

## 3章 留意点と今後の課題

### 3.1 補強設計

#### (1) 全般

補強後の橋脚の耐震性能は、基本的には新設構造物のそれと同等のものが要求されている。現在の新設構造物に対する耐震設計法は道路橋と鉄道橋とは必ずしも同じでなく、設計水平震度、じん性率評価法等が両者で異なっている。そのため、補強後の橋脚の耐震性能も両者で差が生じている可能性がある。しかし、共通していることは、先の大震災のあと要求される耐震性能がレベルアップされおり、補強の程度も高いものが期待されていることである。

新設構造物の耐震設計はいずれも非線形地震応答解析を基本にしたものに移行する趨勢にあるが、補強設計では対象構造物の数が多いこともあって通常はその簡便法であるエネルギー一定則が用いられている。エネルギー一定則によって補強設計を行うときは、構造物の降伏時固有周期とじん性率の2つが必要となる。ただしこの場合、補強後の橋脚の荷重-変位履歴曲線が新設構造物と同程度かそれ以上のエネルギー吸収能力を有していることが暗黙の前提になっている。

#### a) 目標とする耐震性能の向上

大震災前の耐震設計基準では最大で1g相当の設計地震荷重を考慮していたが、大震災後は1.5g～2g程度の設計地震荷重も考慮するケースが生じている。すなわち、耐力増加やじん性向上など補強目的に関わらず、補強のレベルが大震災前に比べて高いところに設定されるようになった。この観点から見ると、特に大震災前に行われた耐震補強実験では、現在要求されているものよりも補強量の少ない試験体も多く含まれている。したがって、そこで得られたデータを外挿して用いる時には注意が必要である。例えばRC橋脚においてじん性向上を目的として横方向補強量を著しく大きくすると、部材の破壊モードは細部において柱筋座屈型から柱筋破断型に変化する。その結果、じん性率は次第に頭打ちになり、横方向補強量の増加の割にはさほど改善されないことがある。

#### b) 剛性変化

耐力増加型の補強法を採用した場合、補強後に部材剛性が無視できないほど増加する場合がある。部材剛性が変化すると固有周期も変化し、目標とする耐震性能レベルの見直しが必要になるので注意が必要である。また、じん性向上型の場合でも、矩形断面橋脚におけるコンクリート充填型円形鋼板巻立てや、鋼製橋脚におけるコンクリート充填補強のように剛性も同時に増加するものに対しては、その変化量をチェックしておく必要がある。

#### c) じん性率

設計で用いるじん性率（終局変位と降伏変位の比）の値は、基本的に模型実験の結果を参考にして決められる。その際、部材の降伏耐力値を知る必要がある。耐力増加型の補強を施した部材では引張り補強材が多段配置となり、その間隔は大きくかつ後施工補強材の材料特性が原橋脚の鋼材と異なることも少なくない。このような場合の降伏耐力は、原則としては履歴エネルギー吸収能力を十分発揮し始める時点での耐力値を採用すべきであるが、具体的な設定法のコンセンサスは得られていない。

なお、土木学会コンクリート標準示方書耐震設計編（平成8年版）では、RC部材の降伏耐力として、“鉄筋に発生している引張り力の合力位置の鉄筋が降伏するとき”と定義している。この考え方には“履歴エネルギー吸収能力が発揮される時点”が考慮されている。したがって、特に後施工補強材の材料特性が鉄筋と同じ場合には、この方法によって降伏耐力を設定することが可能であろう。また、道路橋示方書では、RC橋脚の降伏耐力は終局変位に対応する耐力とし、この値を最外縁鉄筋が降伏するときの割線勾配で除して降伏変位を求めようとしている。したがって、特に後施工補強材の材料特性が鉄筋と同じときには、この方法に準じれば新設構造物の場合と同様にじん性率を求めることが可能であろう。

#### d) 履歴エネルギー

荷重-変位履歴曲線の形状は、地震に対するエネルギー吸収能力の大きさを左右する。特に耐力増加型でかつある程度のじん性を期待する場合は、等価減衰係数と塑性率の関係がRC部材の場合と大きく相違しないことを実験データにおいて確認しておく必要がある。

