

# 耐震補強された RC 柱の変形性能評価法と高架橋への適用例

構造物技術研究部 コンクリート構造研究室  
主任研究員 岡本 大

## 1. はじめに

兵庫県南部地震以後、鉄筋コンクリート（以下、RC）柱に対する多くの耐震補強工法が開発され、補強が実施されてきた。これまでの耐震補強に対する検討は、じん性率を用いて部材単体を評価していたため、構造物全体としての性能評価を行うことはできなかった。そこで、これまでに開発されてきた代表的な耐震補強工法について、補強部材の変形性能を曲げモーメントと部材角の関係により定量的に評価する方法を提案した。これにより、新設構造物と同様に構造物全体の性能評価が可能となった。ここでは、提案した補強部材の変形性能評価法と、この評価法を用いて、駅部の多層・多径間ラーメン高架橋を対象に鋼板巻立て補強によって効果的な耐震補強の検討を行った事例について概要を紹介する。

## 2. 耐震補強工法

高架橋柱の耐震補強工法としては、柱を鋼板で巻立てる『鋼板巻立て補強』が広く採用されてきた。その後、施工性や経済性等を考慮した多くの耐震補強工法が開発され、実用化されている。これらの耐震補強工法については設計・施工指針が発刊されているが<sup>例えば<sup>1)</sup></sup>、これらの設計・施工指針を「1. はじめに」に記述した方針で統一的に改定することとした。対象とした耐震補強工法の一覧と概要を表1に示す。これらの耐震補強工法は、静的正負3回繰返しの交番載荷試験により変形性能が評価され、その中に実大規模の試験体として断面寸法が800×800mm以上の断面寸法を有する試験体の実験データが含まれているものであり、これを条件に対象工法を選定した。

表1 指針で対象とした耐震補強工法

補強工法	工法の概要
鋼板巻立て補強	既設 RC 柱全長を鋼板で取り囲み、既設 RC 断面と鋼板の隙間に充填材を注入して一体化する工法。
鋼製パネル組立て補強	小型の鋼製パネルを組合わせて既設柱断面を取り囲み、鋼製パネルと既設 RC 断面との隙間に充填材を注入して一体化する工法。
波形鋼板巻立て補強	部材軸方向全長に、波型に切断加工した鋼板(波形分割鋼板)で既設柱断面を取り囲み、既設 RC 断面と鋼板の隙間に充填材を注入して一体化する工法。
スパイラル筋巻立て補強	部材軸方向全長に、既設柱断面をスパイラル筋で取り囲み、モルタルにより既設 RC 部材とスパイラル筋を一体化する工法。
吹付けモルタル補強	補強帯鉄筋を水平工法に必要な本数配置し、吹付けモルタルで補強帯鉄筋を固着および被覆する工法。
組合せ鋼材巻立て補強	既設柱の周りに分割した帯鉄筋を配置し、これらを緊結後に吹付けモルタルを施工して一体化する工法。
RCプレキャスト型枠工法	プレキャストパネルを既設柱断面の周辺に取付け、継手鋼材によって閉合したのち、柱とプレキャストパネルの空隙をグラウト材にて注入して一体化する工法。
外部スパイラル巻立て補強	分割したプレキャストコンクリートブロックを柱に取付け、鋼より線を巻きつけることによって補強を行う工法。

### 3. 耐震診断～補強のながれ

「鉄道施設耐震構造検討委員会の提言に基づく鉄道構造物の耐震性能に係る当面の措置について」（平成7年7月）<sup>2)</sup>においては、耐震補強の目標を大規模な地震に対しても構造物が崩壊しないこととし、ラーメン高架橋の鉄筋コンクリート柱については、せん断力に対する安全度と曲げモーメントに対する安全度を比較することにより、緊急耐震補強の要否を判断してきた。これは、新しい耐震設計手法が確立されていない段階での当面の措置として定めたものである。その後、鉄道構造物の耐震設計については、鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）<sup>3)</sup>（以下、耐震標準）が定められ、「既存鉄道構造物に係る耐震補強について」（平成13年7月）<sup>4)</sup>において、耐震標準を参考に施工性や経済性を考慮して耐震補強を実施することが通達された。図1には、耐震標準に準拠したRC柱の耐震診断～耐震補強の流れを示す。

