盤の永久ひずみによる抜け出し量	下水道施設耐震設計指針: H9.8	設計用永久ひずみ1.5% 例: マンホールスパン30 m	例: 0.45 m	—	21)
	4. ガス導管の真直な配管系の管軸方向地盤変位吸収能力	一般(中・低圧)ガス導管耐震設計指針 S57.3	①溶接鋼管	例: 0.47 ~ 1.03 m	—	
			②都市ガス用ポリエチレン管	例: 2.45 ~ 5.9 m	—	
5. ガス導管の真直な配管系の管軸直角方向地盤変位吸収能力	一般(中・低圧)ガス導管耐震設計指針 S57.3	①溶接鋼管	—	例: 0.71 ~ 1.97 m		
		②都市ガス用ポリエチレン管	—	例: 0.23 ~ 0.53 m		

高架橋では約5mの断層変位により発生する橋脚間の離隔量4.3mに対する耐震補強として、橋脚に支持フレームを増設してキャンティレバー桁の落下防止を図っている¹⁴⁾。なお、Corlon インターチェンジ橋では活断層に対する耐震補強として、新たに橋脚を設置して既存橋の桁の落下防止を図っている¹⁴⁾が、このような橋脚増設によれば任意の大きさの断層変位に対して桁の落下防止が可能となる。

一方、上下方向の変位に関して、例えばたわみの許容値を参考にすると、道路橋示方書・鋼橋編¹¹⁾では鋼げた形式および吊橋形式について、それぞれ $L/2000 \sim L/500$ (m) および $L/350$ (m) (L: 支間長 (m)) をたわみの許容値としているが、仮に $L=200$ m とすると支間中央でのたわみ許容値は0.1~0.57mとなり、これを支間の相対変位に読み替えると、0.2~1.14m程度の上下方向の相対変位量となる。

(2) 堤防、道路盛土および平坦道路

橋梁や高架に接続する道路盛土について、軟弱地盤対

策工指針¹⁶⁾では許容残留沈下量を0.1~0.3mとしており、同程度の沈下は許容範囲と考えられる。また、道路構造の上下方向の変位に関係する指標として縦断勾配が考えられるが、道路構造令¹⁷⁾によると、例えば、設計速度が60km/hの場合、縦断勾配の上限値は7~8%である。ここで、発生した地震断層の変位に対して所定の走行性を確保するための道路構造の補修が必要な延長を50mと仮定すると、上下方向の地震断層の変位量は3.5~4mとなり、修復を前提とした許容変位量としてはこれらの変位量が想定できることになる。ただし、この許容変位量は想定する設計速度、縦断勾配及び補修延長等により変動するので、対応の水準設定の直接的な拠り所とはなり難い。

また、河川堤防での耐震点検マニュアル¹⁸⁾では堤防の被害形態毎の沈下量を0.25H~0.75H (H: 堤高 (m)) で想定している。これによると、例えば堤高が6mの場合の沈下量は1.5~4.5mと想定されるが、同程度の沈下に対しては浸水被害等を考慮して事前対策を行うことを想定している。さらに、我が国での内陸直下地震による

堤防の被害事例から被害前の堤防高 (H : m) と地震による最大沈下量 (S_{max} : m) は、 $S_{max} = 0.75H$ で関係付けられている¹⁹⁾。同式によれば、例えば堤高が6mの場合の最大沈下量は4.5mと算定されるが、地震の事後対応が必要とされる範囲として同程度の沈下量の発生が想定されていると考えられる。なお、文献19)によれば、既往地震による堤防の被害事例での最大沈下量は4.5m程度であり、これは現行の設計法が対象とする沈下量の限界と考えられる。

一方、地震断層による水平方向の変位の対応水準に関する拠り所は見当たらないので、本文では構造物の機能面から想定した。つまり、堤防の場合は断層線方向の堤体断面の欠損に着目し、横ずれ変位量が天端幅以下であれば、部分的にも堤高が確保されることから、通常の設計の範囲で対応が可能と考える。また、道路盛土の場合も堤防と同様に断層線方向の堤体断面の欠損に着目するが、道路の通行機能を部分的に確保する必要性を考え、横ずれ変位量が断層線方向の天端幅員の1/2以下であれば道路幅員の1/2以上が確保されることから、通常の設計の範囲で対応が可能と考える。

