

## 大分自動車道別府明礬橋の耐震補強計画

(株)ドユー大地	正会員	○伊川 嘉昭
西日本高速道路(株)九州支社		今村 壮宏
西日本高速道路エンジニアリング九州(株)	正会員 博(工)	藤岡 靖
九州大学大学院工学研究院	正会員 工博	大塚 久哲

### 1. はじめに

阪神淡路大震災以降、橋梁の耐震補強は精力的に進められており、最近では、今まで培われた技術を用いて、より複雑な構造をもつ特殊橋梁と呼ばれる橋梁の耐震補強が行われている。このような背景の中、筆者らが行った鉄筋コンクリート固定アーチ橋（以下、RC固定アーチ橋という）の耐震補強の計画について、ねじりに対する照査方法と外ケーブルを用いた対策を中心に報告する。

### 2. 別府明礬橋の概要

別府明礬橋は、大分自動車道の別府IC～大分IC間に位置する橋長411mのRC固定アーチ橋で、1989年の竣工以来、20年以上経過している。アーチ支間長235mは、完成当時東洋一であった。図-1、2に断面図ならびに側面図を示す。補剛桁ならびにアーチリブは箱桁形式であり、上下線2連の補剛桁を1連のアーチリブで支持している構造である。

〔橋梁諸元〕

- ・道路規格 : 第1種第3級A規格
- ・橋梁形式 : 鉄筋コンクリート固定アーチ橋  
(+PC2径間連続ラーメン橋)
- ・橋長 : 411.0m
- ・支間長 : 235.0m (+2@30.0m)
- ・有効幅員 : 9.0m
- ・耐震区分 : B種 B地域 (大分県  $C_z=0.85$ )
- ・地盤種別 : I種地盤

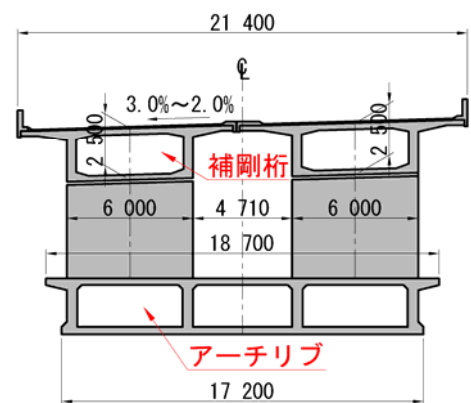


図-1 別府明礬橋断面図

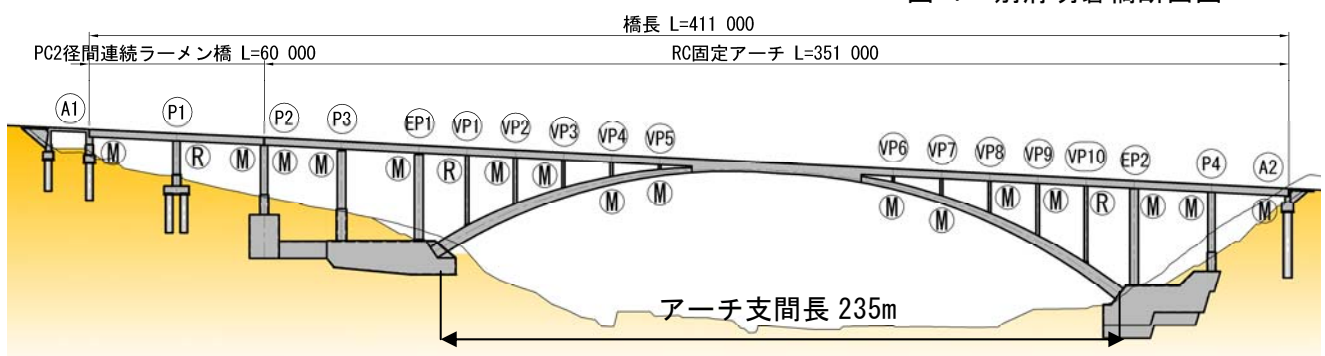


図-2 別府明礬橋側面図

### 3. RC固定アーチ橋の耐震性照査

#### 3.1 照査モデル

照査モデルは、アーチ橋という構造特性に配慮し、図-3に示すような軸力変動や2軸曲げの影響を解析上考慮できるファイバーモデルを採用した。なお、解析方法は、動的複合非線形解析とした。

