

既設斜角橋台の耐震診断法の開発

構造物技術研究部 基礎・土構造研究室

主任研究員 西岡 英俊

1. はじめに

橋りょうとその下の道路や河川との交差角が直角ではない「斜角橋りょう」では、過去の大規模地震時に支承が破壊されて桁が水平方向に回転し、場合によっては桁が桁座から外れて落橋に至る被害事例が確認されている。斜角橋りょうの桁を支持する斜角橋台の耐震補強を合理的に進めていく上では、弱点箇所の抽出等の優先順位づけが重要であり、その耐震性能を適切に診断する手法を確立することが必要である。

また、斜角橋りょうは、地震時に桁が落橋した場合、その下の交差する道路等を閉塞する可能性があり、「危機耐性」が低い構造形式であるともいえる。そのため交差相手先が緊急輸送路の場合等では、今後明確な耐震診断結果の説明と必要に応じた確実な落橋防止対策の実施が求められることが予想される。また斜角橋りょうは道路や河川と交差する場合に限らず、鉄道同士の交差部（図 1）や鉄道の上空に道路が架かることもあるため、鉄道分野のみならず社会全体としても、地震時の斜角橋りょうの合理的な耐震診断手法の開発は有益であると考えられる。

このような斜角橋桁の地震時の回転については 1995 年の兵庫県南部地震において多発したことから、主に上部工（桁）の橋台との衝突に着目した研究が数多くなされており^{例えば 1)}、実務上も支承部の補強や桁座拡幅、落橋防止装置の設置等の対策が進められてきた。しかしながら、下部工（橋台・橋脚）の応答変位に起因した回転メカニズムについてはこれまで実際にその影響について詳細に検討した研究はほとんどなく、下部工を含めた橋りょう全体系として考えた場合の地震時の斜角桁の回転メカニズムについては未だ解明されていないのが現状である。そこで、本発表では、主に斜角橋台変位に起因した桁の回転挙動による落橋メカニズムについて模型振動実験から明らかにしたうえで、その落橋リスクに着目した耐震診断法について紹介する。

2. 斜角橋りょう全体系の 2 方向加振実験

模型振動実験は、鉄道総研所有の大型振動実験装置（振動テーブル寸法＝7m×5m）を用いて、1 径間分の橋りょう模型（縮尺＝約 1/20）に対して水平 2 方向加振を行った。

橋りょう模型は、振動テーブル上に設置した土槽内の支持地盤（珪砂 6 号、相対密度 $D_r=90\%$ ）上に直接基礎形式の橋台 2 基（線路直角方向幅 350mm、高さ 388mm）を据え、その天端に模型支承を介して支間長 900mm の桁を架設し、その背面には U 型擁壁内に盛土（豊浦砂、相対密度 $D_r=90\%$ ）が続くものとした（図 2）。模型の交差角は直角（90 度）および斜角（45 度）の 2 種類とした。



