

既設PC斜材付き π 型ラーメン橋の 耐震性判定方法に関する検討

村松武馬¹・伊藤敏男²・森田尚孝¹・大竹省吾³・多川芳郎⁴・森高英樹⁵

¹静岡県土木部 道路総室 道路保全室 (〒420-8601 静岡市追手町9番6号)

²静岡県都市住宅部 都市整備総室 街路整備室 (〒420-8601 静岡市追手町9番6号)

³正会員 工修 (株)エンタルコンサルタンツ 中部支社 (〒450-0002 名古屋市中村区名駅2-38-2)

⁴正会員 (株)エンタルコンサルタンツ 中部支社 (〒450-0002 名古屋市中村区名駅2-38-2)

⁵正会員 (株)エンタルコンサルタンツ 東京事業本部 (〒213-0011 川崎市高津区久本3-5-7)

兵庫県南部地震の後、既設構造物に対する耐震補強対策が実施され、被災時に緊急輸送路となる高速道路本線の対策は概ね完了した。しかし、これを横断する跨道橋の対策は着手されたばかりであり、被災により高速道路の交通に障害を与えないように対策実施が急がれている。本検討は、跨道橋の代表的構造であるPC斜材付き π 型ラーメン橋に着目し、既設橋に適用する耐震性照査手法の検討を行うと共に、これを代表橋梁に適用し補強対象部位の明確化を行った。さらに、標準斜 π 橋対して、高速道路上に数多く存在する斜 π 橋から耐震補強対象を抽出するための簡易照査方法の検討を行った。

Key Words : frame bridge with inclined side column supports, a method of seismic performance, three dimensional frame structure, two dimensional F.E.M.

1. はじめに

平成7年に発生した兵庫県南部地震の後、既設構造物に対する耐震補強対策が順次実施されている。高速道路は被災時に緊急輸送路となることから最優先され、本線に対する対策は概ね完了している。しかし、これを横断する跨道橋に対する対策は着手されたばかりであり、被災により緊急輸送路の交通に障害を与えないように補強対策実施が急がれている。

しかしながら、跨道橋の代表的構造であるPC斜材付き π 型ラーメン橋（以降、斜 π 橋と略す）に対しては、大きな被災事例が認められてないことや、背面地盤の効果で倒壊は生じ難いと予想されることから、これまで詳細な耐震性照査が行われておらず、照査方法や補強対策が必要となる部位・橋数が不明であり、対策事業計画が定められない状況にある。

このため、筆者らは、既設斜 π 橋に適用する耐震性照査手法の検討を行うと共に、これを代表橋梁に適用し標準斜 π 橋と変形斜 π 橋の耐震性の相違と補強対象部位の明確化を行った。さらに、相対的に耐震性が劣ると判断された標準斜 π 橋対して、高速道路上に数多く存在する斜 π 橋から耐震補強対象を抽出するための簡易照査方法の検討を行った。

2. 耐震性照査手法の検討

(1) 耐震性照査に用いる解析手法

「道路橋の耐震設計に関する資料 H10.1」¹⁾では、新設の π 型ラーメン橋の設計事例において、破壊モードを橋脚基部の曲げ破壊と限定した上で、地震時保有水平耐力法が採用されている。しかし、既設橋梁では、塑性化する部位が明確でなく、また同時に何力所かが塑性化しエネルギー一定則が適用できない可能性がある。そこで、本検討では動的解析を用いた。

解析モデルは、「道路橋の耐震設計に関する資料 H10.1」に準拠し、全体系の非線形骨組みモデルを基本とした。ただし、壁部材の橋軸直角方向は破壊形態がディープビームに近くなり、線材部材を用いた照査ではせん断強度を低めに評価する可能性がある。このため、骨組みモデルによりせん断破壊の判定が下された部位に対しては非線形FEMによる照査を追加するものとし、本検討では、標準斜 π 橋の垂直材と橋脚に着目してモデル化方法を検討し、照査を行った。

(2) 全体系の骨組み解析モデル

橋軸方向、橋軸直角方向とも「道路橋の耐震設計に関する資料 H10.1」に準拠した（図-1）。ただし、検討対象が既設構造物であることから、下記の変更を加えた。

a) 橋梁背面地盤ばね

橋梁背面地盤は、既往の被災事例から地震時に大きな崩壊を起こすことはないと予想される。このため、背面地盤は外力ではなくむしろ抵抗材として機能すると考えられる。そこで、既設橋梁の橋軸方向の照査では斜材背面、主桁端部土留背面、橋脚背面、フーチング背面の地盤の抵抗を考慮した。ただし、斜材と地盤間に空隙があることと、地震時の地盤のゆるみを考慮し柔らかめの地盤バネを設けるものとし、「道路橋示方書Ⅳ」8.4、7.6.2に基づき、 $E_0 = 28\text{N}$ より地盤反力係数を算定して設けるものとした。ただし、直角方向に対しては、斜材と背面地盤間に空隙があると予想されることから地盤の抵抗は無視した。

