

烏溪橋の被害（1999年9月21日台湾集集地震）に関する一考察

運上 茂樹

正会員 工博 建設省土木研究所 耐震研究室（〒305-0804 つくば市旭1番地）

1. まえがき

平成11年9月21日の台湾集集地震では、台中縣、南投縣の台中市周辺を中心に多くの建築構造物・土木構造物で被害を生じた。台湾の地形的な条件から主として東西方向にいくつかの大きな河川が横断しており、これに伴い多くの橋梁が架設されている。

筆者は、平成11年10月4日～8日にかけて土木学会の地震被害調査団の一員として、主として橋梁・道路関係の被害を中心に台湾集集地震の現地調査を行った。

橋梁の被害に関しては、被害原因としては大きく2つに、すなわち、振動による被害と断層変位による被害に分けられる。振動による被害に関しては、支承部の損傷、鉄筋コンクリート橋脚の損傷、橋桁の水平移動が見られたり、架設中のPC斜張橋の主塔基部やケーブル、橋桁に損傷が生じたものも見られた。中には古い時代に建設された橋梁で橋脚の損壊により完全に上部構造が落下したり、橋脚が横倒しになった橋も見られた。ただし、米国のノースリッジ地震や兵庫県南部地震による被害と比較すると、全体としては振動による被害は必ずしも顕著ではないといえることができる。

一方、断層変位による被害に関しては、いくつかの橋で2～9mに及ぶ鉛直あるいは水平変位により、橋桁が落下したり、あるいは、下部構造が基礎から完全に転倒したり、橋脚躯体やケーソン躯体が破壊したりという甚大な被害が見られた。今回の台湾集集地震では、たまたま1橋が断層を跨ぎ被害を生じたというのではなく、いくつかの橋で、また、非常に顕著な断層変位により落橋という甚大な被害を受けたという点では世界的にも初めてのことと考えられる。本年のトルコ・コジャエリ地震においても同様に断層変位による落橋が見られたが、台湾集集地震による断層変位及び被害はさらに規模が大きいと

いうことができる。

こうした断層変位の影響を考慮した構造物の耐震設計を考える場合、どの位置で、どの程度の断層変位が生じ得るか、また、こうした断層変位に対して構造的に、あるいは、システムとしてどのように対処すべきかといったことについて今後具体的に検討していくことが必要と考えられる。こうした点を検討していく上で、まず、台湾集集地震において被害を受けた橋梁の被害メカニズムの分析を行っていくことが重要と考える。

本文では、省道3号が烏溪を渡河する位置に架橋されていた烏溪橋を対象に、被害メカニズムの検討を行うとともに、上下線で生じた異なる被害パターンについて考察を行った結果をまとめたものである。

2. 烏溪橋の構造条件と被害の概要

(1) 構造条件

写真-1は、烏溪橋の全景を示したものである。上下線で2橋あり、上部構造はPC単純5主桁、下部構造は、鉄筋コンクリート橋脚から構成される。調査の段階では、橋梁の詳細な設計条件等の情報を有していなかったが、文献1)によれば、架設年次は上下線でそれぞれ1981年及び1983年、18径間、支間長34.7mで橋長624mである。下部構造は、写真-2に示すようにいずれもRC壁式橋脚であるが、旧橋の方が大きな断面を有する構造である。文献1)では架設年次として2年をおいて架設されたとされているが、下部構造特性や設計コンセプトの大きな違いを見ると、旧橋の方は一部にさらに古い橋があり、この古い橋の上部構造を撤去するとともに、橋脚を補強し、1981年と1983年に上部構造と新橋を架設したのではないかと推定する。ただし、これについては筆者の推定で今後調査が必要である。

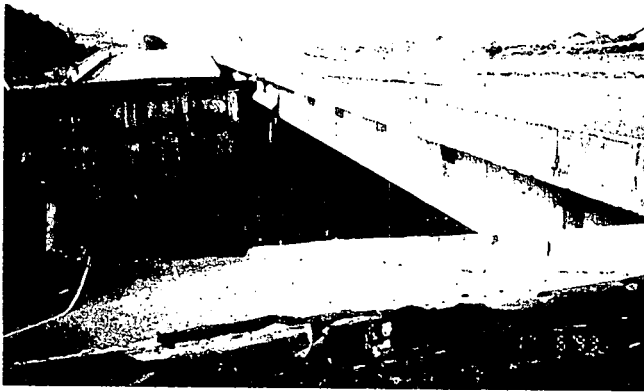


写真-1 烏溪橋の全景(左側が旧橋、右側が新橋)