### 3. 2 照査項目

照査は、橋軸方向ならびに橋軸直角方向に対して行うものとし、曲げやせん断の照査と併せ、橋軸直角方向の地震時水平力により生じるアーチリブや補剛桁のねじりに対する照査を行った。

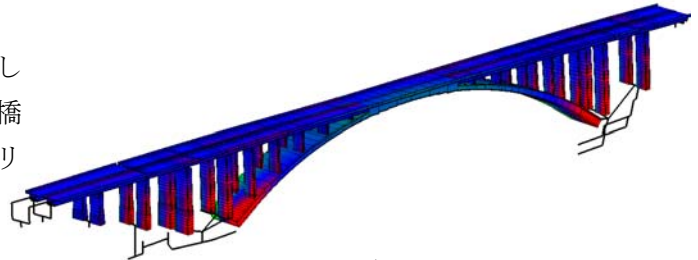


図-3 ファイバーモデルによる解析結果事例  
（掲載は直角方向固有値解析結果を示す）

### 3. 3 ねじりに対する照査について

#### （1）ねじり非線形性を考慮したモデル化

従来のねじりに対する照査は、曲げによるひび割れの影響を考慮し、ねじり剛性を1/10～1/20に低下させて行う事例が多かった。しかし、最近の実験結果により、曲げとねじりの相関次第で、ねじり剛性の低下は、もっと小さいことが判明している。そこで、別府明礬橋のアーチリブを模した中空コンクリート断面のねじり特性に関する研究・実験から得たねじりの非線形履歴特性を武田モデルによる骨格曲線としてモデル化した解析を行った。

#### （2）モデル化のポイント

なお、ねじりの部材要素は、図-4に示すようにファイバー要素の構成節点（節点*i*と節点*j*）を共有させ、新たに非線形ねじり剛性が表現できる非線形回転バネ要素を追加した二重要素モデルにより作成した。

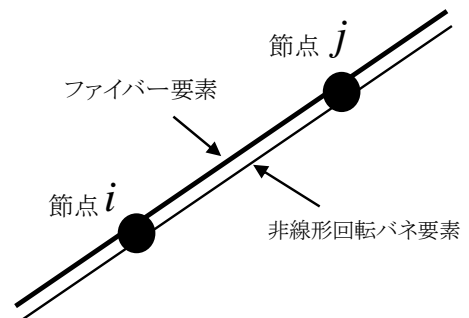


図-4 節点を共有した二重要素モデル

#### （3）曲げとの相関性

過去の実験結果から、曲げとねじりが複合载荷する場合、ねじり耐荷力が低下することが確認されている。そこで、別府明礬橋の各部材の曲げとねじりの相関関係を整理し、その複合载荷比率を確認した。

図-5に、別府明礬橋のねじり非線形性を考慮しないモデルで解析した時の全部材の曲げとねじりのモーメント比を整理した相関図を示す。なお、図中の降伏相関曲線は、実験から得られたもので、ある一定の複合载荷比率になると降伏値が低下することが表されている。