なお、平坦道路は道路機能の点から道路盛土と同様な扱いとするが、天端幅員は車線幅員と読み替える。

(3) 埋設管

埋設管について地震断層による変位への対応水準を考える拠り所として、下水道施設耐震対策指針²⁰⁾における液状化による想定沈下量が考えられる。同指針によれば、液状化層の層厚が10~15mの場合、想定沈下量は0.5~0.75mとなり、同程度の地盤の変位量に対して、可とう性継手等の構造で対処することになる。なお、液状化に起因する側方流動に関して、0.5m未満の地盤変位に対しては設計上の考慮は不要としている。なお、これらの地盤変位は或る広がりを持つ範囲で発生することが想定されているので、地震断層とは異なることに注意が必要である。

また、一般(中・低圧)ガス導管耐震設計指針²¹⁾では、真直ぐな配管系の管軸方向および管軸直角方向の地盤変位吸収能力を評価している。これは地盤上の1点に集中するような地盤変位が与えられた時に管が吸収できる地盤変位であり、地盤沈下等を想定しており断層変位を対象とはしていないが、地震断層と類似の現象と見なせられると思われる。試算例によれば、管軸方向の場合、溶接鋼管(基準ひずみ:3%)で10~60cmの管径の変位吸収能力は0.47~1.02m、また都市ガス用ポリエチレン管(基準ひずみ:20%)で2.5~8cmの管径の変位吸収能力は2.45~5.9mである。一方、管軸直角方向の場合、上記の管径の溶接鋼管の変位吸収能力は0.71~1.97m、同じく都市ガス用ポリエチレン管の変位吸収能力は

0.23~0.53mである。従って、管種や材料により変位吸収能力は異なるが、相当規模(1~2m)の変位量に対応できると考えられる。

(4) まとめ

変形量の視点から土木構造物の現行の設計法を検討した結果、地震断層に対する既存技術の適用性について以下のように考えることができる。

- 1) 橋梁での地震断層による影響変位量について、水平方向で概ね2m程度以下、上下方向で概ね0.5m程度以下の場合は、現行の耐震設計法あるいは耐震構造により対応が可能である。
- 2) 堤防、道路盛土あるいは平坦道路での地震断層による影響変位量について、水平方向で断層線方向の堤防の天端幅、道路盛土の天端幅員の1/2および平坦道路の車線幅員の1/2、上下方向で堤防、道路盛土の概ね4.5m程度以下については、現行の耐震設計法あるいは耐震構造により対応が可能である。
- 3) 埋設管での地震断層による影響変位量について、管種や材料によっては相当の変位量(例えば、1~2m)に対応できるが、やや安全側で考えると、地震断層による局所的な強制変位作用を受ける場合、変形量が小さい(例えば、0.5m)場合は現行の設計により変形の吸収能力が期待できる。

5. 地震断層に対する工学的視点と対策

(1) 地震断層に対する姿勢

地震断層による影響変位量の上限は発生変位量であるが、発生変位量と影響変位量を図-12の概念図で関係付ける。同図に示すように、発生変位量が大きくても影響変位量が小さければ、工学的な対応は異なることになるが、本文では発生変位量あるいは影響変位量に対する取り組みの姿勢を、「吸収する」、「追従する」および「避ける」の3形態に分類する²²⁾。

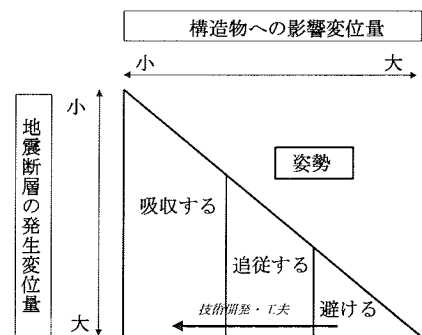


図-12 地震断層の変位量の関係と工学的な姿勢の概念

例えば、免震支承のように影響変位量が支承の応答の範囲にあり、損傷が生じない場合は断層変位を「吸収する」と考える。ただし、変位後には適宜支承を元の位置に戻す等の矯正が必要となる。また、けたかかり長の確保のように影響変位量による支承逸脱あるいは堤防の断層線方向の堤体断面の一部欠損のように、断層変位による損傷を許容するが致命的な破壊に到らない場合は断層変位に「追従する」と考える。ただし、桁の再設置、堤防の腹付け等による事後措置が必要となる。さらに、断層変位により橋桁の落下や埋設管の破壊等の致命的な被害が避けられず、かつ修復が困難で再構築が必要な場合は断層変位を「避ける」と考える。