## (2) 設計検討

橋脚の耐震補強設計においては、一般に曲げ耐力、せん断耐力およびじん性の検討が必要になる。

耐震補強法のうちの鋼板巻立て法について述べると、道路橋では、曲げ耐力に関しては基部アンカーの耐力を考慮して鋼板の有効断面積を計算し、また、段落し部分では鋼板断面積を用い、RC部材として計算している。せん断耐力とじん性率に関しては鋼板の断面積を用い、RC部材として計算している。鉄道関係ではRC高架橋やRCラーメン橋台には曲げ耐力増加法を想定しておらず、せん断耐力に関してはRCと鋼板による累加式を用い、じん性率に関しては補強前RC部材のじん性率を鋼板の補強鋼材比で補正する経験式を用いている。このように、RC橋脚の鋼板巻立て法においては、道路関係と鉄道関係では設計検討のやり方が異なっている。

連続繊維巻立て法(現在、基準は鉄道関係)は、主にせん断補強とじん性向上に用いられている。せん断耐力の評価には、補強材に降伏棚がなく弾性材料であるので配置場所の違いによる抵抗負担分のばらつきを考慮し、RCにおける評価式に低減係数を導入して用いている。RCではせん断補強筋の降伏強度に上限が設けられているが、連続繊維では実験結果を基にこれより大きい値が用いられている。じん性率の評価には、補強前橋脚の曲げ耐力とせん断耐力の比などから成るRC式を補正する形で連続繊維の補強鋼比を考慮する経験式を用いている。

鋼製橋脚のコンクリート充填法(現在、基準は道路関係)では、鋼材を鉄筋断面積に換算してRC部材としての曲げ耐力とじん性率の評価を行っている。ただし、通常の鋼製橋脚では帯鉄筋と見做せる鋼材量が多く、コンクリートに対して十分な拘束力が期待できることから、コンクリートの応力~ひずみ関係において応力の最大値を設計基準強度の2倍としている。一方、コンクリート充填橋脚の破壊が圧縮側パネルの外側への座屈で決まることから、圧縮側鋼材に対し降伏後ひずみの進行とともに応力が低下する応力~ひずみ関係を導入することで、局部座屈の影響を安全側に考慮するとともに、終局状態はコンクリートでなく鋼材のひずみ量( $\epsilon_u=0.05$ )で規定している。

以上のように、どの補強法も合成構造という点では共通であるが、基になっている耐震設計基準の違いや補強法の違いによって、補強設計法が異なっているのが現状である。

## (3) じん性率と軟化曲線

RC橋脚においては、鋼板巻立てと連続繊維巻立てのいずれにおいても、大きなじん性向上を期待し巻立て量を多くすると、前述のように細部において破壊モードが柱筋の座屈型から破断型に変化する。特に柱筋破断型の場合、所要のじん性率が得られてもその後、変位の増加に伴い柱筋が多数破断して耐力が急激に低下することになる。一方、柱筋座屈型の場合は、じん性率は鉄筋破断型よりも小さいが耐力低下は比較的緩慢であり、大変位での残存耐力が鉄筋破断型と逆転することもある。特に異なる高さの橋脚を有するラーメン橋のような不静定構造物では、各橋脚のじん性率よりも構造系としての粘りが重要となるので、柱筋座屈型の方が有利になることもありうる。したがって、橋脚の補強設計においては、構造系としても良い方法かどうかを併せて考えることが大切である。

## (4) 鋼板巻立て法における橋脚下端の隙間

円形鋼板コンクリート充填型を除く非定着型鋼板巻立て部材のこれまでの実験によると、隙間があるものに比べ隙間がないと曲げ耐力は相対的に大きい値になっている。一方、充填厚さの小さいエポキシ樹脂注入の場合は両者に差が現れていない。このため、曲げ耐力の増加は、主として補強後に断面寸法が増加することによりもたらされると考えられる。ただし、鋼板厚さが大きくかつ横拘束が大きい場合には、鋼板が圧縮鉄筋として作用しかつ圧縮コンクリートの劣化が抑制されるので、この影響も現れる可能性がある。

すなわち、極小断面柱部材のモルタル充填型鋼板巻立ての場合や大断面橋脚でもコンクリート充填型の場合には、柱下端に隙間が無いと耐力が増加するので、じん性向上を目的とした耐震補強法を目指す場合には注意が必要である。鋼板の組み込み作業など施工上の制約から隙間を設けざるを得ないこともある。隙間が過大になるとじん性率も低下するので、この点からの注意も必要である。

いずれにせよ模型実験の結果をみるときは、実物と模型の寸法比等の相似則を通して評価し、実橋脚に反映することが大切である。

## (5) 連続繊維補強

連続繊維をせん断補強材として用いる場合、作用せん断力と繊維ひずみとの関係を未だ予測することは困難で

あり、繊維破断型の破壊の場合および繊維破断型でない場合ともに、せん断耐力に対する繊維の寄与分が精度よく予測できないのが現状である。また、繊維破断時のひずみにも付着切れが既に起こっているのかどうかに関係するので、設計強度として母材の1軸引張り強度をどの程度を低下させればよいのかについても今後詰めていく必要がある。