図 1 鉄道の交差部における斜角橋台の例

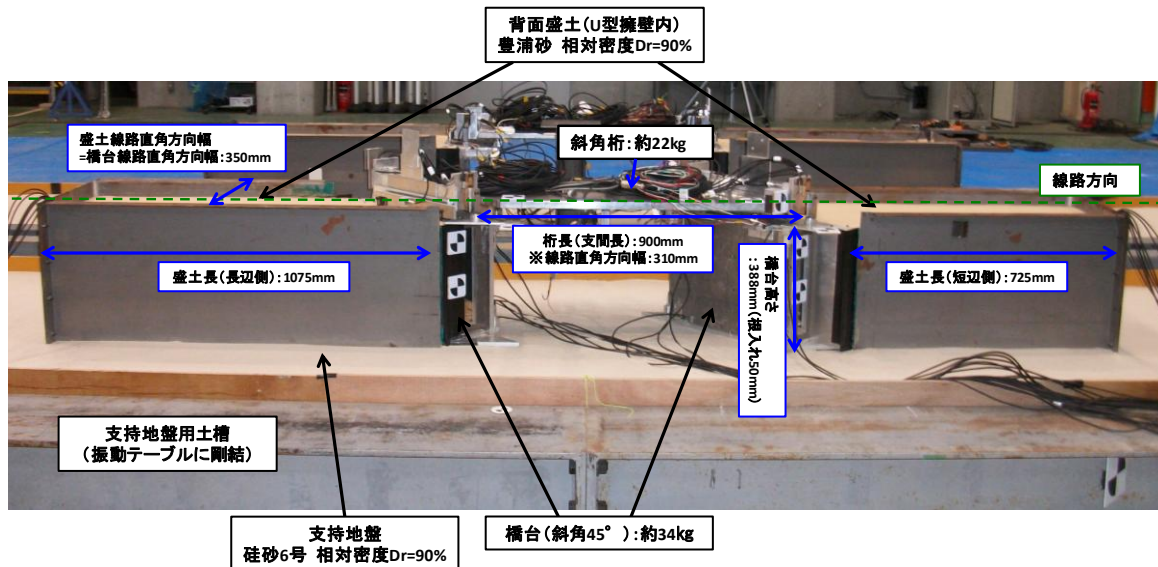


図2 斜角橋台に支持される橋りょう全体系模型の概要

なお、交差角に応じた基礎寸法（フーチング幅）のモデル化については、事前の現地調査・資料調査等から戦前に建設された在来線盛土区間の斜角橋台の設計法を推定し、これに基づいて設定した。具体的には、当時は斜角橋台とし

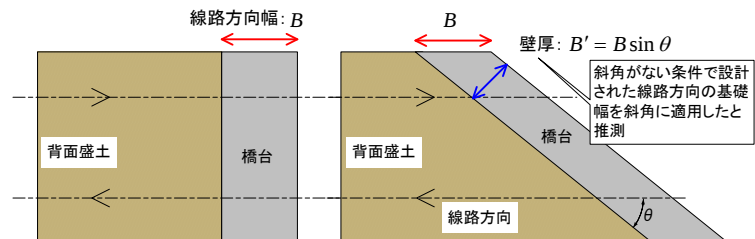


図3 旧式の斜角橋台の設計思想の推測（平面図のイメージ）

ての特殊設計はなされておらず、直角橋台の標準設計を転用するケースが大半であり、図3に示すように斜角によらず線路方向断面の寸法を同一とし、基礎底面積が同一の平行四辺形となるように転用されたケースがあったと推定した。

模型支承は L2 地震動レベルでは支承に何らかの損傷を生じて可動支承としての挙動が期待できなくなる状態を想定して、固定・可動の区別はせずに4か所とも同条件のものとした。具体的には桁と橋台の相対変位がいずれの方向にも25mm程度生じると桁が外れて落橋と判断できるような短円柱状部材を突き合わせ、その界面の両面にサンドペーパーを貼付した。なお、この模型支承の降伏震度（摩擦係数）は0.6～0.7程度で下部工の降伏震度を上回ることを別途確認している。また、橋台天端にパラペットに相当する部材を設け、桁との初期遊間を約5mmとした。

入力波は、周波数特性が3Hz～10Hzの範囲での加速度成分がほぼ一様となるホワイトノイズ波を線路方向と線路直角方向で時刻をずらして水平全方向に同程度の加速度を持つ2方向加振波形を用い、継続時間10秒間で最大加速度を50galから漸増させる多段階の加振とした。加振中は各部位の加速度や橋台背面の土圧を計測したほか、模型上方のビデオカメラで撮影した画像を解析して加振中の振動テーブルに対する桁や橋台天端の変位量を計測した。

最大入力加速度が500gal時（下部工の降伏震度以上で支承の降伏震度未満となる加速度レベル）の桁および橋台天端の位置について、加振前と加振中の最大変位時のものを図4に示す。直角橋台（図4（a））では、桁がストラットの的に効いて両直角橋台の変位を抑制するとともに、直角桁の回転挙動は生じなかった。