b) メナーゼヒンジの非線形回転バネ

新設橋梁の設計では、メナーゼヒンジ(図. 2)の照査レベルは杓と同等とされ、大規模地震時の応答は許容応力度以内とされる。また、構造部材としては、メナーゼヒンジ鉄筋のみを考慮している。しかし、実際はメナーゼヒンジはRC部材であり、通常のRC部材と同様に靱性を有すると考えらため、既設橋梁の直角方向の照査では、許容塑性率により照査することとし、メナーゼヒンジを非線形回転バネでモデル化した。その際、塑性ヒンジ長はゴムジョイントの厚さとした。

c) フーチングのモデル化

新設橋梁の設計では、フーチングの鉄筋は降伏させない。しかし、フーチングの鉄筋が降伏しても直ちに致命的な損傷にはつながらないため、既設橋の照査ではフーチングの鉄筋が降伏を超えることを容認し、フーチングを非線形モデルによりモデル化し全体系モデルに組み込んだ（図-1）。その際、「道路橋示方書Ⅳ」の直接基礎の照査と同様に、フーチングの浮き上がりを考慮した。

(3) FEMによる標準斜 π 橋の垂直材と橋脚の直角方向の解析モデル

a) モデル化の方法

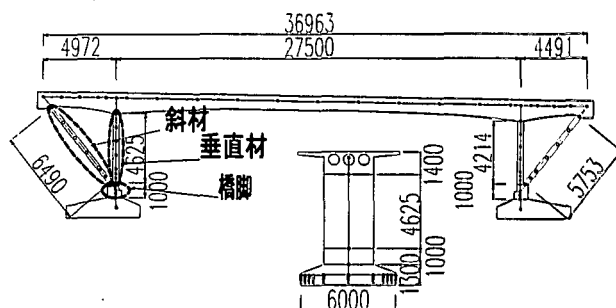
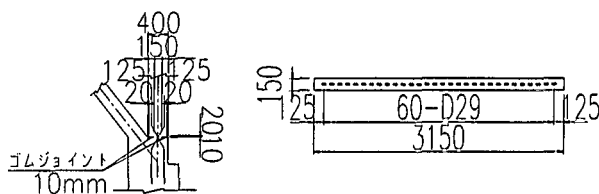


図-1 橋軸直角方向の解析モデル



＜側面図＞ ＜平面図＞

図-2 メナーゼヒンジの構造

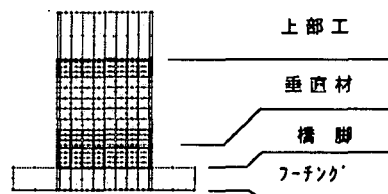


図-3 2次元FEMモデル

後述の解析の結果、標準斜 π 橋では垂直材と橋脚の橋軸直角方向の耐震性が問題となることと、地震時の上部工の水平方向慣性力はほぼ100%が垂直材を介して橋脚に伝達され、斜材側からの伝達はほとんどないことが確認された。このため、モデル化の範囲は、フーチング、橋脚および垂直材を切り出した部分モデルに上部工分担質量を考慮したものとし、2次元モデルによりモデル化した(図-3)。

b) 使用解析コード

東京大学コンクリート研究室で開発されたRC部材の非線形解析コードWCOMD²⁾を用いた。

(4) 照査水準

a) 要求される水準

検討対象とする斜π橋は、高速道路の建設時に既設道路の付け替えとして建設されたものであり、現在、県および市町村が管理している。そのほとんどは、道路ネットワーク上の重要度は高くない橋梁に当たるが、大規模地震時に致命的な被害を受けると橋梁下の高速道路の交通に障害を及ぼすため、大規模地震時に致命的な被害を受けないことが求められ

ている。

b) 骨組み解析における照査水準

要求水準を踏まえ、断面力および塑性率（塑性回転角）に対して「道路橋示方書」の「A種の橋（重要度が標準的な橋）」の照査水準を適用することを基本とした。ただし、既設構造であることから、震後の復旧を速やかに行うために損傷の発生位置を下部構造の基部に限定する目的で安全性を他に比べ高めている箇所に対する照査水準を他の部位と同レベルまで許容した（表-1）。

c) FEMによるせん断の照査水準

FEMにおける照査方法は、地震後の使用性を考慮した場合にはひずみ値による判定、倒壊の判定を行う場合には復元力の軟化の有無や復元力と作用力の比較が考えられる。本検討では、ひずみ値による判定を行うものとし、その値は、解析に使用する解析コードの標準値（ $\varepsilon_{sh} = \pm 2\%$ ）を用いた。この値は、一様応力を受けるRC板の実験結果を基に設定された値である。