また、橋脚断面の隅角部の面取りに関しては、繊維の種類（カーボンやアラミド）によって影響度合が異なるので、これに留意して面取りの大きさや形状を決める必要がある。

### (6) 鋼製橋脚コンクリート充填法

これまでの研究から、コンクリートを充填した橋脚の耐力は合成構造の全塑性耐力にほぼ等しく、これは補強前の降伏耐力の2倍程度に増加することもある。橋脚躯体の耐力を基礎やアンカーの耐力より小さくするという基本に従えば、このような場合、基礎やアンカーも補強してその耐力を増加させなければならなくなる。鋼製橋脚の耐震補強に際しては、補強に伴う地震荷重の増加が基礎やアンカーに及ぼす影響を小さくするようにし、これらの部分で追加補強をしないようにすることが大切である。

したがって、基礎やアンカー部の終局耐力との比較において、コンクリート充填後の橋脚耐力がこれを下回る場合はコンクリート充填補強法を、逆に充填後の耐力が大きいようであれば耐力上昇がさほど大きくない鋼材補強（コーナー・プレートのボルト締結補強あるいは隙間開け鋼管巻立て補強など）を選定することが基本となる。

## 3. 2 補強法の選択と留意点

RC橋脚の耐震補強法には、鋼板巻立てや連続繊維巻立て以外にRC巻立て法がある。また、鋼製橋脚では、コンクリート充填のほか鋼製スチフナーを設ける方法もある。更に広い意味での耐震補強法には、ラーメン橋脚に壁を増設したりラーメン高架橋の橋軸直角方向の柱間にブレース材を設けるなど構造系を変更するやり方、および桁下に免震装置や反力分散装置を設ける橋梁の免震化工法などがある。したがって、補強法の選定にあたっては本文で取扱った3種類の方法だけでなく、他の方法も念頭においてその橋梁の諸条件に見合った最適な方法を選定すべきである。

特に巻立て法とコンクリート充填法に限れば、補強法の選定にあたって以下の項目を予め検討しておく必要がある。

|             |   |
|-------------|---|
| 経済性         | (材料、施工、保守管理)  |
| 環境条件        | (建築限界、河川阻害率、腐食環境、衝突、擦り減り作用、<br>高電圧電源の有無、近隣火災の影響)          |
| 作業性         | (重機などのアクセス、補強材の可搬性、ハンドリング、<br>必要作業スペース、近隣の引火物の有無、桁下店舗の有無) |
| 社会的条件       | (溶接工、連続繊維貼付け工)  |
| 美観          | (断面変化、不陸、色)   |
| 基礎の耐力とのバランス | (重量増加、基礎への常時の負担増、地震時の負担増)                                 |
| 保守          | (防食、鋼製橋脚の接合ボルト取替え)  |

各補強法に関する施工上の留意点はつぎのとおりである。

#### 鋼板巻立て：

- ・ 専門工（溶接工）の確保
- ・ 溶接管理
- ・ 充填材の注入の確認
- ・ 表面処理（耐食性）
- ・ 美観（出来形凹凸）

#### 連続繊維巻立て：

- ・ 断面隅角部面取りと仕上げ精度

- ・衛生・環境に対する配慮（材料微粉末）
- ・モーターなど電気設備に対する配慮（材料微粉末）
- ・巻立て管理
- ・表面保護（耐衝突、耐火、耐候）

#### 鋼製橋脚コンクリート充填補強：

- ・接合部ボルト取替えなどのメンテナンス
- ・コンクリート打設孔、空気孔
- ・コンクリート打上り面の確認

### 3. 3 模型加力実験

#### (1)対象橋脚

耐震補強の実験研究は大震災前からも行われ、そして大震災後に飛躍的な進歩を見せた。しかしながら、RC橋脚に関する研究の多くは中実矩形断面に関するものであり、中空断面や円形断面橋脚の補強に関する研究例は少ない。地下構造物の多くは大震災前は耐震検討があまり行われていなかったこともあり、高軸力を受けるRC柱部材の耐震補強に関する研究は少ない。壁式橋脚に関しては研究成果が出てきているものの、一般に大断面橋脚を意識した研究例は必ずしも多くない。