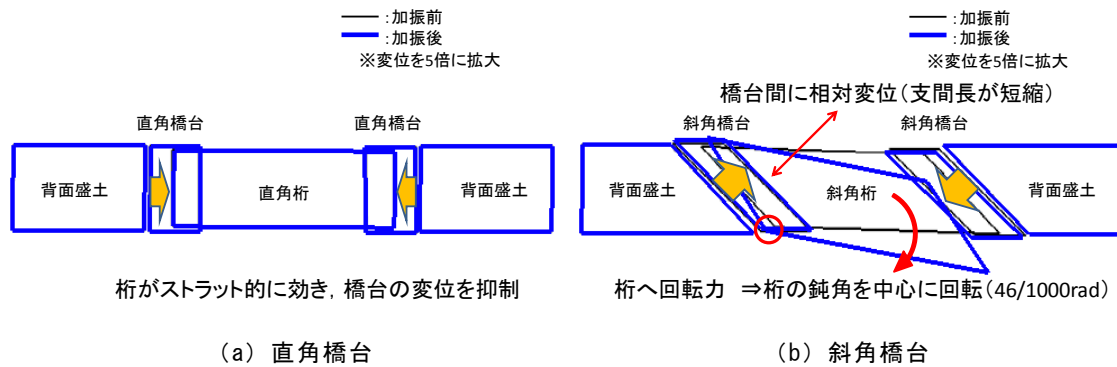


図4 加振前後の桁および橋台天端の水平変位状況（最大加速度 500gal 加振時）

一方、斜角橋台（図4(b)）では、斜角桁が一方の鈍角端を視点に鋭角側が外側に大きく回転する挙動を示し、最終的には支承の限界変位以上に斜角桁が回転して本実験における落橋と判断できる結果となった。加振中の橋台間相対変位（＝支間長の変位，短縮が正）と桁の回転角の関係を、別途実施した静的载荷実験（橋台変位を強制的に付与）の結果と共に図5に示す。加振の中で橋台変位が累積していく中で桁の回転角も増加しており、特に桁両端の遊間が詰まって桁端がパラペットに衝突して以降、その増加傾向が顕著となっていることがわかる。

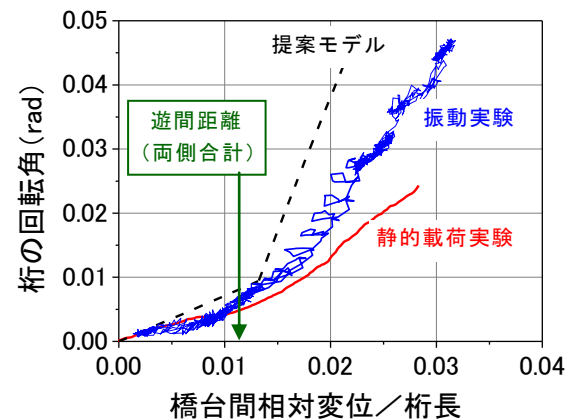


図5 桁の回転角と橋台の相対変位の関係

これらの結果から、斜角橋台の場合には、支承（あるいは移動制限装置等）の降伏震度を下部工の降伏震度よりも高くなるように補強してあったとしても、両橋台間の相対変位によって支承部が破壊されて桁の回転が生じ、特に桁端がパラペットに衝突して以降に回転角が増加するという破壊メカニズムを有することが明らかとなった。

3. 斜角橋台の変位に起因した桁回転角のモデル化

両橋台間の相対変位量と桁の回転角の関係について、桁がパラペットに衝突する前（遊間が詰まる前）とパラペットに衝突した後（遊間が詰まった後）に分けて、それぞれ幾何学的な変形条件に基づくモデル化を行った。桁がパラペットに衝突するまでは可動側支承の線路方向の変形のみで両橋台間の相対変位を吸収するものとする。また、両橋台間の相対変位が大きくなると可動側の遊間が詰まり、可動側の鈍角端がパラペットに衝突する。衝突時の桁の鈍角端同士を結ぶ線と橋台壁面のなす角度が浅いとさらなる固定側橋台と可動側橋台の壁前面方向変位が生じた場合に桁がストラットとして抵抗できず、いずれか一方の鈍角端を中心にして、もう一方の鈍角端がパラペット前面を外側に滑りながら回転するものとする。

この提案モデルにより模型振動実験結果を評価した結果を図5に実験結果と共に点線で示した。提案モデルの折れ点がパラペット衝突時に相当する。衝突後については回転角を過大に評価する傾向があるものの安全側の評価であり、パラペット衝突前後までは概ね妥当な評価が可能なモデルとなっていることが確認できる。