なお、本検討では、後述の代表橋梁に対する動的解析における断面力の応答履歴より、上記ひずみ値の範囲では復元力の軟化現象は発生せず、上記ひずみ値は斜π橋に急激な破壊をもたらすレベルではないことを確認している。

3. 耐震性照査結果

橋軸方向に対する照査を標準斜π橋、変形斜π橋各1橋に対して、橋軸直角方向の検討を標準斜π橋4橋と、変形斜π橋1橋に対して全体系の骨組み解析により行い、標準斜π橋4橋に対して垂直材と橋脚の直角方向のせん断に着目した2次元FEMによる照査を行った（表-2）。この結果、橋軸方向は、標準斜π橋、変形斜π橋とも問題ないことが判明した。

一方、橋軸直角方向は、全体系の骨組み解析の結果、変形斜π橋では橋脚の直角方向のせん断のみが問題となったが、標準斜π橋では垂直材と橋脚の直角方向の曲げとせん断が問題となる橋梁があることが判明した（表-3、4）。変形斜π橋の曲げが問題なかったのは、垂直材に関しては、標準斜π橋が直角方向の上部工慣性力を垂直材側でほぼ100%負担するのに対して、変形斜π橋は、垂直材と橋脚の両方で負担するためであり、橋脚に関しては規模が大き

く鉄筋量が多いためと考えられる。

また、標準斜π橋の破壊形態は、表-3、4の荷重強度特性に係わるパラメーターである「危険度」の

表-1 照査水準の緩和内容

部 材	荷 重	道示の規定	緩和措置
主 桁	曲げモーメント	初降伏	初降伏程度
メナーゼヒンジ	直角方向 曲げモーメント	許容応力度	RC部材 としての 許容塑性回転角
フーチング	曲げモーメント	降伏応力度	許容塑性率

表-2 解析ケース

橋梁名	標準斜π				変形斜π
	A橋	B橋	C橋	D橋	E橋
上部工有効幅	7.5m	5.5m	5.0m	4.0m	5.5m
垂直材・橋脚幅	4.7m	3.15m	2.2m	1.9m	3.15m
垂直材側面配筋	D16-3本	D19-3本	D19-3本	D19-3本	D22-3本
橋脚側面配筋	D16-6本	D19-6本	D19-5本	D22-5本 D19-2本	D29-4本 D13-2本

表-3 垂直材の評価

橋梁名称		A橋	B橋	C橋	D橋
構造諸元	①せん断 スパン比	0.8	1.3	1.9	2.5
	②降伏 モーメント	3310 KN・m	2070 KN・m	1090 KN・m	870 KN・m
	③橋長	45.9 m	37.9 m	38.3 m	40.0 m
	④幅員	8.2 m	7.4 m	5.7 m	4.7 m
	⑤危険度 (3)×(4)/(2)	0.11	0.14	0.20	0.22
曲 げ	全体系 フレーム	OK 塑性率 2.6<6.4	OK 塑性率 4.3<6.2	OUT 塑性率 12>6.4	OUT 塑性率 10>6.2
	2次元 FEM	OK	OUT 引張ひずみ 0.03以上		
せん断	全体系 フレーム (KN)	OUT せん断力 2500>1830	OUT せん断力 1390>1240	OK せん断力 800<910	OK せん断力 630<790
	2次元 FEM	OK			

表-4 橋脚の評価

橋梁名称		A橋	B橋	C橋	D橋
構造諸元	①橋脚+垂 直材のせん 断スパン比	1.1	1.8	2.5	3.0
	②降伏 モーメント	4250 KN・m	3080 KN・m	1530 KN・m	2270 KN・m
	③橋長	45.9 m	37.9 m	38.3 m	40.0 m
	④幅員	8.2 m	7.4 m	5.7 m	4.7 m
	⑤危険度 (3)×(4)/(2)	0.09	0.09	0.14	0.08
曲 げ	全体系 フレーム	OK 塑性率 12<18	OK 塑性率 5<12	OUT 塑性率 25>11	OK 塑性率 4.3<9.1
	2次元 FEM	OK		OUT 引張ひずみ 0.03以上	OK
せん断	全体系 フレーム (KN)	OUT せん断力 2590>560	OUT せん断力 1500>480	OUT せん断力 850>380	OUT せん断力 600>440
	※	OK せん断力 2590<2790	OK せん断力 1500<2480	OK せん断力 850<1490	OK せん断力 600<2010
	2次元 FEM	OK			