写真-3 旧橋のP2橋脚

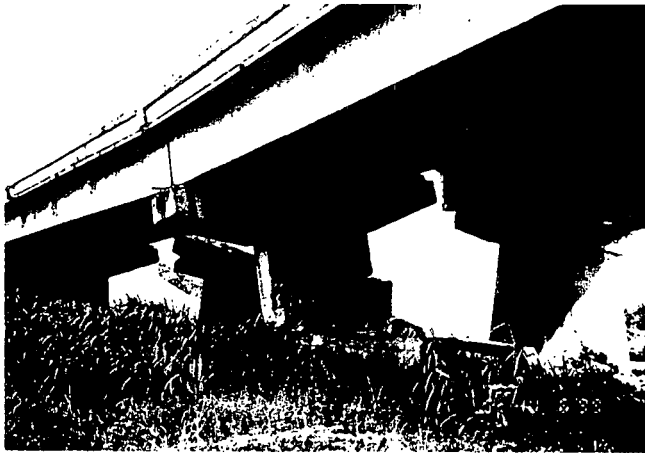


写真-2 烏溪橋の橋脚(左側が新橋、右側が旧橋)



写真-4 新橋のP1橋脚の被害

(2) 地震被害の概要

地震時には、P2橋脚とP3橋脚の周辺で橋梁を斜めに横断するように断層が生じており、ここで、主として水平方向の数mのずれによる断層変位が生じた。橋梁の軸方向と軸直角方向で見ると、概略的には、P3橋脚・P4橋脚側の地盤がP2橋脚・P1橋脚側に数m程度、さらに上下流方向に数m程度の水平ずれの変位が生じた。

その結果として、桁が橋台側に押し込まれ、取り付け盛土がジョイント部で盛り上がりとともに、旧橋側では、橋台から最初の桁がP1橋脚で落下、2つめの桁もP2橋脚側が落下した(写真-1、写真-2)。細かく見てみると、P1橋脚、P2橋脚は写真-3に示すように断面が大きく重力式に近い橋脚であり、ひびわれが生じたり、ひびわれがわずかに開くなどの被害が生じているが被害自体は必ずしも顕著ではない。また、落下した桁の支承部も損傷を受けており、写真-3に示すように桁が水平方向に移動しているのが確認される。

一方、新橋側はかろうじて桁は落下していないが、写真-4及び写真-5にそれぞれ示すようにP1橋



写真-5 新橋のP2橋脚の被害

脚、P2橋脚においてせん断的な破壊が生じ、大きくコンクリートが破壊するとともに、破壊部において大きなずれが水平方向、橋台方向に生じた。さらにP3橋脚においては、写真-6に示すように橋脚ではなく、ケーソン基礎が傾斜するとともに、躯体に大きなひびわれ損傷が生じた。

被害形態の旧橋と新橋の大きな相違としては、橋桁が落下したか否かということのみならず、これに

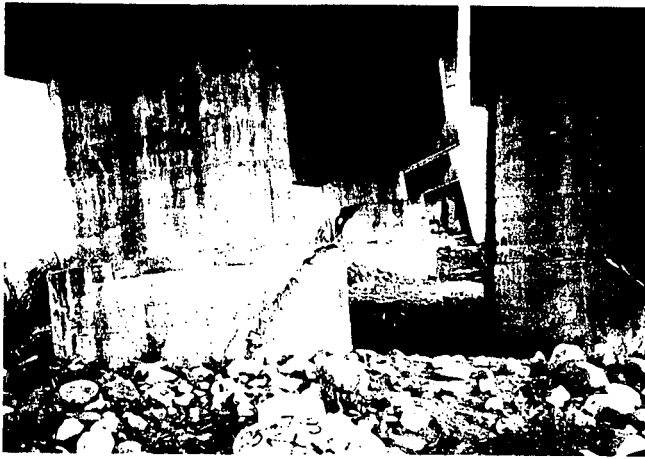


写真-6 新橋のP3橋脚の被害

関連して橋脚に大きな損傷が生じたか否かが非常に重要と考える。

(3) 被害メカニズムの推定

地震記録が必ずしも全てリリースされていないので、現地でのどの程度の振動があったか現段階では推定が困難であるが、周辺の街路灯や案内板の鋼管基部や基礎周辺を見てみると、写真-7に示すように全くといっていいほど動いた痕跡が見られなかった。こうした構造物とは周期特性が異なることが考えられるが、こうした痕跡から判断すると、この位置においては必ずしも橋に大きな被害を及ぼすような強い振動ではなかったことが推定される。

このため、本橋の被害の主要かつ基本的な原因は、P2橋脚～P3橋脚周辺を横断する断層によるずれ変位が本橋の落橋あるいは橋脚などの甚大な被害に結びついたものと推定される。