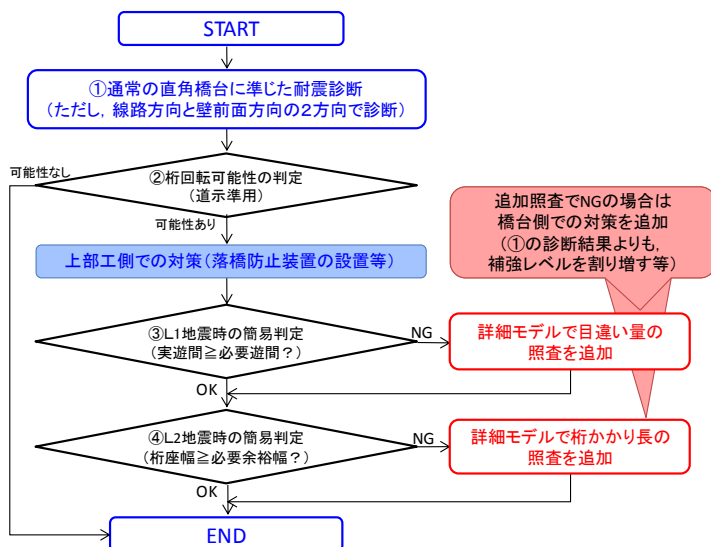


図6 斜角桁の回転を考慮した斜角橋台の耐震診断フロー

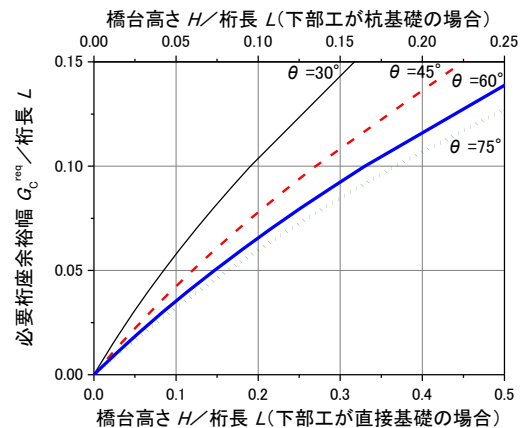


図7 必要桁座余裕幅算定ノモグラム
(線路直角方向の例)

4. 斜角桁の回転変位を考慮した既設斜角橋台の耐震診断法の提案

上記のモデル化により、詳細には斜角橋台の変位に応じて桁の回転角を算出し、L2地震時の落橋（桁かかり長）や L1 地震時の走行安全性（桁の回転によって生じた目違い量）の照査を行えば、斜角桁の回転変位を考慮した耐震診断が可能である。しかしながら、全ての斜角橋台に対して、上記モデル化による検討を行うのは非常に煩雑である。そこで、通常の直角橋台に準じた耐震診断結果よりも、斜角桁の回転を考慮した耐震診断結果の方が危険側となる可能性のある条件を抽出する実務的な耐震診断手法として、図6に示すフローを提案した。

提案したフローでは、まず通常の直角橋台に準じた耐震診断（ただし、通常の線路方向の診断に加えて壁前面方向の診断も追加）を実施する。最初の判定は、幾何学的に斜角の程度が浅く桁がストラットとして期待できる形状を判定するものであり、既往の道路橋示方書²⁾における判定式を準用し、この段階で回転可能性ありと判定された場合の上部工側での対策（落橋防止装置の設置等）も道路橋示方書の取扱いに準じるものとした。次に、L1地震時の簡易判定として、図5に示されるように桁がパラペットに衝突するまでは桁の回転角は比較的小さいことを考慮し、通常の直角橋台の耐震診断時の限界回転角（10/1000rad）を生じた場合でも桁がパラペットに衝突しないことを簡易判定基準とした。最後に L2 地震時については限界回転角（30/1000rad）を生じた場合の桁回転による変位を「必要桁座余裕幅」とし、橋台高さや交差角等の構造諸元のみからこれを読み取るノモグラム（図7）を用いて簡易判定を行うこととした。

5. おわりに

本報告では、斜角橋台の変位に起因して斜角桁が回転挙動を生じるメカニズムを明らかにしたうえで、その影響を考慮した実務的な耐震診断手法を紹介した。なお、提案フローの詳細モデルでの追加照査で NG となった場合の対策としては、橋台自体の変位の発生を上部工側の桁や支承部で抑えるには非常に大きな作用外力で設計することになってしまうため、実際には斜角橋台自体の変位を生じないように下部工側（橋台壁体および基礎）の耐震補強を行うのが現実的と考えられる。

【参考文献】 1) 川島一彦，渡邊学歩：斜橋における落橋防止構造の有効性に関する研究，土木学会論文集 No.675/I-55, pp.141/158, 2001. 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，丸善，2012.