鋼製橋脚においては耐震設計でじん性の検討が従来行われなかったため、その耐震補強に関する研究は主として大震災後に行われている。しかし研究例は必ずしも多くはない。

##### a) RC中空断面橋脚

RC中空断面橋脚においては、せん断耐力のコンクリート分担分が中実断面橋脚に比べて小さく、内側の柱筋も自由面に近いという特徴を有している。せん断とじん性に関する中実断面における補強法がそのまま適用できるかどうか必ずしも明確になっていない。断面の中立軸がフランジまで達せずにウェブ内にあると、フランジ部は全圧縮の状態になる。その場合の内側柱筋の座屈に対する抑制策が必要なかどうかを判断できる実験データが現在のところ得られていない。この点に関する実験研究が今後望まれる。

##### b) RC円形断面橋脚

RC中実円形断面橋脚の実験データは必ずしも多くない。しかし、一般に巻立て補強によるコンクリートの拘束と柱筋の座屈抑制の効果は、同じやり方の矩形断面に比べ大きい。これは、円形断面の場合、その曲率によってフープテンションが反作用として有効に効くからである。したがって中実円形断面の場合は、矩形断面橋脚に関する補強法を適用すれば安全側の補強が可能と考えられている。

##### c) RC高軸力柱部材

軸力と曲げが同時に作用するRC柱の釣合い破壊時（コンクリートの圧壊と引張り鉄筋の降伏が同時に起きる状態）の軸力比（作用軸力と軸圧縮強度の比）は、およそ0.45～0.55の範囲にある。軸力比がこれより大きいとコンクリートの圧壊が先行して脆性破壊し、小さいと鉄筋の降伏が先行するねばりのある破壊を呈する。しかし、鉄筋降伏先行であっても軸力が高いほどコンクリートの圧壊が早期に起こり、水平力に対する大きな変形性能は期待できない。このような高軸力柱部材の耐震補強に関する研究例は極めて少ない。地下鉄中柱のように地震力が周辺地盤からの強制変位と見做される部材では、柱部材の水平抵抗や履歴エネルギー吸収能力よりも軸力を保持してどこまで変形できるかが重要である。一方、地上構造物のように地震力が慣性力によって生じる場合には、水平荷重－変位包絡線と履歴エネルギー吸収能力の両方が重要になる。高軸力部材においては一般に等価減衰係数としてのエネルギー吸収能力は低軸力部材よりも小さくなるので注意が必要である。

##### d) 鋼製橋脚

前述のように、鋼製橋脚の補強においてはアンカー部の耐力とのバランスによってコンクリート充填が採用できないケースも出てくる。コンクリート充填のメリットであるじん性の大幅改善効果を活かすべく、補剛パネルの座屈を抑制しつつ曲げ耐力の増加を低減する手法の一つとして、橋脚内部に中空部を設けてコンクリートを充填するアイデアも出されているが、効果を定量的に判断できる実験データはこれまでのところ得られていない。この点に関する実験的検討が今後望まれる。

また、阪神大震災において橋脚自体は殆ど損傷を受けていないもののアンカーボルトの降伏に伴うボルトの抜け出しによって橋脚が大きく傾斜して使用限界状態に至った例も見られている。したがって、橋脚全体としての合理的補強法・設計法を確立するためにはアンカー部、さらには基礎部も含めた終局挙動の検討を今後も継続して

いく必要がある。

## (2)加力方法

模型加力実験で求められるじん性率の値は、実験における加力方法の影響をかなり大きく受けることが知られている。すなわち、交番加力と単調増加加力、塑性率の増加ステップ間隔、および同一塑性率における繰り返し回数などによって結果が異なってくる。既往の補強に関する実験研究では（新設構造を対象としたものも含め）、研究者によって異なり、加力方法に統一性がない。このことは、多くの実験データを総合的に検討することを困難にしている。

特に繰り返し回数については大震災前は10回または3回が多かったが、大震災後は1回の場合も少なくない。繰り返し回数1回の模型実験は、直下型地震による震源付近の地震動の繰り返し回数が少ないことを考慮したものである。したがって、海洋型もしくは遠距離地震による設計地震動に対して繰り返し回数1回の実験データを用いるときは、じん性率を割引いて考える必要がある。

今後は、耐震設計で想定する地震動の繰返し特性とRC橋脚のじん性についての研究が必要である。

## (3)模型寸法の影響

ラーメン高架橋などの比較的小断面部材を除き、大断面RC橋脚の多くは縮小模型実験の結果を基に具体的な補強法が決められている。縮小模型ではその殆どにおいて、実物に比べて相対的に太径の鉄筋と太径のコンクリート用骨材が用いられている。そのため、柱筋の座屈やコンクリートの圧壊、剥落などに関して、模型実験では実物に比べて破壊の局所化が緩和されている可能性がある。その影響が拘束効果などの補強効果にどのようにきいているかは、補強のメカニズムと併せて今後検討していく必要がある。また、相対的に太径の鉄筋を柱筋に用いた場合は、フーチングからの抜け出し量が一般に大きくなることに留意する必要がある。

