

道路橋における活断層変位対策の検討

常田 賢一¹・渡邊 武²・平石 浩光³

¹ 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻社会基盤工学部門 教授 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

E-mail: tokida@civil.eng.osaka-u.ac.jp

² 大分県都市計画課 主幹 (〒870-8501 大分市大手町 3-1-1)

E-mail: watanabe-takeshi@pref.oita.lg.jp

³ 九州建設コンサルタント(株) (〒870-0911 大分市新貝 12-51)

E-mail: hiraishi@qcon.co.jp

近年、活断層調査の結果が公表されつつあるが、橋梁などの事業プロジェクトにおいて地表地震断層に関係する事例が見られ始めている。しかし、我が国では活断層、特に地表地震断層に起因する断層変位に対して明確な対応方針を示して対策を検討した事例は皆無である。今後、活断層に係わる事業の増加が予想される中において、活断層に起因する変位の対策方法を明確にすることが必要である。

本文は、既往の地表地震断層対策に対する工学的な基本姿勢に基づいて、新設の道路橋を横断して発生すると予想される地表地震断層の変位および関連する震源断層の地震動に起因する変位を考慮した対策 (= 活断層変位対策) の検討結果を報告する。本事例は、我が国で最初に橋梁の活断層変位対策を検討した事例であり、事前対策に加えて事後対策も考慮した総合的な活断層変位対策であることが特徴である。

Key Words : Highway Bridge, Active Fault, Active Surface Fault, Displacement, Countermeasures

1. はじめに

文部科学省地震調査推進本部による活断層調査の結果が公表されつつある現在、橋梁などの事業プロジェクトにおいて、特に地表地震断層（以下、地震断層）の影響を考慮しようとする事例が見られ始めているが、今後もその数は増えたと予想される。

この場合、当該事業が地震断層に対して如何に対応するか の姿勢を明確にすることが必要となるが、ダムあるいはトンネルでは断層破砕帯の対処といった視点からの対応は実施されてきているものの、橋梁や盛土において地震断層変位に対する本格的な対策の取り組み事例は皆無である。そのため、地震断層変位に対する具体的な取り組み方法は明確ではないのが実情である。ここで、地震断層の影響を考える場合、関連する震源断層の地震動により発生する構造物の変位も関係する場合があるので、本文では地震断層および関連する地震断層に起因する構造物の変位に対する対策を「活断層変位対策」と呼ぶ。

本文は、既に提示している地震断層対策に対する工学的な基本姿勢¹⁾に基づいて、大分県別府市内の新設道路の橋梁計画において、我が国で最初に本格的な活断層変位対策を検討した結果を報告する。

2. 活断層の影響要因

橋梁などの構造物に対して工学的に活断層の影響を考える場合、考慮すべき影響要因には断層変位および地震動の2種類がある。これらの相対的な関係は図-1のように考えることができ、前者は構造物の建設地点に出現する断層の直接的な作用であり、後者は地中の断層から伝播して建設地点に至る間接的な作用と考えられる。換言すれば、断層変位は地中の震源断層のずれが地表に到達した地表地震断層の変位であるのに対して、地震動の発生源は震源断層である。一般に地表付近のずれからは強い地震動は発生しないため、地表地震断層と震源断層は相互に連続しない場合もある。

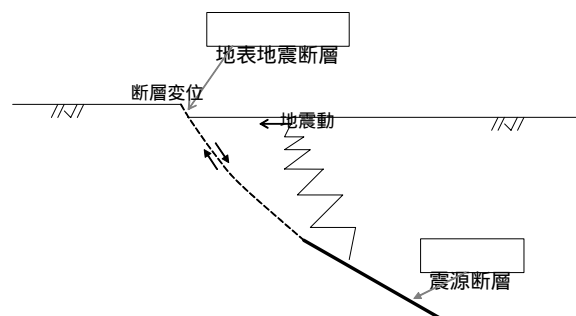


図-1 地表地震断層と震源断層

3．活断層変位対策の検討方法

(1) 対策の検討フロー

新設道路橋（既設道路橋は準用）の道路計画に際しての活断層変位対策の検討事項および検討の流れは、図-2のように体系化できる。

まず、計画地点における既存の活断層調査資料等に基づいて「活断層の有無を把握」する。該当する活断層がある場合、活断層の諸特性が明らかにされている場合とそうでない場合がある。把握されていない活断層の特性がある場合は、トレンチ調査等、「活断層調査」を実施する。既往調査あるいは新たな調査の結果に基づいて、地震断層の位置、走向、傾斜角度、断層変位量および震源断層の深度、規模等の活断層変位対策を検討する基本条件としての「地震断層および震源断層の基本特性を設定」する。

次に、地震断層の基本特性に基づいて、考慮すべき地震断層の「設計断層変位量を設定」する。また、震源断層の基本特性に基づいて、「設計地震動を設定」する。

以上の調査段階を経た後、基本計画の段階に移行し、まず、構造物の重要度、被災の影響度、迂回あるいは補完的対応の有無等を鑑みて、「橋梁のサービス水準を設定」する。このサービス水準は、構造物の管理者が明確にする活断層変位への対応の基本姿勢であり、これにより活断層変位対策の内容が左右される。次に、サービス水準に基づいて、「活断層に対する基本方針を設定」する。さらに、基本方針および事前対策としてのルート変更等の「計画段階の対策」を踏まえて、当該橋梁の「基本計画を決定」する。

以上の基本計画に基づいて、事業の設計段階、活断層変位の発生直後段階および復旧段階に対応した「事前対策あるいは事後対策を選定」する。選定した対策は、活断層による変位量の条件に対する構造あるいは経済性などの検証を行い、「対策を確定」する。

(2) 道路のサービス水準

活断層変位対策を考える場合、活断層による被害に対する橋梁のサービス水準を明確にすることが必要である。つまり、地震断層による直接的な被害あるいは間接的な影響をどの程度まで抑制するのか、あるいはどの程度まで許容するかによって、対策の内容および水準が異なるからである。

橋梁の場合、被害の程度によっては応急復旧ではなく恒久的な本復旧が実施されるので、道路の応急的あるいは恒久的な交通機能の確保の程度を道路のサービス水準と考えると、道路のサービス水準は表-1に示す4つの分類のように例示できる。なお、水準B、水準Cおよび水準Dでは復旧までに時間を必要とするため、交通止め、迂回誘導等の交通規制を行うとともに、必要に応じて応急橋の設置等により交通機能を代替する。