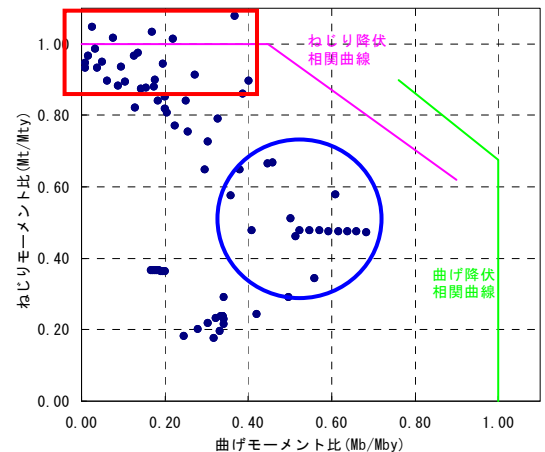


図-5 曲げとねじりの相関図  
（別府明礬橋）

相関図では、ねじりモーメントが降伏を超える、または、降伏に近い部材は、ねじり卓越の範囲（□の範囲）にあり、相関曲線からも複合载荷の影響を無視できる。

一方、曲げとねじりが複合载荷している部材（○の範囲）は、ねじり、曲げとも降伏に達していない。曲げとねじりの複合载荷は、非線形特性の中で降伏～終局の範囲に影響を与えるため、ねじりモーメント比が降伏相関曲線を超えていない部材(<1.0)には影響ない。

以上から、本橋では複合载荷の影響を考慮する必要のある部材はないため、複合载荷による影響を無視した純ねじり非線形の骨格曲線を用いて解析を行った。

#### （4）ねじりに対する許容値の設定

非線形性を考慮するため、ねじりに対する照査は、降伏後のねじり率（ねじり回転角/要素長）の大きさ（塑性率）で照査するものとした。

許容塑性率について、道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編や設計要領第二集では非線形性を考慮した、ねじり照査に対する許容値の規定がない。そこで、ねじりに関する既往の実験結果を確認したところ、ねじりの最大耐力作用時においても実験供試体にかぶりコンクリートの剥落は見られなかった。

要求性能を「耐震性能2」とした曲げ照査の許容塑性率は、かぶりコンクリートが大きく剥落する前の状態で損傷を抑えるために、終局変位に対して安全係数  $\alpha=1.5$  (タイプⅡ) を設定している。したがって、曲げの照査同様、耐震性能2における部材の損傷状態を「かぶりコンクリートの剥離」とすると、ねじり照査では終局変位を許容値としても ( $\alpha=1.0$ ) 要求性能2を満足すると考えられる。しかし、コンクリートのねじり特性に関する研究は新しく、研究成果のデータが少ないことや、曲げ照査においては、要求性能の低い「耐震性能3」でも安全係数(タイプⅠ  $\alpha=2.4$ , タイプⅡ  $\alpha=1.2$ ) を設定していることから、ねじり照査における安全係数はタイプⅠで  $\alpha=2.4$ , タイプⅡで  $\alpha=1.2$  に設定した。

### 3. 4 耐震性照査結果

照査結果を図-6に示す。曲げに対しては全ての部材で許容値を満足する一方で、せん断に対しては、橋台、橋脚、鉛直材の一部で、補強が必要という結果になった。

ねじりに対しては、非線形特性を反映した耐震性照査の結果、アーチリブが許容値を満足する一方で、補剛桁の上下線P3~VP1間、VP8~P4間は許容値を満足せず、耐震補強が必要という結果になった。

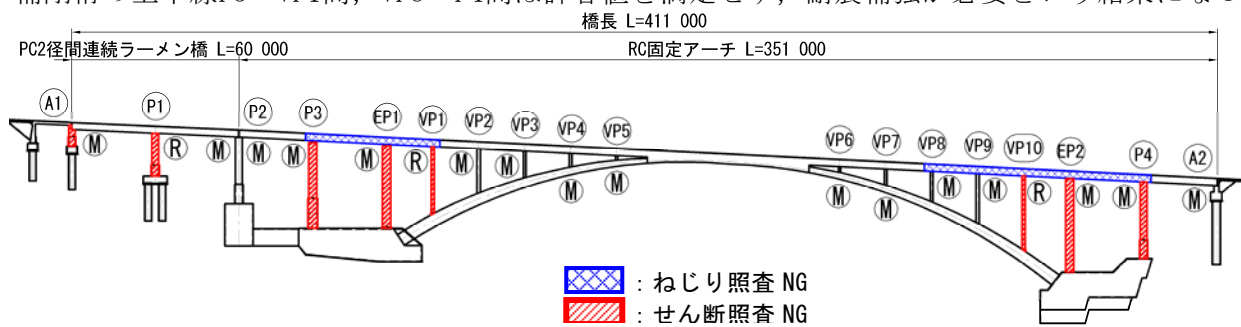


図-6 既設の耐震性照査結果

## 4. 耐震補強計画

### 4. 1 ねじりに対する補強

本橋のねじりに対する補強方法は、図-7, 8に示すように、箱桁形式の補剛桁内部の軸心付近に外ケーブルを直線配置し、各径間の軸力のみを増加させる外ケーブル補強を計画した。