ここで、「避ける」、「追従する」および「吸収する」の姿勢の順位は、技術的な対応の困難さと符号するので、「避ける」から「追従する」へ、あるいは「追従する」から「吸収する」へと対応を変化させることは、計画手法、設計法あるいは要素技術の開発、向上を意味する。

(2) 地震断層の対応の水準

土木構造物の被害程度およびその対応技術の水準に応じて影響変位量を区分するために、本文では前述の地震断層の既往履歴に基づいて、工学的に対象とすべき「発生変位量」の上限値として、横ずれ断層においては最大で15m程度、逆断層あるいは正断層においては最大で10m程度とする。これらの断層変位の上限値を基本として、簡易モデルによる計算結果及び既往技術の適用性に基づいて、橋梁、堤防・道路盛土・平坦道路および埋設管の構造形態に応じて、影響変位量(≦発生変位量)の工学的な対応の水準を表4で関係付けた。

つまり、上記の上限値を超える断層変位の領域は地震断層履歴がないと見なして「対象外」とし、上限値以下の断層変位の領域を2区分した。同表において、「現行の設計法・技術の範囲にあり対応可能」とは、既往の設計法あるいは技術によれば、断層変位を「吸収する」あるいは「追従する」対応が可能であることを意味する。

また、「技術開発・工夫により対応可能」とは、技術開発あるいは工夫によれば、断層変位に対して「避ける」→「追従する」→「吸収する」と対応を変化させることが可能であり、断層変位に充分対応できることを意味する。

これらの区分は、簡易モデルの計算結果によると、上限値以下の断層変位に対しては変位量に拘わらず工学的な対応が可能であることに基づいており、区分の境界となる影響変位量は構造物毎に次のように想定した。

橋梁の場合、水平方向については、けたかかり長の最小値あるいは免震支承の変位量等を勘案すると、影響変位量が2m程度以下であれば、現行の設計法あるいは技術の範囲で対応が可能と考える。また、上下方向については、たわみの許容量を安全側で考えると、影響変位量が0.5m程度以下であれば、現行の設計法等で対応が可能と考える。そして、水平方向あるいは上下方向のいずれにおいても、影響変位量がこれらの範囲を超える場合、地震断層との交差角度や径間長の工夫、けたかかり長の拡大、免震支承の構造改変等により対応が可能であるとする。

堤防・道路盛土・平坦道路の場合、上下方向については、構造の類似性から影響変位量が4.5m程度以下であれば、現行の設計法あるいは想定される地震被害の範囲にあるので、現行の設計法等で対応が可能と考える。

また、水平方向については、断層線方向の影響変位量が堤防の天端幅以下、道路盛土の天端幅の1/2以下であれば、堤防高さが部分的に確保され、車線幅員の半分以上が確保されることから、現行の設計法等で対応が可能と考える。そして、影響変位量がこれらの範囲を超える場合、余盛、腹付け等により対応が可能であるとする。

埋設管の場合、地震断層のように管周辺の地盤による拘束下にあるため、かなり限定的な変位作用を受けるので、水平方向および上下方向のいずれにおいても、影響変位量が小さい(例えば、0.5m程度)場合は現行の設計法等の範囲にあると考える。そして、その範囲を超える場合は、簡易モデルで模擬した地盤の拘束を除去ある

表4 地震断層による影響変位量に対する対応の水準例

影響変位量	橋梁		堤防・道路盛土・平坦道路		埋設管	
	水平変位	上下変位	水平変位	上下変位	水平変位	上下変位
0.5m程度	現行の設計法・技術の範囲にあり対応可能					
2.0m程度	技術開発・工夫により対応可能	技術開発・工夫により対応可能	(断層線方向の堤防天端幅or盛土天端幅・平坦道路の車線幅員の1/2)	技術開発・工夫により対応可能	技術開発・工夫により対応可能	
4.5m程度						
10m程度						
15m程度	技術開発・工夫により対応可能		技術開発・工夫により対応可能			
15m程度以上	対象外：地震断層の既往履歴が無い領域					