(3) 変位対策の考え方

橋梁の計画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、走向、発生変位量等の基本特性が設定できる場合、地震断層対策を検討することになる。従って、考慮すべき地震断層が明確でない場合は、対策の必要はないことになる。

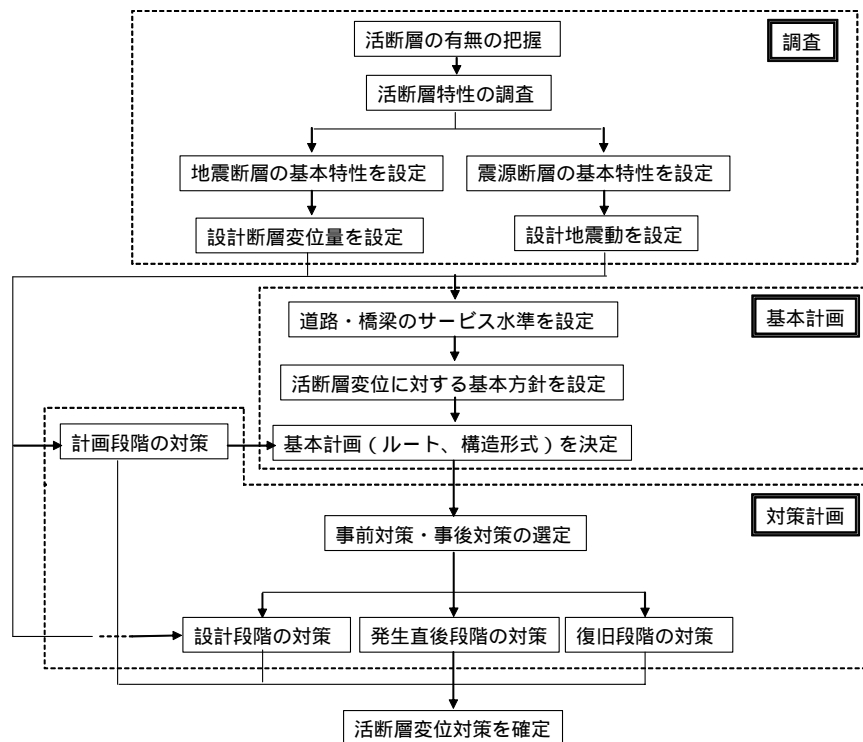


図-2 活断層変位対策の検討フロー例

表-1 道路のサービス水準の例

サービス水準	サービス内容
A	地震断層の変位による特別な被害は発生しない で、変位の発生前と同様な交通機能が確保される水準
B	地震断層の変位の発生により、支承のずれといった小規模な被害が発生し、3日～2週間程度の応急復旧により、交通機能が確保される水準
C	地震断層の変位の発生により、支承の損傷、桁のずれといった中規模な被害が発生し、1～2箇月程度の応急復旧により、交通機能が確保される水準
D	地震断層の変位の発生により、桁の落下、橋脚の損傷、アプローチ部分への波及といった大規模な被害が発生し、3箇月～1年程度の本復旧により、交通機能が確保される水準

ここで、活断層変位対策には様々な方法が考えられるが、橋梁の計画、設計、活断層の発生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¹⁾。例えば、橋梁の場合、各事業段階で考慮できる対策は、表-2のように例示できる。なお、表-2は文献1)をベースとして、特に橋梁の場合について整理するとともに、桁の連続構造も扱っている。以下に、各段階毎の対策例を示す。

a) 計画段階

計画段階では、ルート、勾配あるいは基本構造の視点から事前対策を検討する。つまり、変位量が大きく、設計、地震直後あるいは復旧の各段階において工学的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は、断層線と構造物の軸線の交差角度を低減することにより、橋梁に

表-2 道路橋の活断層対策メニュー例

事業の段階	対策例
計画段階	ルートの選定
	断層線との交差角度の設定
	縦断線形調整代の設定
	構造変更(→盛土) [断層線が交差する桁の位置設定]
設計段階	単純桁化
	径間長の長大化
	天端幅の拡大(橋軸直交方向)
	けたかかり長の拡大
	支承の免震化
	支承のユニバーサル化
	桁端の大変位吸収構造
	縦断線形の調整代の設定
	縦断線形の矯正構造の設定
	[桁の連続化・端支承の固定]
断層発生直後	地震断層の発生変位の検知・通報
復旧段階	通行規制措置
	支承のずれの矯正
	橋桁の位置矯正
	橋桁の継足
	支承交換
	路面の舗装
	アプローチ部の線形の矯正
	迂回路・代替路の確保 [橋脚の補修]

「」：桁の連続化に関する対策

影響する変位を低減したり、地震断層により道路の縦断線形が急勾配化するのを回避するために、事前に橋梁およびそのアプローチの勾配に調整代を設定する。さらに、当初計画の構造では対応が困難な場合、橋梁区間を盛土構造にしたり、逆に盛土区間を橋梁構造にすることにより、地震断層の影響を低減することが考えられる。

b) 設計段階

設計段階では、橋梁の基本構造あるいは細部構造の視点から事前対策を検討する。つまり、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で影響する変位の低減を図る。また、予想される変位に対しても、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、桁端における変位を吸収する構造とする。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が考えられる。

また、地震断層の変位による橋梁の縦断勾配の変化(増加が問題)に対して、応急復旧あるいは本復旧における大規模な橋台本体の取り壊しを避けて縦断線形の矯正を行い易くする構造(矯正構造と呼ぶ)を設置する。さらに、橋梁部分の縦断線形の矯正に付随して、アプローチ部において切土が必要となる場合、切土を迅速に行うため、擁壁構造を事前設置することが考えられる。

c) 活断層変位の発生直後段階

地震断層変位が発生した時点あるいは直後における段階では、地震断層変位の検知と即時対応の視点から事前対策および事後対策を検討する。つまり、地震断層の発生を速やかに検知し、その情報を即時にオンラインで収集、通報することにより、車両の通行規制を行い、二次的災害の発生を軽減・防止する。また、車両の通行規制を行った場合、迂回路への誘導や代替路への切り替えを迅速に行うことにより、地震断層変位による影響を軽減する。そのために、地震断層変位が想定される箇所において、検知システムによる監視体制、代替手段を事前に整備する。

d) 復旧段階

地震断層変位により被害が発生した段階では、復旧期間および経済性の視点から事後対策を検討する。つまり、復旧内容として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、橋梁のアプローチ部の線形・断面矯正等を行うことにより、所定の期間内での復旧を可能にする。