## (4)補強効果の定量化

補強部材の耐震実験では、このように補強すれば大丈夫であるといういわゆる確証実験的なものが多い。既往の殆どの実験では、せん断補強した試験体は曲げ破壊型に破壊モードが変化している。また、段落し部の補強に関する実験では、段落し部が補強されたことにより、破壊部位が柱基部の曲げ破壊に変化している。このように、補強したことによって破壊のパターンが変化しているため、検討対象としている破壊モードに対する補強効果がどこまであったのかが必ずしも明確になっていない。これは実験結果の適用範囲を狭めている一因にもなっている。RC部材のせん断実験などでは補強後もせん断で破壊させることがよく行われており、耐震補強に関してもこのような考えに基づく実験も今後望まれる。なお、曲げ降伏後ある程度のじん性を有するものの、交番繰り返し加力によって破壊に至るものもせん断破壊に分類する考え方がある。補強実験に限らず広く耐震の問題として今後議論されるべき課題も残されている。

## (5)被災後の被害程度の判定

震災の程度の判定は、構造物によっては一刻を争う。鋼製橋脚のコンクリート充填タイプでは原橋脚の状態を表面から観察できるが、RC橋脚の鋼板巻立てと新材料巻立てについては、損傷状態が原RC橋脚の場合とは異なるので既往の判定法をそのまま用いることができない。既往の耐震補強の実験研究の殆どはこの内部の変状には着目していない。

したがって、巻立てた鋼板や新材料の変状と内部の原橋脚の変状との関係に着目した実験研究が今後望まれる。

## 3. 4 補強のメカニズム

補強のメカニズムに関する研究は実験と解析ともに極めて少ない。特に鋼板巻立てと新材料巻立ての場合のせん断補強とじん性向上に関する補強のメカニズムは十分明らかにはなっていない。

一般に、せん断補強は、せん断補強鉄筋に相当する補強材を後施工により取り付け、またじん性向上は、横拘束度を高めてコンクリートの強度低下や柱筋の座屈を抑制し、あるいは内部コンクリートの落下を抑制して部材の一体性を保持させることを具体的な目標としている。しかしながら、せん断補強とじん性向上はいずれも直接的な効果を横方向補強材に依存しており、部材中の補強の詳しいメカニズム（各現象の因果関係）は必ずしも明らかにされていない。このことは、補強に限らずRC部材自体のせん断とじん性についてもいえることである。

巻立て補強においては、補強材そのものの2次元的な広がりや応力状態が更に話を複雑なものにしているように思われる。メカニズムの解明は今後の課題である。メカニズムに対する共通認識が得られれば、例えば鋼板巻立て補強における充填材の要求品質も明確になり、より合理的な補強法も可能になると考えられる。

### 3.5 補強橋脚の解析

全ての補強法についていえることであるが、じん性解析や非線型応答解析を行う場合、補強後の荷重—変位包絡線と履歴曲線が原橋脚におけるそれと類似するものに対しては既往の解析モデルが利用できる。しかし、そうでない場合は、モデル化にあたって予め実験による検証が必要であろう。

### 3.6 橋梁の耐震補強

橋梁の耐震補強というとき多くの場合、橋脚の補強に議論が集中しがちである。しかし、先の大震災では橋脚の被災以外にも、支承の損壊やこれに起因する桁の落橋など、橋脚被害が直接原因ではない被害も少なからず見られた。この支承周りの構造部材は過去にも多く被害が発生している。一方、耐震補強の工費の面から見ると、この部分は橋体の他の部分に比べて安く対処できると考えられている。そのため例えば米国連邦道路管理局のように、橋梁の耐震診断の判定指標において橋脚、橋台、基礎地盤の合計と同等のウェイトを支承周りの構造部材に置いているところもあるほどである。

先の大震災後の橋梁の耐震設計法は、橋脚の損傷を一定量許して橋体全体に被害の及ぶのを避ける思想が採用されている。この設計思想をより正確に具体化しかつ落橋防止のフェールセーフ機能を確保するためには、この報告書では触れなかった支承と落橋防止構造に関する耐力とじん性の研究が不可欠である。要求性能を具備する構造および補強法の開発が今後望まれる。