表-1 外ケーブルの鋼材種別と配置本数

	P3~EP1	EP1~VP1	VP8~VP9	VP9~VP10	VP10~EP2	EP2~P4
鋼材種類	12S15.2	19S15.2	12S15.2	19S15.2	19S15.2	19S15.2
本数 (本)	2	6	2	6	8	4

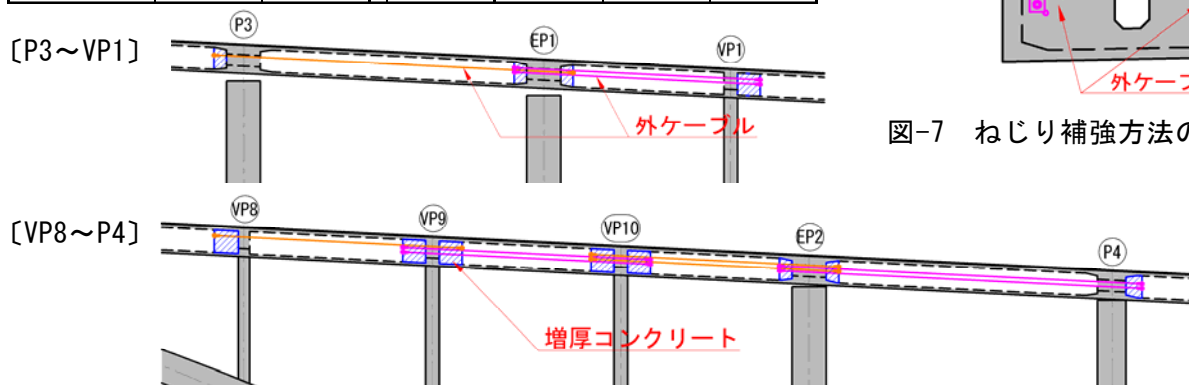


図-8 外ケーブル補強 (側面図)

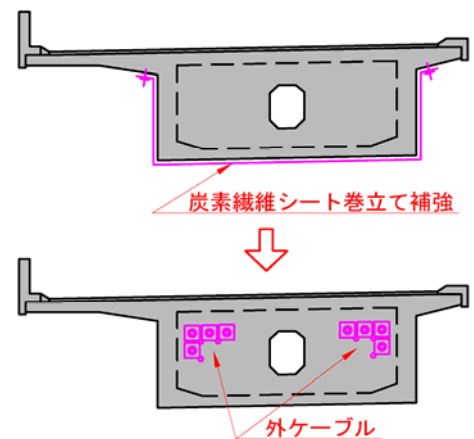


図-7 ねじり補強方法の比較

ねじりに対する補強方法は、炭素繊維シート(以下、CFRPという)巻立て補強の事例がある。補剛桁を補強する場合、図-7の上図に示すように、橋面を除く3面にしかCFRPを貼り付けることができない。しかし、CFRPの3面貼り付けによる、ねじり補強の有効性を確認した事例はない。

一方、実験結果から、軸力が増加するとねじり降伏モーメントや降伏・終局ねじり率が向上することが判明している。これは、図-9に示すように、許容塑性率相当のねじり率(許容ねじり率)が向上し、軸力増加がねじりに対する補強方法として有効であることを示す。

軸力増加量は、図-10に示すように、概ね既設断面の軸力に対し、2倍程度であった。また、一部、既設断面で軸力が小さい部材は、6~8倍程度の増加となった。

外ケーブル補強による効果は、図-11に示すように、降伏・終局ねじり率が1.1~1.5倍となり、耐震性を満足することで確認した。また、外ケーブルによる増加応力に対して、補剛桁のオーバープレストレスの照査を行い、安全性を確認している。