以上の段階毎の対策について、複数の対策の組み合わせを考えることにより、所期の目的の達成あるいは対策効果の向上を図る。また、事後対策が主体である場合でも、その容易性、迅速性あるいは経済性の観点から事後対策が実施しやすい事前対策を考えることが望ましい。

4. 新設道路橋における活断層変位対策

新設橋梁において地震断層に対する本格的な対策を検討したのは、大分県別府市内の都市計画道路の富士見通鳥居線で計画された「1号橋（仮称）」と呼ばれる橋梁である。本橋の予備計画時では「堀田断層」のみが土工部で横断するとされていたが、平成12年に公表された「都市圏活断層図（国土地理院）」²⁾および本橋の地盤調査結果³⁾から、図-3の橋梁の一般図に示すように、「朝見川断層」が橋梁区間を横断することが明らかにされている。「堀田断層」および「朝見川断層」は、最近の活断層調査⁴⁾によると、活動度、確実度とも高い評価であることから、本橋の設計に両断層の影響を考慮する。

本橋における活断層変位対策は、図-2の検討フローに従って検討する。つまり、地震断層特性の調査から、橋梁の安全性の照査および復旧対策の提示までの総合的な検討を実施する。なお、地震断層変位に対する構造的な設計法とその検証の詳細は既往論文⁵⁾で報告しているので略述し、本文では既往論文で記述していない、地震動により発生する橋梁の変位を検討するための震源断層による地震動および復旧対策の検討結果も示す。

(1) 道路・橋梁の計画概要

都市計画道路富士見通鳥居線は、温泉都市別府と湯布院とを結ぶ重要な観光道路として位置づけられている。また、近年では大分自動車道及び東九州自動車道の整備に伴い、別府インターチェンジからの別府市街地へのアクセス道路としての機能も期待されている。本道路は道路規格が第4種第1級で、計画交通量：16,200台/日(平成22年推定交通量)、設計速度40km/h、縦断勾配（橋梁区間：上り）6.95%である。また、橋梁区間は上下線分離構造であり、当初計画の上部構造はPC5径間連続ポステン中空床版橋（橋長147m、135m）とし、下部構造は逆T式橋台、張出式橋脚の直接基礎あるいは深礎基礎である。設計条件である活荷重はB活荷重、重要度の区分はB種、地盤種別はⅡ種である。

(2) 地震断層対策の検討

図-2の検討フローの各項目に関して、以下のように実施した。

a) 活断層特性の設定

設計に用いる断層変位量は、K-Ah 火山灰堆積以後現在に至る期間（約7,300年⁶⁾）に生じた断層の総変位量と断層活動の繰り返し間隔から、活動1回あたりの変位量を推定する。本橋計画地点より西側約500mの堀田断層を横断する断面図（図-4参照）および朝見川断層が位置する崖の比高に基づいて、断層活動による総変位量は20m程度と推定する。断層の活動間隔は、堀田-朝見川断層周辺の広範な断層活動履歴や詳細な調査データに裏づけされている既往調査結果⁴⁾に基づいて1,000年とする。

以上のことから、橋梁計画地点での朝見川断層の総変位量および活動間隔に基づいて、地震断層の活動1回あたりの鉛直方向変位量を $20\text{ m} \div 7,300\text{ 年} \times 1,000\text{ 年} = 2.7\text{ m}$ と想定し、これに総変位量等の精度を考慮して設計断層変位量を3.0mとする。

断層形態について、朝見川断層は別府湾地溝帯の南縁に位置する断層であり、大局的には北側傾斜の正断層である。しかし、ボーリング調査や弾性波トモグラフィ調査及び露頭観察から、南側（逆側）に約80°の傾きを示す報告³⁾がされている。従って、本検討では周辺の崖の角度や地盤状況から推定した正断層としての70°および逆断層としての80°の両方を考慮する。なお、横ずれに

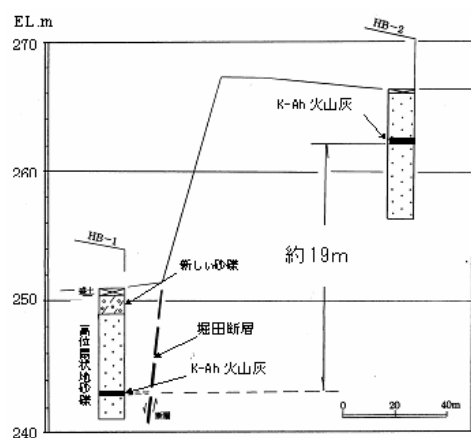


図-4 堀田断層の断面図

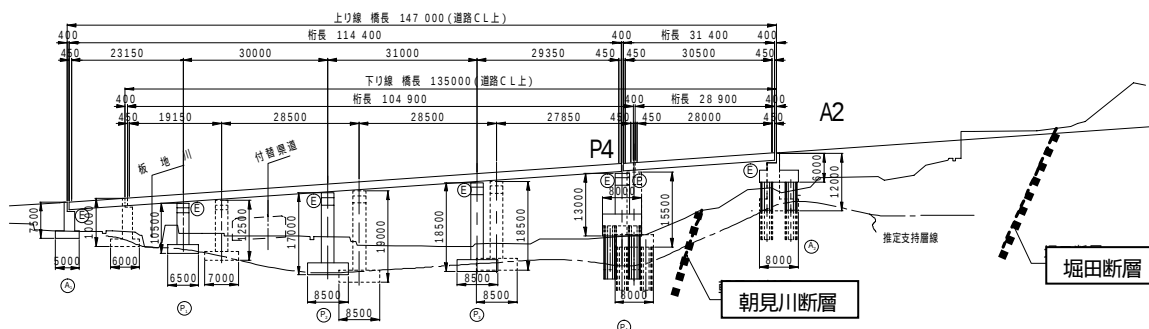


図-3 橋梁の一般図

表-3 設計断層変位量

変位量			
		正断層	逆断層
	断層線の法線方向 X	-1.092 m	0.529 m
	断層線に平行方向 Z	-1.092 m	-1.092 m
	鉛直方向 Y	-3.000 m	-3.000 m

については、断層露頭の条痕の角度（鉛直より約 20 度海側へ傾斜）に対応した横ずれ変位を考慮する。

以上の検討から、設計断層変位量は表-3とした。

b) 設計地震動の設定

震源断層による地震動は、断層セグメントを想定して橋梁位置における加速度応答スペクトルを求め、標準的な地震動が提示されている道路橋示方書 耐震設計編（以下、道示⁷⁾）との比較・検証を行い、本橋の耐震設計のための設計地震動を設定する。