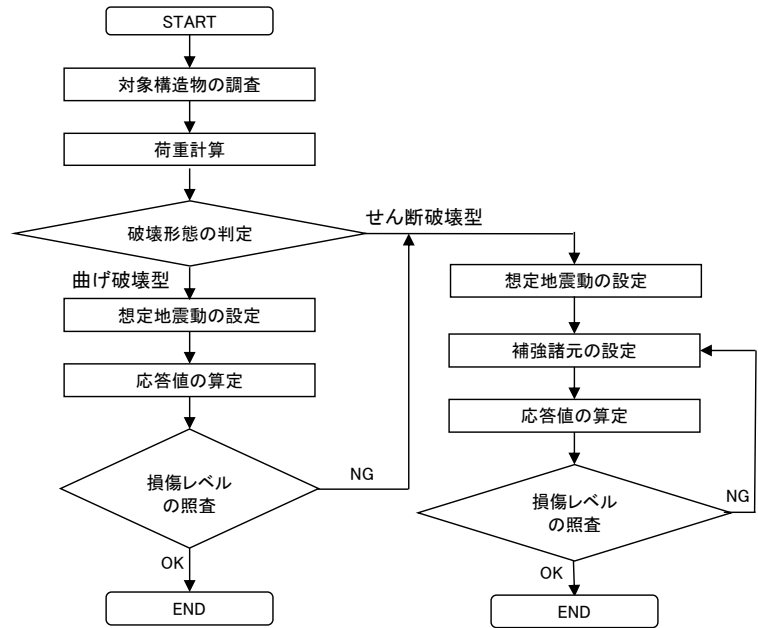


図1 耐震診断・耐震補強の流れ

表2 損傷レベルと損傷状態（曲げ破壊形態の場合）

	損傷状態
損傷レベル1	無損傷
損傷レベル2	場合によっては補修が必要な損傷
損傷レベル3	補修が必要な損傷
損傷レベル4	補修が必要な損傷で、場合によっては部材の取替えが必要な損傷

まず、破壊形態の判定を行い、せん断破壊型と判定された柱については、耐震補強を行う必要がある。一方、曲げ破壊型と判定された場合には、せん断破壊を生じる場合ほど脆性的な破壊を生じることは少ないと考えられるものの、想定地震動の規模、構造物の耐力および変形性能によっては、構造物の崩壊につながる被害となることもありうる。そのため、曲げ破壊形態と判定された場合においても、耐震標準に準じて表2に示す部材の損傷レベルに対する照査を行うこととした。そして、柱が損傷レベル3を満足できない場合には耐震補強を行う必要があることとした。耐震補強では、想定地震動に対して構造物の安全性に対する照査を行う場合が多い。そのため、補強後の柱の照査では、損傷レベル3を確保できることが必要となる。

### 4. 補強柱の変形性能算定方法

これまでに発刊した耐震補強指針では、主に変位じん性率（以下、じん性率）が柱の変形性能に対する照査指標として用いられてきた。しかし、じん性率は、式(1)に示すように部材の降伏変位と限界変位の比として算定されるため、降伏変位の影響を大きく受け、限界変位が同一であっても降伏変位が変動すれば値が変化する。補強された部材は、補強方法や補強材端部のあきなどにより部材の剛性が変化し、それらが降伏変位に与える影響は大きい、そのため、降伏変位を用