いは低減した構造等の工夫により影響変位量を低減する対応が可能であるとする。

(3) 地震断層の対応策

或る特定の地域、地点において地震断層の存在が明らかにされており、かつ断層の形態、ずれの方向、発生変位量が想定される場合を前提として、土木構造物における対策を考察した。地震断層の変位に対する橋梁の対策に関しては川島²³⁾が例示しているが、本文では地震断層に対する対策について、橋梁以外の代表的な土木構造物、つまり堤防・道路盛土・平坦道路および埋設管も対象とした。さらに、地震断層の対策は土木構造物の計画、設計、地震直後および復旧の各段階に応じて考えることが合理的であることから、本文では各段階で考慮すべき対策を表-5に例示的に体系化した。

まず、計画段階では、影響変位量が大きいために、設計、地震直後あるいは復旧の各段階において工学的な対応が困難な場合は、地震断層を避けたルートを選定する。

また、地震断層を横断せざるを得ない場合であっても、断層線と構造物の軸線の交差角度を選定、つまり橋梁や埋設管の場合はできるだけ地震断層の直交方向に軸線を設定し、堤防、盛土、平坦道路の場合はできるだけ交差角度を鋭角化させるように軸線を設定する。さらに、それぞれの構造が困難な場合、上下方向の変位に対応させるために橋梁（高架橋）を盛土構造にし、水平方向の変位に対応させるために盛土あるいは平坦道路を橋梁構造にする。また、埋設管の周辺地盤の拘束を除いて地震断

層の変位に対応し易くするために、埋設管と地震断層との横断部を地上化する等の構造変更する。

次に、設計段階では、地震断層の影響を限定化するため橋梁構造を単純桁としたり、径間長の拡大により水平方向あるいは上下方向の影響変位量の低減を図る。また、予想される影響変位量に対しても、橋桁の落下防止に十分なけたかかり長の確保、変位の吸収性能を向上させた支承の免震化、桁端における影響変位量を吸収する構造とする。ここで、橋脚縁端距離を長くすることに関しては川島²³⁾が提示しているが、本文ではけたかかり長の長尺化の一例として図-13を示す。さらに、橋桁が水平方向あるいは上下方向に移動し易くして構造的な損傷を軽減する支承構造、桁のずれ等による段差を防止する構造等を考える。

一方、堤防、盛土あるいは平坦道路では、腹付け盛土や路側幅等により水平方向の変位に追従できる余裕代、余盛等により上下方向の変位に追従できる余裕代を持たせる。なお、天端での影響変位量を基礎地盤での発生変位量を吸収、低減させるように堤防本体等の材料特性を高塑性化する。

また、埋設管では管路の可とう化、継手のユニバーサル化、地震断層の地上横断区間の長尺化により変位の緩和を図る。ここで、埋設管の地上横断化の概念を図-14に示すが、埋設管が地震断層を横断する或る区間を地上に立ち上げて地盤の拘束を除去するとともに、変位の影響を低減するため管軸を断層線と直交させ、地上部区間の長尺化を図る。また、図-15に示すように、管路を地

表-5 地震断層変位に対する構造形態および事業段階毎の対策例

対策の段階	対策例				
	橋梁	堤防	道路盛土	平坦道路	埋設管
計画	ルートの選定	ルートの選定			
	断層線との交差角度の設定 (直交化)	断層線との交差角度の設定(鋭角化)			断層線との交差角度の設定
	構造変更(高架構造→盛土) [断層線が交差する桁の位置設定]	構造変更(→橋梁)		構造変更(地中→地上)	
設計	単純桁化	水平方向の余裕代の確保 (腹付け盛土等)	水平方向の余裕代の確保 (路肩幅等)	管路の可とう化 (材質・多管化等)	
	径間長の長大化				
	天端幅の拡大(橋軸直角方向)				
	支承の免震化	上下方向の余裕代の確保(余盛等)		継手のユニバーサル化	
	けたかかり長の確保				
	桁端の大変位吸収	堤体部・盛土部の変形 吸収化(高塑性化等)			
	支承のユニバーサル化				
	路面の段差防止				
[桁の連続化・端支承の固定]					
地震直後	地震断層の発生変位の検知・通報				
	通行規制措置	通行規制措置			遮断・切り替え
復旧	支承のずれの矯正	断面の修復 (腹付け、余盛等)		断面の修復 (路肩幅、余盛等)	破損箇所・継手の交換
	橋桁の位置矯正				
	橋桁の継足	路面の舗装		代替路の確保	
	沓の交換				
	路面の舗装				
[橋脚の補修]					