橋梁近傍において同時に活動する可能性がある断層面として、図-5 に示すように堀田 - 朝見川 - 府内断層と由布院断層の 2 つのセグメントを想定する。都市圏活断層図から断層の長さとし、断層セグメント周辺の微小地震の震源深さ分布から断層面の上下限深さを求める。

北落ちの断層面の傾斜角を 60°とした結果、断層面の [長さ・幅・走行・上限深さ・下限深さ] は堀田 - 朝見川 - 府内断層 [20.2km・15km・289°・2km・15km] と由布院断層 [13.5km・12.7km・250°・3km・15km] となる。

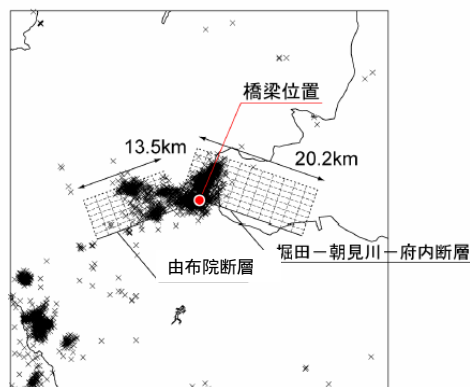


図-5 堀田 - 朝見川 - 府内断層と由布院断層のセグメント

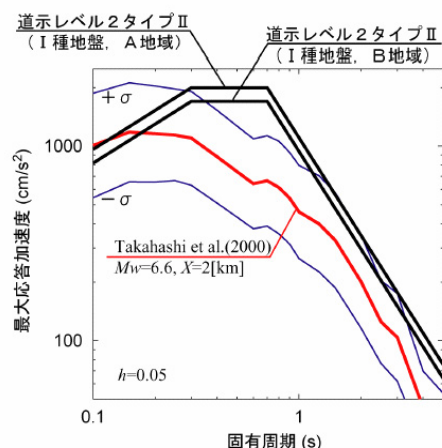


図-6 断層セグメントによる加速度応答スペクトル

断層面の長さから、2 つの断層セグメントの面積は 474km² であるが、入倉⁸⁾の提案式によりモーメントマグニチュードを 6.6 とする。Takahashi et al⁹⁾によりモーメントマグニチュード (= 6.6) と断層面最短距離 (= 2km) を説明変数とする擬似速度応答スペクトルを推定し、加速度応答スペクトルに変換する。

本橋の 種地盤における加速度応答スペクトルは図-6 として求められるが、道示⁷⁾によるタイプ II のレベル 2 地震動の加速度応答スペクトルを併記している。同図から、想定した断層面から求めた加速度応答スペクトルがほぼ全周期帯域で道示⁷⁾の B 地域のそれを下回ることから、道示⁷⁾のレベル 2 地震動を設計地震動とする。

c) 橋梁の基本構造形式の検討

活断層変位対策の選定に先だって、全径間を連続桁形式とした場合と、朝見川断層と交差する径間 (P4 - A2 径間) のみを単純桁形式とした場合の適否の検討を行う。連続桁形式の場合、既往研究¹⁰⁾によると鉛直方向設計断層変位量 3.0 m に対しては、上部構造の部分的な崩壊およびプレストレスの損失による耐力力の減少により復旧時には上部構造全体の架替えが必要となることが考えられる。一方、単純桁形式の場合は、鉛直方向変位に対しては上部構造本体の損傷は軽微であるが、縦断勾配の変化が大きく ($i=6.95\%$ から 17.1% に変化) 被災直後の車両の走行は不可能となる。また、水平方向変位により落橋の危険度は高くなるが、けたかかり長の拡大等で防ぐことは可能である。

以上のことから、連続桁形式と単純桁形式について被害レベルと復旧レベルを比較すると、単純桁形式の方が優位にあることから、本橋では対策方法の 1 つとして断層交差部を単純桁、つまり、PC5 径間連続ボス中空床版桁を PC4 径間連続ボス中空床版桁 (桁長 114.40 m、104.90 m) および PC 単純ボス中空床橋 (桁長 31.40 m、28.90 m) に変更する。

d) 路線のサービス水準の設定

当路線は観光道路あるいは高速道路から市内へのアクセス道路としての重要路線と位置づけられている。しかし、当該地震断層による変位が発生した場合、道路のサービス水準を高く維持することは困難である。一方、当路線は通行不可能となった場合、図-7 に示すように代替路が確保できる。従って、活断層変位の発生時における当路線のサービス水準は、通行止め、迂回誘導等の交通規制を行い、本復旧により交通機能を確保する水準とする。ただし、路線の重要性を考慮して、できる限り迅速な機能回復を目指すものとする。なお、復旧期間は後述の (5) で想定する。

e) 耐震性能および活断層対策の基本方針の設定

道示⁷⁾では、耐震設計で目標とする耐震性能として耐震設計上の安全性、供用性、修復性のそれぞれの観点から 3 段階のレベルを設定して耐震性能を定義している。道示⁷⁾における耐震性能は地震動に対する性能を定義しているが、本検討では断層変位に対しても同様の観点

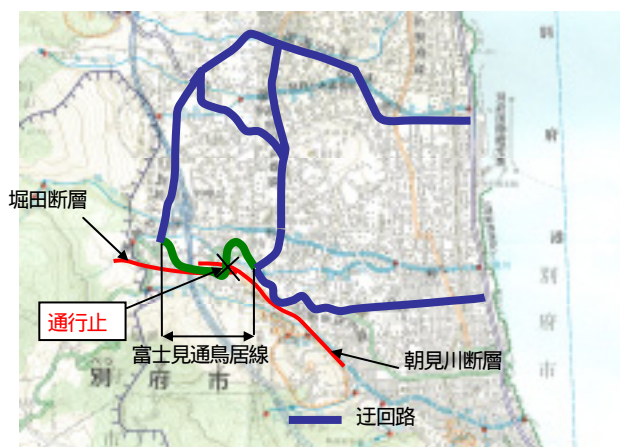


図-7 迂回路の状況

から耐震性能を想定する。

本橋の場合、断層変位により想定される被害状況から、断層変位に対する供用性、短期的修復性の確保は困難であることを勘案して、地震動に対する耐震性能と併せて、以下の耐震性能を確保する。