いて算定されるじん性率は，補強部材の変形性能を評価するための照査指標としては適切ではない部分もある。

$$\mu = \delta_{\text{limit}} / \delta_y \quad (1)$$

ここに， $\mu$ ：じん性率， $\delta_y$ ：降伏変位（軸方向鉄筋が引張降伏するときの変位）， $\delta_{\text{limit}}$ ：限界変位（荷重－変位曲線の包絡線上の降伏荷重を下回らない最大変位）である。

そこで，耐震補強された柱の非線形性を，耐震標準に示される RC 部材の場合と同様に曲げモーメントと部材角の関係で表現し，表 3 に示す各損傷レベルの設計限界値として部材角を用いることとした。そして，式(2)により部材角を照査指標とした照査を行うこととした。

$$\gamma_i \cdot \theta_d / \theta_{rd} \leq 1.0 \quad (2)$$

ここに， $\theta_d$ ：設計応答部材角， $\theta_{rd}$ ：表 3 に示す各損傷レベルにおける部材角の限界値， $\gamma_i$ ：構造物係数である。

式 (2) に用いる補強した柱の各損傷レベルの限界値の算定方法は，これまでに実施した図 2 に示すようなラーメン高架橋柱の実大試験体の交番載荷試験により検討した。図 3 は，交番載荷試験によって得られた曲げモーメント ( $M$ )－変位 ( $\theta$ ) 関係と骨格曲線の計算値の例を示してしている。交番載荷試験は，補強量や柱の断面寸法等をパラメータとして行い，得られた結果から各損傷レベルの限界点となる Y 点、M 点および N 点の部材角，および曲げモーメントの算定方法を検討，算出式を提案した。

## 5. 高架橋の補強設計への適用例

### 5.1 解析の概要

4章で提案した方法を用いて，駅部の多層ラーメン高架橋を二次元フレームモデル化し，時刻歴動的非線形解析により耐震補強効果の検証解析を行った例を示す。本解析は，高架橋の柱に鋼板巻立て補強を行い，RC柱のせん断耐力や変形性能に着目して検討した事例である。図4に，構造物の解析断面を示す。4層5径間の複々線を支持するRCラーメン構造の鉄道駅をモデル化したものである。柱の非線形特性は，耐震標準<sup>3)</sup>に示さ

表 3 損傷レベル限界値と骨格モデルの折れ点

	設計限界値	骨格曲線の折れ点
損傷レベル 1	$\theta_{yd}$	Y 点：降伏点
損傷レベル 2	$\theta_{md}$	M 点：繰り返しにより耐力低下を生じない最大変形点
損傷レベル 3	$\theta_{nd}$	N 点：降伏荷重を維持できる最大変形点
損傷レベル 4	-	-



図 2 載荷試験の例（鋼板巻立て補強試験体）

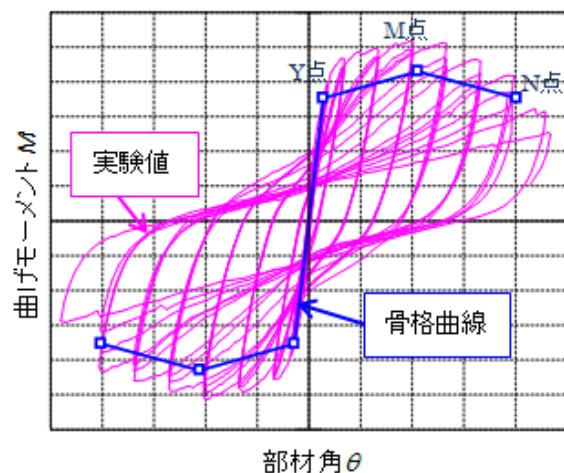


図 3 補強柱の  $M$ - $\theta$  関係と骨格曲線

れるテトラリニアモデルで表現し、図3に示す骨格曲線のY, M, Nの各点を鋼板巻立て補強の影響を考慮して求めた。解析に用いた地震波は、図5に示す耐震標準に示されるG2地盤の地表面地震動（スペクトルⅡ）である。