#### 4. 2 せん断補強

橋台、橋脚、鉛直材のせん断に対する補強方法は、死荷重や剛性への影響が小さく、施工性に優れたCFRP巻立て補強を選定した。

#### 5. まとめ

別府明礬橋の耐震補強計画の結果を基に、主に地震時のねじりに着目したRC固定アーチ橋の耐震補強計画のひとつの案として、ねじりの非線形特性を反映した解析手法と、ねじりに対する外ケーブル補強の有効性を示した。

ただし、本設計は、曲げとねじりの相関性に注目しているものの、せん断の同時性については考慮していない。今後は、曲げ同様にねじり耐力とせん断耐力の相関性に着目した検討、及び、曲げによるせん断応力とねじりによるせん断応力の合成応力に対する照査を行う必要があると考えられる。

最後に、本設計において、ご助言、ご協力を賜りました関係者の皆様に心より感謝を申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 大塚, 宇山, 秦: RC柱部材のねじり剛性低下の定式化と動的解析への適用の研究, 構造工学論文集 Vol. 55A, 2009. 3.
- 2) 箆島, 大塚, 福永, 山崎: 曲げとねじりを受ける3室中空断面RC部材の力学特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集 Vol. 32, No. 2, 2010.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002. 3.
- 4) 土木学会: 橋の動的耐震設計, 2003. 3.

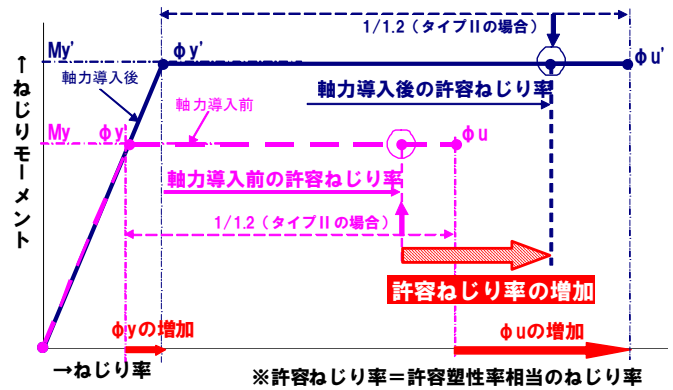


図-9 外ケーブル補強前後の許容ねじり率の変化

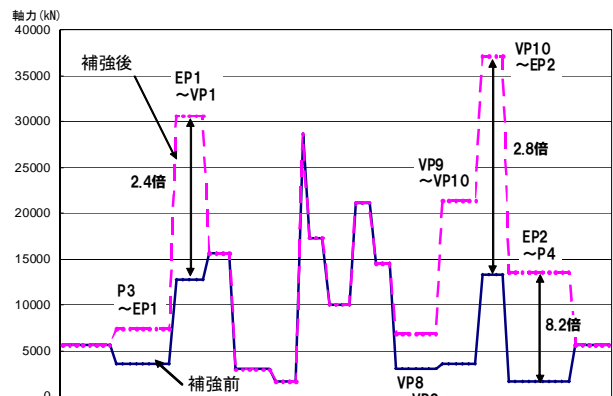


図-10 外ケーブル補強前後の軸力の変化

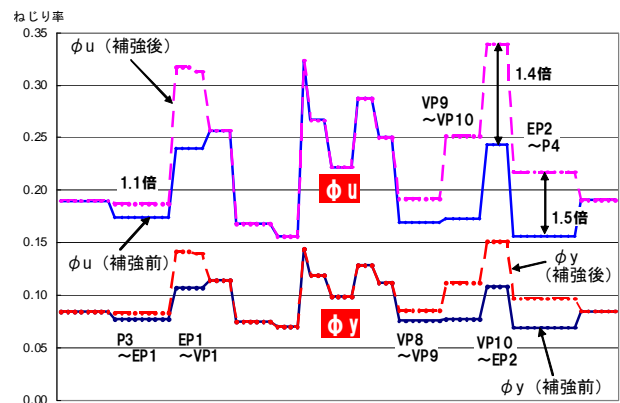


図-11 外ケーブル補強後のねじり率の増加