レベル 1 地震動：地震によって橋としての健全性を損なわない性能（耐震性能 1）

レベル 2 地震動：地震による損傷が限定的なものにとどまり、橋としての機能が速やかに行い得る性能（耐震性能 2）

断層変位：断層変位による損傷が橋として致命的な落橋とならない性能

以上の検討から、本橋の断層変位に対する耐震設計上の基本方針を以下のように設定する。

【方針 1】落橋に対する安全性を確保する

【方針 2】恒久的な本復旧が容易な構造とする
(本復旧期間は 1 年半程度を目標とする)

(3) 対策の基本的な考え方

断層変位に対する基本方針に適合した事前対策および事後対策を選定するが、基本的な考え方は以下の通りである。

事前対策は、以下に従って検討する。

地震断層との交差部では単純桁を採用する。

道示 に準じて落橋防止システムを検討し、地震動および断層変位に対して落橋を防止する。

落橋が生じる危険性が高い正断層の動きに対して検討する。

なお、逆断層の動きによって単純桁が連続桁と衝突し、連続桁の P4 橋脚上の端支点を押し出す状態も考えられるため、想定される逆断層の変位に対しても橋梁の挙動を把握する。

事後対策は、以下に従って検討する。

断層変位による橋梁上部工の損傷の復旧方法を検討する。

断層変位により現状以上に急勾配となる縦断勾配

の矯正のための復旧方法を検討する。

復旧レベル（復旧期間、復旧工法等）は、道路のサービス水準、復旧コスト等を勘案して最適化を図る。

(4) 事前対策の検討

a) 対策方法

基本的な事前対策は、支承および落橋防止システムとする。支承は地震動による慣性力の分散だけでなく、断層変位による変位の分散化を図るため、全ての支点到地震時水平力分散ゴム支承を適用する。ただし、設計断層変位時の落橋を避ける基本方針に従って、支承部の破断は許容する。また、落橋防止システムの構成は道示に準じて表 4 のように構成する。このうち、けたかかり長は道示の規定による式 (1) に従って算出する。

$$S_E = u_R + u_G \quad S_{EM} \quad (1)$$

$$S_{EM} = 0.7 + 0.005 \ell \quad (2)$$

$$u_G = \varepsilon_G L \quad (3)$$

ここに、 S_E ：けたかかり長(m)、 u_R ：レベル 2 地震動により生じる上部構造と下部構造天端間の最大相対変位(m)、 u_G ：地震時の地盤ひずみによって生じる地盤の相対変位(m)、 S_{EM} ：けたかかり長の最小値(m)、 ε_G ：地震時地盤ひずみであり、地盤種別が 種、種、種に対して、それぞれ 0.0025, 0.00375, 0.005、 L ：けたかかり長に影響を及ぼす下部構造間の距離(m)、 ℓ ：支間長(m)とされている。

ここで、本検討において、 u_R はレベル 2 地震動に対して動的解析によって算定した最大相対変位量とし、 u_G は橋軸方向の断層変位量と見なす。その結果、P4 橋脚および A2 橋台のけたかかり長はレベル 2 地震動および断層変位の影響を考慮して、 $S_E = u_R + u_G = 0.31 + 1.092 = 1.402 \text{ m} \rightarrow 1.450 \text{ m}$ に決定する。また、P4 橋脚あるいは A2 橋台のどちらか片方の支承が破断し、可動状態となることも考えられることから、地盤の相対変位は橋軸方向断層変位の全変位量分を見込む。

橋台部の落橋防止構造は、上部構造と下部構造を PC ケーブルを用いた連結構造とする。また、P4 橋脚上の落橋防止構造は、連続桁と単純桁を PC ケーブルを用いて相互に連結する構造とする。落橋防止構造の設計遊間量は、支承の変形能力程度とする。これは、断層変位に

表-4 落橋防止システムの構成

方向	支点	連続桁部 (A1～P4)			単純桁部 (P4～A2)	
		A1側 端支点	中間 支点	P4側 端支点	P4側 端支点	A2側 端支点
橋軸方向		けたかかり長 落橋防止構造	無し	けたかかり長 落橋防止構造	けたかかり長 落橋防止構造	けたかかり長 落橋防止構造
橋軸 直角方向		変位制限構造	無し	変位制限構造	変位制限構造	変位制限構造

よって P4 橋脚，A2 橋台のどちらか片側の支承が破断した場合でも，できる限り変位の分散化を図るためである．

b) 対策効果の検証方法

落橋防止対策の検証は，変位増分法による 3 次元非線形静的解析を適用して行う．断層変位時には，断層変位だけではなく地震動の影響も同時に考慮すべきではあるが，断層変位と地震動の位相などを確定できないため，地震動の影響は式(1)の u_R で考慮し，地震断層変位による静的な強制変位入力のみとする．

解析モデルは各構造部材に非線形性を考慮した 3 次元骨組み構造とする．上部構造および橋台は線形梁要素とし，橋脚は塑性ヒンジ部にバイリニア型の非線形回転バネ要素を設ける．PC ケーブルを用いた落橋防止構造は，設計遊間量を考慮したバイリニア型の非線形バネ要素でモデル化する．また，けた端部には逆断層の動きに対する解析のために，衝突バネを設ける．図-8 に全体骨組みモデル，図-9 に単純桁部のモデルを示す．

断層の鉛直方向変位により支承に回転変形が生じ，設計鉛直方向変位量 3.0 m で回転角は 1/9.3rad に達する．しかし，断層変位に対する解析に用いる支承の非線形性の設定には不確定な点が多く，現状では精度の高いモデル化はできない．そこで，本検討では支承の破断状態を限定することによりモデル化を行うこととし，