## 5.2 解析結果

一例として、図6に、3階の4通り（図4の○印）の柱のせん断力-変位関係とせん断耐力の計算結果（無補強、補強）を示す。図6より、無補強の場合には、せん断耐力を超えるせん断力が発生しており、せん断破壊することがわかる。これに対して、鋼板巻立て補強した場合には、せん断耐力は発生せん断力を上回る結果となり、対象とした柱は、せん断破壊しないことがわかった。また、図6に示すように、3階4通り柱は、降伏点（Y点）に達していない。これは、せん断スパンの大きい1階の柱が先に塑性化したためである。なお、1階、2階の柱については、損傷レベル2が確保されている。このように、今回対象とした構造物については、鋼板巻立て補強することにより構造物全体系として耐震性を満足できることが確認できた。

## 6. おわりに

本報告は、既存鉄道コンクリート高架橋柱に対する耐震補強設計法の概要について示した。従来のじん性率による評価法から、通常のRC部材の設計に用いられている曲げモーメントと部材角の関係を用いた評価法とすることにより、構造物全体系の評価が可能となり、より合理的な耐震補強が可能になると考える。

### （参考文献）

- 1) 財) 鉄道総合技術研究所編：既存鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計・施工指針（鋼板巻立て補強編）、1999.7
- 2) 国土交通省鉄道局：鉄道施設耐震構造検討委員会の提言に基づく鉄道構造物の耐震性能に係る当面の措置について、1995.7
- 3) 国土交通省鉄道局監修、財) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）、丸善、1999.10
- 4) 国土交通省鉄道局：既設鉄道構造物の耐震補強に関する指針、2001.6

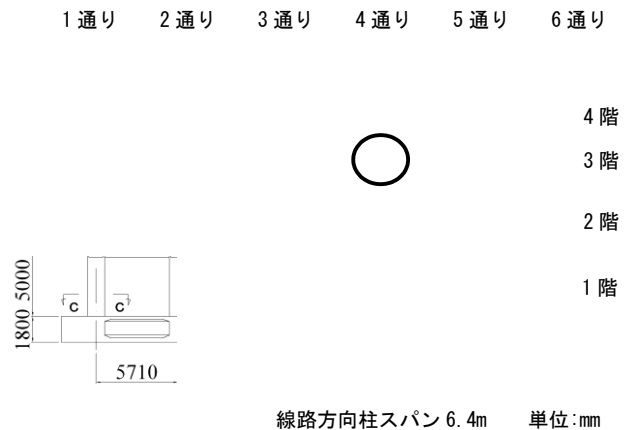


図4 載荷試験の例（鋼板巻立て補強試験体）

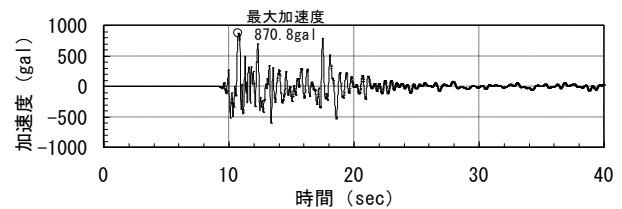


図5 解析に用いた地震波

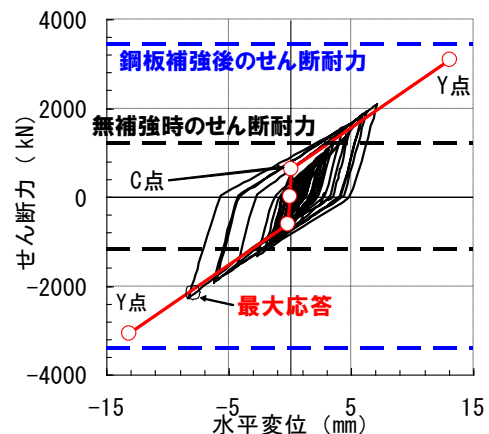


図6 補強柱のせん断力-変位関係と骨格曲線