[] : 桁の連続化に関する対策

上に立ち上げない場合は、地震断層近傍の管路周辺地盤の拘束が低減するように地盤の低剛性を図り、地震断層の移動が直接的に作用しないようにする。

次に、地震断層により変位が発生した地震直後の段階については、事前に特定された地震断層の変動を検知し、通報できるシステムを整備する。また、橋梁、盛土あるいは平坦道路では、機能低下あるいは機能停止に基づく交通規制措置をとり、埋設管では被害の拡大防止のために管路の遮断あるいは代替手段を確保する。

最後に、地震断層により被害が発生した場合でその復旧に当たる段階では、支承のずれの矯正、ずれた橋桁の再設置、破損した支承の交換等を行う。一方、堤防および盛土では水平方向あるいは上下方向にずれた堤体に対する腹付け、余盛り、舗装等による修復、平坦道路では水平方向あるいは上下方向にずれた道路に対する路肩拡幅、余盛、舗装等による修復を行い、埋設管では破損箇所・継手を交換したり、代替路を確保する。

なお、橋梁の設計段階における単純桁化に対抗する対策として、運上等²⁴⁾は桁の連続化による断層変位の対策を取り上げ、積層ゴム支承を適用した支間40mの5径間連続橋をモデルとして、橋軸方向に対する断層変位の方向および断層の位置を変えた条件の下で、断層変位量を増加させて桁端の移動量を試算している。その結果、桁の連続化により、桁を落下させるのに必要な断層変位量が増加すること、断層位置が橋全長の中央部にある方が桁の落下に必要な断層変位量が大いこと、橋軸直角方向の方が橋軸方向よりも大きな桁端の移動量に対応できることを指摘している。桁の連続化ではゴム支承のせん断破壊、PCケーブルの破断および橋脚の曲げひび割れ・曲げ降伏・せん断破壊等といった支承以外の構造要素の損傷による断層変位の吸収の分散化を前提としており、橋の全体系の視点から桁の落下を防止する姿勢と言える。

ここで、断層変位による影響を単純桁化により限定的にするか、あるいは全体系で変位吸収を分散化するかの是非の議論はあるが、本文では前者を基調としているので、表-5では運上等の結果を踏まえて桁の連続化に関する対策は参考掲載した。

6. 結論

地震断層に対する工学的対応に関して基礎的な検討、考察を行ったが、その結果は以下のように要約できる。

1) 地震断層の既往履歴によれば、土木構造物において工学的に対象とすべき地震断層の選択およびその発生特性の設定が可能であるので、地震断層に対する工学的な対応の方向性は見定めることができる。

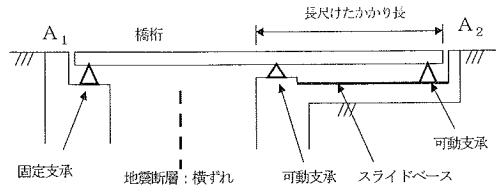


図-13 けたかり長の長尺化の概念例

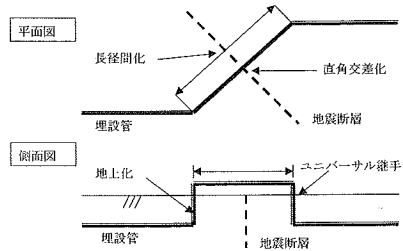


図-14 埋設管の地上横断化の概念例

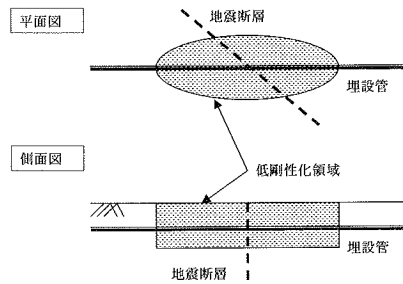


図-15 埋設管周辺地盤の低剛性化の概念例

- 2) 工学的な視点からは地震断層による変位量を発生変位量と影響変位量に区分することが必要であり、土木構造物に対する地震断層の影響の有無および程度は影響変位量が関与するので、影響変位量に対する対応が必要である。
- 3) 地震断層による影響変位量は、図-1に示すように地震断層の発生形態、土木構造物の構造形態および両者の相互関係により異なるので、これらに基づく影響変位量の係わり方を明確にした対応が必要である。
- 4) 地震断層による影響変位量に対する係わり方、つまり工学的な姿勢は図-12のように「吸収する」、「追従する」および「避ける」の3つに大別できる。ここで、表-3および表-4に示すように地震断層に対して現行技術の適用が可能な領域があるので、この領域を踏まえながら、「避ける」→「追従する」→「吸収する」を実現するように、地震断層の影響をより効果的かつ経済的に低減するための新しい工夫や技術の研究開発が必要である。
- 5) 地震断層の対策は、表-5に示すように計画、設計、地震直後および復旧の各事業段階に応じて考えると