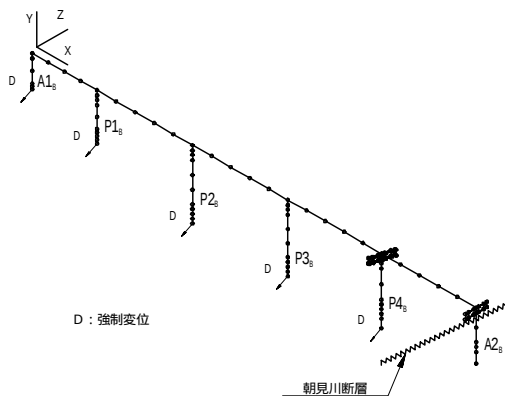


図-8 三次元骨組解析モデル（全体）

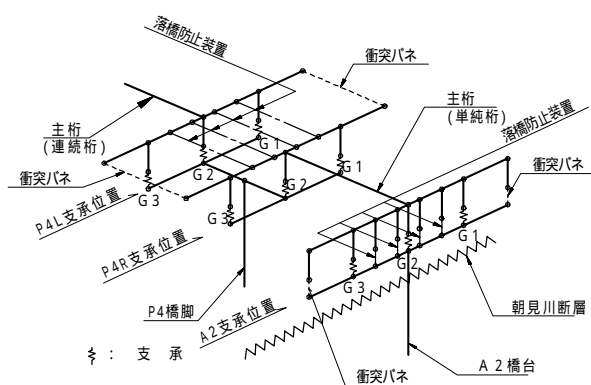


図-9 三次元骨組解析モデル（単純桁部）

以下に示す 2 つのタイプの非線形を設定する．想定した支承の非線形性のモデルの詳細は，文献 5) を参照されたい．

TYPE-1：せん断変形による破断を想定した非線形性

TYPE-2：局部せん断ひずみによる破断を想定した非線形性

変位増分解析では各変位ステップで局部せん断ひずみを算出し，破断状態を判定するが，支承バネの非線形性を水平変形量とせん断力の関係で定義するため，局部せん断ひずみを支承の水平変形量と直接関連づける式を仮定する（詳細は，文献 5)）．

表-5 は P4 橋脚の G2 支承の各断層変位に対応した支承の水平変形量 δ_s ，回転角 θ_s および各ひずみの値である．同表によれば，支承の水平変形量 219mm で，局部せん断ひずみ γ_t が 550% になる．このようにして，各支承の破断ひずみ 550% の水平変形量を算出して非線形性を設定する．なお，破断後は摩擦抵抗を考慮し，摩擦係数は可動支承の摩擦係数として $f=0.10$ とする．

解析ケースは，断層変位の方向（正断層および逆断層）と支承のタイプ（TYPE-1 および TYPE-2）を組合せた 4 ケースとする．設計断層変位量は鉛直方向で 3.0 m であるが，正断層の場合は 3.0m を越える変位に対する挙動を把握するため，最大 5.0 m までの変位量を入力して解析する．この場合，強制変位は図-8 に示すように A1 橋台～P4 橋脚の下端を 3 方向（X,Y,Z）同時に作用させるが，鉛直変位を 1mm 刻みで増加させながら，水平方向もこれに対応して増加させる．表-6 に解析ケースと強制変位量（最大値）を示すが，逆断層の入力最大変位量は設計変位量とする．

c) 正断層に対する解析結果

表-7 に CASE1 場合について，P4 橋脚および A2 橋台の支承（TYPE1）の変形（橋軸方向および橋軸直角方向），落橋防止構造（PC ケーブル）の作用力および P4 橋脚の

表-5 断層変位量と支承の水平変形量および局部せん断ひずみ（P4-G2 支承）

断層変位 (m)		回転角 θ_s	水平 変形量 δ_s	γ_s	γ_c	γ_r	γ_t
鉛直	水平	(rad)	(mm)	(%)	(%)	(%)	(%)
1.0	0.364	1/28.0	182	114	55	295	464
1.2	0.437	1/23.3	219	136	60	354	550
2.0	0.728	1/14.0	364	227	91	590	908
3.0	1.092	1/9.3	546	341	249	885	1475

表-6 解析ケースと強制変位量

断層の動き	ケース名	支承の タイプ	強制変位量 (m)		
			X 方向	Y 方向	Z 方向
正断層	CASE1	TYPE-1	-1.82	-5	-1.82
	CASE2	TYPE-2	-1.82	-5	-1.82
逆断層	CASE3	TYPE-1	0.529	-3	-1.092
	CASE4	TYPE-2	0.529	-3	-1.092

表-7 断層変位量に応じた変状状況 (CASE1)

TYPE1 支承(せん断ひずみによる破断を想定したモデル)

落橋防止設計遊間量 600mm

断層変位量 (m)			支承の変形 (mm)												落橋防止作用力 (KN)								P4橋脚 曲げモーメント (KN・m)			
			橋軸方向						直角方向						P4				A2				橋軸	直角		
			G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3	1	2	3	4	1	2	3	4				
鉛直	橋軸	直角																								
0.500	0.182	0.182	-106	-86	-66	65	86	106	2	-3	-8	3	3	3										7140	6631	
1.000	0.364	0.364	-212	-172	-132	130	172	213	4	-7	-17	7	7	7										14280	13261	
1.500	0.546	0.546	-317	-257	-197	195	257	318	4	-12	-27	12	12	12										22042	19600	
2.000	0.728	0.728	-418	-340	-263	260	340	420	-2	-22	-42	22	22	22										32584	24887	
2.500	0.910	0.910	-515	-420	-325	321	420	518	-13	-38	-62	38	38	38										47540	28729	
2.553	0.929	0.929						破断																		
2.571	0.936	0.936	破断													0										
2.850	1.037	1.037																					0			
2.990	1.088	1.088																								
3.000	1.092	1.092	-604	-488	-372	398	518	638	-7	-37	-67	37	37	37	431							68	57145	34971		
3.086	1.123	1.123					破断																			
3.211	1.169	1.169														降伏										
3.223	1.173	1.173	破断																							
3.263	1.188	1.188																							降伏	
3.297	1.200	1.200														0							0			
3.363	1.224	1.224																					0			
3.500	1.274	1.274	-709	-577	-445	450	586	722	-25	-59	-92	59	59	59	1649	941						902	1649	68190	38774	
3.614	1.315	1.315																					降伏			
3.631	1.322	1.322														降伏										
3.805	1.385	1.385																				0				
3.813	1.388	1.388																								
3.818	1.390	1.390																							破断	
3.844	1.399	1.399													破断											
4.000	1.456	1.456	-823	-668	-512	497	658	820	-3	-44	-82	44	44	44	1649	981						1100	1649	1649	76561	46547
4.095	1.491	1.491																								
4.198	1.528	1.528																								
4.205	1.531	1.531																								
4.207	1.531	1.531			破断																		破断			
4.296	1.564	1.564																								
4.343	1.581	1.581			破断										破断											
4.375	1.593	1.593																								
4.416	1.607	1.607																				0				
4.500	1.638	1.638	-945	-764	-582	550	737	924	20	-27	-73	27	27	27	1649	1649	380	380	1649	1649	1649	1649	1649	79821	55774	
4.564	1.661	1.661																							降伏	
4.798	1.746	1.746																								
4.860	1.769	1.769														破断		降伏	降伏							
4.900	1.784	1.784																				破断				
5.000	1.820	1.820	-1052	-843	-635	591	807	1022	52	-2	-55	2	2	2								1649	1649	80356	66120	