P2橋脚～P3橋脚周辺を橋を斜めに横断するように走る断層において数m規模の主としてずれによる水平変位が生じたことにより、旧橋側においては、

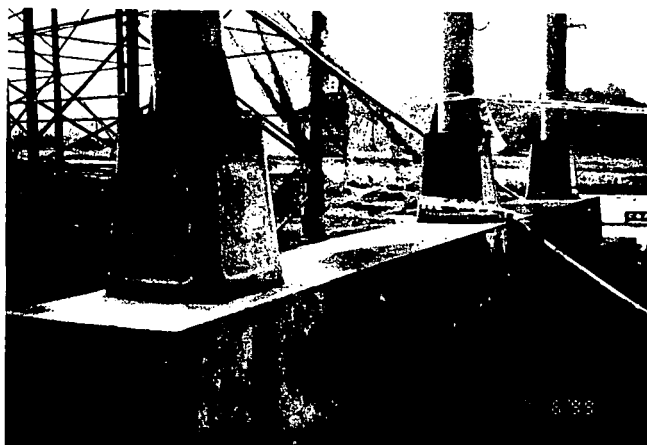


写真-7 橋台付近の街路灯の痕跡

橋桁を橋台側に押しだし、支承を破壊するとともに橋桁がけたかかり長を超えて変位したことから、橋台～P1橋脚間、P1橋脚～P2橋脚間の2連の橋桁がそれぞれP1橋脚側、P2橋脚側において落下した。ここで、重要と考えるのは、橋脚が相対的に頑丈で地震によりほとんど被害を受けていない、すなわち、地盤の変位がそのままほとんど支承部、上部構造に影響を及ぼしたということである。

一方、新橋側でも同程度の地盤変位が生じたが、支承部ではなく、橋脚に橋軸方向、橋軸直角方向の大きなずれを伴う甚大な損傷、変形が生じたために、支承部での変形が大きくならずに上部構造の落下には至っていない。

3. 橋に対する要求性能と望ましい被害形態に関する議論

(1) 破壊形態の比較

烏溪橋では、上下線において構造特性の違いから非常に顕著な被害パターンの違いを生じた。烏溪橋の被害で考えた場合、いずれがより望ましい被害パターンであるかは議論のあるところと考える。

橋脚の破壊モードについては脆性破壊的であり問題があるとしても、落橋という最悪の自体を防ぎ、道路通行者の人命への影響を最大限に小さくするという目的のためには、橋脚に大きな被害が生じた新橋の方がより望ましい被害形態と考えることができる。また、橋梁条件にもよるが、落橋さえを防ぐことができれば、地震後に支保工を立て、緊急交通の確保を図ることも、震後の復旧で通行を確保しながら下部構造を修復することも可能な場合もあると考えられる。

一方、完全に上部構造が落下してしまった場合には、道路通行者への2次災害の影響が大きい。さらに、復旧においても落下した桁が再利用可能か否かの判定が必要になるとともに、橋桁の重量によっては吊り上げて再架設することが困難な場合も生じる。

以上のような観点から烏溪橋の新橋、旧橋のいずれが相対的に望ましいかという比較論では、旧橋よりも新橋の被害パターンの方が望ましいと考える。

(2) キャパシティデザインの重要性

あるレベルの断層変位に対して上部構造の落下を防止するためには、上記のようにいろいろな箇所に変形を吸収して構造全体として変位に対して抵抗することが重要と考えられる。このためには、確実に

橋桁の落下を防ぐことができるような破壊モードを想定し、これが確実に生じ得るように、支承や橋脚、基礎を設計することが重要と考えられる。これは、正にキャパシティデザインの考え方であり、この考え方によりあるレベルの断層変位までは、橋全体としての耐震性を確保することが可能と考えられる。

烏溪橋の旧橋では、支承部に比較し相対的に頑丈な橋脚であったため、地盤の大きな変位がそのまま橋脚天端で生じ、結果として桁かかり長を超えて橋桁の落下に結びついた。このため、仮に支承部の方が橋脚よりも強く橋脚で損傷が生じたならば、新橋と同様の結果になっていたことが想像される。

(3) 変位免震構造の可能性

断層変位に対して構造物の致命的な被害を防ぐためには、どこで、どの程度の断層変位が生じ得るかを明らかにするとともに、断層変位が生じた場合の構造的な対処方法（例えば、変位免震構造）、さらに、構造的に対処が困難な大規模な断層変位に対する対処方法（ネットワークのリダンダシーや早期復旧対策等）を検討していくことが重要と考えられる。

あるレベルまでの断層変位に対しては、その変位を構造物の塑性変形性能や桁かかり長、あるいは変位吸収構造などにより構造的に吸収できるようにすることが重要と考えられる。

例えば、烏溪橋の旧橋で考えてみると、仮に上部構造が連続構造であれば、上部桁は大きな被害を受

けた可能性はあるが、少なくとも今回のような橋が短くなる方向のある程度の変位に対しては、橋桁の落下を防ぐことができたのではないかと推定する。

ただし、断層の特性や橋との位置関係によっては、上下、水平、さらにこれらが同時に、また、規模についても 10 m 程度に及ぶものもあるなど、断層変位の特性と橋の構造条件に応じて変位免震構造などの構造的な対策やシステム的な対策を検討していくことが重要と考えられる。

4. まとめ

本文では、烏溪橋の落橋被害を対象に被害メカニズムの検討を行うとともに、上下線で生じた異なる被害パターンについて1つの考察を行った。

今後、このような被害分析を十分に行うとともに、個々の断層の特性とその断層から生じ得る変位等に関する情報の調査蓄積と、断層変位に対する必要な構造的、システム的な対処方法を検討していくことが重要と考える。

参考文献

- 1) I. Buckle and J.-S. Hwang : Bridge Performance in The 921 Earthquake, Chi-Chi, Taiwan, Proc. of UJNR Bridge Engineering Workshop, Nov. 9 and 10, 1999, Tsukuba