ともに、それらの最適化あるいは複合化することが合理的である。

参考文献

- 1) 松田時彦：活断層，岩波新書，2000.
- 2) 松田時彦：活断層から発生する地震の規模と周期について，地震，第2輯，第28巻，pp.269-283，1975.
- 3) Donald L. Wells and Kevin J. Coppersmith：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, pp.974-1002, 1994.
- 4) Japan Society of Civil Engineering：The 1999 JI-JI EARTHQUAKE, TAIWAN-Investigation into Damage to Civil Engineering Structures-，1999.
- 5) 川島一彦，庄司学，岩田秀治：1999年集集地震（台湾）における卑豊橋・烏溪橋の被害と被災メカニズム，第3回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.433-440，1999.
- 6) 川島一彦，橋本隆雄，鈴木猛康：トルコ・コジャエリ地震による交通施設の被害概要，第3回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.409-416，1999.
- 7) 栗原敏広：兵庫県南部地震の明石海峡大橋への影響，橋梁と基礎，Vol.32, No.8, pp.94-97，1998.
- 8) 伯野元彦，目黒公郎：被害から学ぶ地震工学，鹿島出版出版会，pp.26，1992.
- 9) 鈴木信久，河端伸一郎，安田進：台湾集集地震による地表地震断層と埋設パイプラインの変形，第一回日本地震工学研究発表・討論会梗概集，No.242，2001.
- 10) (社)日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編，平成14年3月(2002年).
- 11) (社)日本道路協会：道路橋示方書II鋼橋編，平成14年3月(2002年).
- 12) 運上茂樹，近藤益夫，大住道生：免震橋梁の変位吸収システムの開発に関する研究，土木研究所資料第3576号，1999.
- 13) 家村浩和，足立幸郎，高橋良和：断層変位追従型免震支承の模索，第一回日本地震工学研究発表・討論会梗概集，No.248，2001.
- 14) 小宮晃：活断層を横切るNZウェリントン市ソートドン高架橋におけるキャッチ・フレームによる耐震補強，建設技術研究所所報，(財)建設技術研究所，2000.
- 15) 川島一彦：リオン・アンティリオン橋の耐震設計，橋梁と基礎，Vol.35, No.3, pp.33-36，2001.
- 16) (社)日本道路協会：軟弱地盤対策工指針，昭和61年11月(1986年).
- 17) (社)日本道路協会：道路構造令の解説と運用，昭和58年2月(1983年).
- 18) 建設省河川局治水課：河川堤防耐震点検マニュアル，平成7年3月(1995年).
- 19) 河川構造物地震対策技術検討委員会報告書，平成8年3月(1996年).
- 20) (社)日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針と解説-1997年版-，平成9年8月(1997年).
- 21) (社)日本ガス協会：一般(中・低圧)ガス導管耐震設計指針，昭和57年3月(1982年).
- 22) 常田賢一：地震防災・耐震技術の新たな視点，土木研究所資料第3773号，pp.61-80，2001.
- 23) 川島一彦：断層変位に対する橋梁の対策，土木学会全国大会研究討論会：断層進展およびこれに直接関連する被害と今後の課題，pp.7-9，2000.
- 24) Unjoh, S. and Kondoh, M.: Analytical Study on the Effect of Fault Displacement on the Seismic Performance of Bridge Structures, Second International Workshop on Mitigation of Seismic Effects on Transportation Structures, NCREC, Taiwan, pp.222-233, 2000.

(2002. 10. 21 受付)

ENGINEERING VIEWPOINTS ON COUNTERMEASURES FOR CIVIL ENGINEERING STRUCTURES AGAINST SURFACE FAULTING

Ken-ichi TOKIDA

Engineering viewpoints on reasonable and effective countermeasures against a surface active fault are discussed for three types of civil engineering structures, i.e. highway bridges, river dykes / road embankments / flat roads and underground pipelines. Considering characteristics of historical surface faulting, damages of structures and existing technology against relative displacements induced, three fundamental engineering concepts against surface faulting are proposed, and several examples of countermeasures to reduce damages by surface active faults for three types of civil engineering structures are shown according to four construction work-stages: planning, designing, activity just after an earthquake and restoration.