落橋防止構造が作動している状態 降伏・破断(終局) 破断

曲げモーメントの結果を例示する。同表のうち、支承の橋軸方向の変形の推移と破断時点を図化したのが図-10 である。表-7 および図-10 によれば、設計断層変位 3.0m では、CASE1 は P4 橋脚の G1 支承、A2 橋台の G3 支承が破断することが分かる。なお、結果は示していないが、CASE2 では P4 橋脚、A2 橋台の全ての支承が破断する結果となる。

しかし、上下部構造間の相対変位（支承の変形）は CASE1 で最大 638mm、CASE2 で最大 671mm であり、地震動の最大相対変位を考慮しても、いずれの CASE もけたかかり長の 1450mm 以下である。

さらに、落橋防止作用力について、落橋防止ケーブルはいずれのケースも P4 橋脚の左側（表-7：P4 の 1）と A2 橋台右側（表-7：A2 の 4）の 1 本が作動状態にあるが、弾性域内である。なお、P4 橋脚に生じる曲げモーメントは降伏曲げモーメント以下である。

d) 逆断層に対する解析結果

解析結果（詳細は文献 5）参照）によれば、設計断層変位 3.0m により CASE3 は支承が破断に至っていないが、CASE4 は全ての支承が破断する。P4 橋脚の曲げモーメントは、どちらのケースも降伏曲げモーメントに至っていない。けた端部の状況はどちらのケースも P4 橋脚側で右地覆端が連続桁と接触し、A2 橋台側で左地覆端が橋台パラペットに接触する。

e) 連続桁側への影響

設計断層変位時における連続桁側の支承の変形量、橋脚基部の曲げモーメントによれば、連続桁側の支承および橋脚躯体はいずれのケースにおいても弾性域内であり、

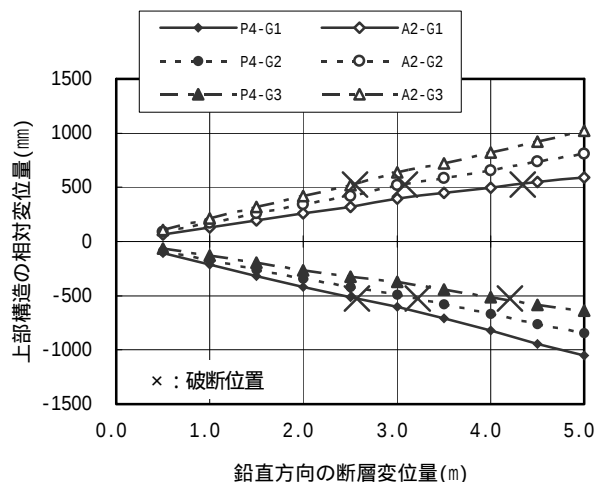


図-10 断層変位量に応じた支承の変状状況 (CASE1: 橋軸方向)

単純桁間（P4 - A2 径間）に生じる断層変位が連続桁側の構造に及ぼす影響は小さい。

以上の解析の結果、設計断層変位量（鉛直方向変位 3.0 m）による正断層および逆断層の動きに対して、上部構造はいずれもけたかかり長を確保している。従って、本橋の断層変位に対する耐震性能は満足されると判断する。

f) 復旧を容易にするための事前対策

設計断層変位量が発生した場合、道路の縦断線形の矯正のために、A2 橋台を 3m 程度切り下げることが必要で

ある。当初計画では、A2 橋台は掘削量を低減するために段差フーチングとしているが、縦断の切り下げはフーチングに影響し、躯体全体の再構築が必要となる。このため、切り下げがフーチングに影響しないような縦断線形を矯正し易くする構造を考える。

また、A2 橋台背面の取り付け部擁壁は、縦断線形の矯正のために切り下げが生じるので、撤去・復旧が容易に行えるように補強土タイプの擁壁形式を考える。

(5) 事後対策の検討

事後対策は、地震断層線と交差する単純桁部と道路線形（平面および縦断）が変化するアプローチ部が対象となるが、以下のように計画する。

橋梁部は、単純桁を移設して再利用するとともに、支承と伸縮装置は撤去し、交換する。また、A2 橋台は一部打ち替える。

道路平面線形は、連続桁部の曲線を生かし、A2 橋台側のアプローチ部ですり付ける。

道路縦断線形は、連続桁側の勾配を生かし、A2 橋台側のアプローチ部ですり付ける。ただし、現計画の縦断勾配がほぼ規定値の 6.95% であるので、復旧では縦断勾配の特例値（車道、 $V=40\text{km/h}$ ：9.0% 以下）を適用する。

また、復旧期間については、被災直後から復旧工事の着工までに、被災調査、測量、設計、用地取得、災害査定等に 6 ヶ月が必要であること、断層変位の規模からすると復旧のための実工事期間は最低 1 年は必要であることを考慮して、本復旧の期間を 1 年半程度および 2 年程度の 2 案を考える。本復旧期間と復旧に関係する主たる事前・事後対策の組み合わせにより、次の 3 つの CASE を想定する。

CASE1：事前対策として A2 橋台のフーチングの縦断線形の矯正構造を採用し、事後対策として縦断勾配の特例値（車道 8%）を適用する対策。

【復旧期間：1 年半程度】

CASE2：CASE1 において A2 橋台の縦断線形の矯正構造を採用しない対策。

【復旧期間：1 年半程度】

CASE3：CASE2 において事後対策として縦断勾配の規定値（7%）を適用する対策。

【復旧期間：2 年程度】

なお、補強土擁壁は全ての CASE で考えているが、これは A2 橋台背面の取付け擁壁高が 10 m を超えるため、経済的な優位性により当初計画から考えられていたものであり、結果的に断層変位対策としても有効な構造となっている。

図-11 は CASE1 による対策について、橋梁部および A2 橋台側のアプローチ土工部における地震断層変位の発生前および発生後の縦断線形の比較である。アプローチ土工部の再掘削により縦断勾配を確保することになる。

また、表8は3つのCASEの比較表である。CASE1お

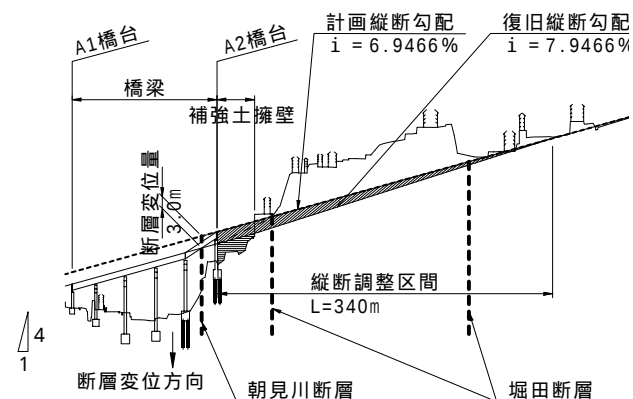


図-11 地震断層変位に対する縦断線形の復旧状況（CASE1）

表-8 活断層の復旧のための対策の比較

復旧期間		CASE 1	CASE 2	CASE 3
対策		1 年半程度		2 年程度
事前対策	上部構造	P 4 - A 2 径間単純桁化		
	支承構造	変位分散型支承（積層ゴム支承）		
	落橋防止システム	けたかかり長		
	落橋防止システム	落橋防止構造		
	下部構造	橋軸直角方向変位制限構造		
事後対策	上部構造	上部構造の移設		
	支承構造	積層ゴム支承の撤去・交換		
	上部線	橋台一部撤去、改築	橋台全撤去・築造	橋台全撤去・築造
	下部線	橋台一部撤去、改築	橋台一部撤去、改築	橋台一部撤去、改築
	縦断勾配	車道：特例値（8%）	歩道：特例値（12%）	規定値（7%）
道路	幅員	完成幅員	完成幅員	完成幅員
	掘削量	42,600m ³	42,600m ³	89,200m ³
	舗装面積	6,430m ²	6,430m ²	11,300m ²
	用地追加買収	1,240m ²	1,240m ²	2,330m ²

および CASE2 でのアプローチ部の縦断勾配のすり付け延長は 340 m、CASE3 のそれは 530m となる。また、復旧のための事前対策および事後対策に必要な事業費は、CASE1 が最も小さく、CASE2 は CASE1 の 5% 増し、CASE3 は CASE1 の 9 割増しとなる。

なお、いずれの CASE においても、本復旧に先立つ片側 2 車線の暫定供用は、それぞれの復旧期間の半年程度前で実施が可能である。

また、以上の検討結果において、表-1 に例示した道路のサービス水準を対応させてみると、橋梁部のみのサービス水準は「C」相当であるが、橋梁のアプローチ部を含めて考えた当該道路のサービス水準は「D」相当ということになる。これは、サービス水準を考える場合、個々の施設のサービス水準だけでなく、リンクとしての道路という視点からのサービス水準を考えることの重要性を示唆している。

5. まとめ

新設道路橋における活断層変位対策の総合的な検討方法は、以下のようにまとめられる。なお、既設橋梁については、これを準用する。

- (1) 活断層変位対策を検討する場合、活断層の影響、つまり地表地震断層による断層変位量および関連する震源断層による地震動の両視点の評価が必要である。
- (2) 活断層変位対策の具体的な検討のためには、地震断層特性および震源断層特性を定量的に評価し、設計条件として設定することが必要である。
- (3) 活断層変位対策は、計画、設計、地震断層の発生直後および復旧の各事業段階において相応の対策があり、事前対策だけでなく、事後対策を含めて総合的に考えることが必要であり、それにより効果が向上する。
- (4) 活断層変位対策の位置づけを明確にするためには、活断層、特に地震断層により発生する変位に対して、道路に要求される機能、つまり道路のサービス水準を明確にするとともに、活断層変位対策の取り組みの基本方針を明確に設定することが必要である。
- (5) 以上のような視点を踏まえて、道路橋における活断層変位対策の検討の流れは図-2のように体系化することができる。同検討フローに従い、大分県別府市内に計画された新設道路橋において活断層変位対策を検討した結果、所要の対策計画を策定することができた。

謝辞：本研究に際しては、京都大学大学院理学研究科竹村恵二教授、(独)土木研究所運上茂樹上席研究員および国土交通省国土技術政策総合研究所片岡正次郎主任研究官の指導を得ている。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 常田賢一：土木構造物における地震断層の工学的対応に関する研究，土木学会論文集 NO.752/I-66,63-77，2004.1
- 2) 国土地理院：1/25,000 都市圏活断層図 別府,2000
- 3) 大分県別府土木事務所：都計単別委第 2-7 号調査委託報告書，2002.8
- 4) 大分県：平成 11 年度地震関係基礎調査交付金 別府-万年山断層帯に関する調査成果報告書，2000.3
- 5) 渡邊武，山村直樹，常田賢一，平石浩光：断層変位の影響を考慮した橋梁の耐震設計，土木構造・材料論文集，第 20 号，99-109，2004.12
- 6) 町田 洋，新井房夫：新編火山灰アトラス [日本列島とその周辺]，東京大学出版会，2003
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編 2002.3
- 8) 入倉孝次郎・三宅弘恵・岩田知孝・釜江克宏・宮腰研・香川敬生：周期帯域に応じた強震動評価法の高精度化，地震災害軽減のための強震動予測マスターモデルに関する研究，平成 12 年度科学技術振興調整費研究成果報告書，209-233，2001
- 9) Takahashi, T., Kobayashi, S., Fukushima, Y., Zhao, J.X., Nakamura, H. and Somerville, P.G.: A special attenuation model for Japan using strong motion data base, Proc. 6th Int. Conf. on Seismic Zonation, 6p. (CD-ROM)
- 10) 日本コンクリート工学協会九州支部：断層変位を受けるコンクリート系橋梁の耐震安全性に関する研究専門委員会報告書，pp.14-53，2002.11
- 11) 鶴野，森重，今井，竹之内：天然ゴム系ゴム支承のせん断変形性能，第 2 回免震・制震コロキウム講演論文集，pp.143-148，2000.11

(2005.3.15 受付)

COUNTERMEASURES FOR A HIGHWAY BRIDGE AGAINST AN ACTIVE SURFACE FAULT DISPLACEMENT

Ken-ichi TOKIDA, Takeshi WATANABE and Hiromitsu HIRAISHI

Because the influence of displacement induced by an active fault, especially an active surface fault on highway bridges has not been clarified, the countermeasures against the displacement by an active surface fault have not been applied in earnest in Japan. However, the investigation results on active faults have been open to the public in recent years in Japan. The construction projects will be not a little related to active faults in the near future. Therefore, it is very important to establish the practical procedures on countermeasures for highway bridges against the displacement by active faults.

In this study, the practical procedures are proposed based on the actual plan for a newly-constructed highway bridge at Beppu City in Oita Prefecture which is the first project considering the effects of an active fault in real earnest in Japan.