※上段は梁の斜めせん断耐力との対比。下段はディーブームのせん断耐力との対比

大きい橋梁では曲げ破壊、せん断スパン比の小さい橋梁ではせん断破壊となることと、橋脚のせん断はせん断補強鉄筋がないことから全て壊れることが分かった（表-3、4）。

しかし、標準斜π橋に対して直角方向のせん断に着目した2次元FEMによる照査を行った結果、いずれもせん断破壊は生じないことが分かった(表-3、4)。これは、壁部材としての抵抗機構が評価できたためであり、特に橋脚に関しては、斜めせん断耐力は小さいが、橋脚内だけで斜めせん断で抵抗する事はなく、その場合はディープビームとしての抵抗機構となり、十分な耐力を有する(表-4)ことが評価できたためと考えられる。

4. 補強対象の照査方法

数多く存在する斜π橋の耐震性の照査に用いる簡易照査方法の検討を標準斜π橋に対して実施した。モデル化の範囲は、前述のFEMモデルと同様とし、単柱モデルによりモデル化した(図-5)。上部工質量は全質量の1/2を考慮するものとした。同モデル化を前掲の代表橋梁に適用したところ、全体系の骨組みモデルに近い結果が得られ(図-6)、実務に適用できる見通しが得られた。

5. まとめ

- 本検討により、下記の事項が判明した。
- ①変形斜π橋、標準斜π橋とも橋軸方向には十分な耐震性を有している。
 - ②変形斜π橋に比べ標準斜π橋の方が耐震性が劣る。
 - ③標準斜π橋は、骨組み解析による照査では、垂直材と橋脚の直角方向で耐震性を有していない橋梁があるが、FEMによる照査の結果せん断は耐震性を有している。
 - ④簡易抽出結果の確認と補強設計の検討に単柱モデルが適用できる見通しが得られた。

また、筆者らは別途、簡易なパラメータを用いた対象橋梁全体の分布図に本検討による照査結果をプロットすることにより補強対象の極簡易な判定を行う簡易判定グラフの作成も行っている(図-7)。

以上より、簡易判定グラフにより抽出した橋梁の確認と補強設計を簡易照査手法で実施することで、道路橋示方書に準拠した補強対策は実施できる見通しが得られた。ただし、補強対策工法具体化と、変形斜π橋に対する検討が未完了であり、今後実施する予定である。

また、斜π橋の耐震性に関しては、果たして壁部材が直角方向の曲げで致命的な破壊つまり倒壊を起

こすであろうかという疑問がある。このため、上記検討に加え、垂直材と橋脚の直角方向の曲げに着目して復元力と偏心モーメントを比較する等により倒壊の判定を行い、補強実施と優先順位の判定を行う予定である。

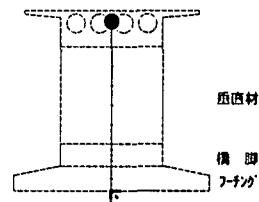


図-5 簡易照査モデル

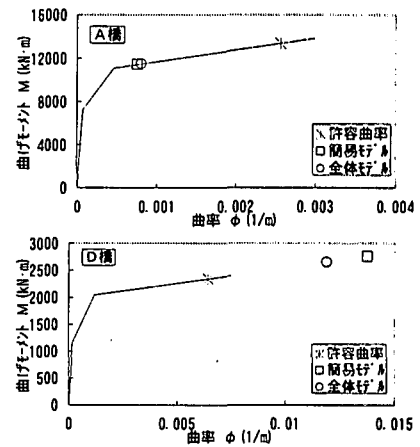


図-6 簡易照査手法の評価(垂直材)

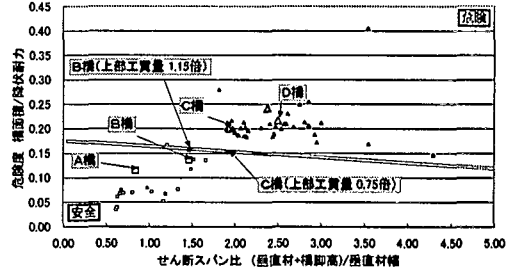


図-7 補強対象の簡易判定グラフ(垂直材)

6. 謝辞

本検討の実施に当たり、「独立行政法人土木研究所耐震研究グループ(耐震)」ならびに、「日本道路公団東京第三管理局内既設構造物の耐震設計・施工に関する技術検討会」よりご指導、ご協力を戴きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 道路橋の耐震設計に関する資料-P C ラーメン・R C アーチ橋・P C 斜張橋・地中連続壁基礎・深礎基礎等の耐震設計 計算例一、平成10年 1月、日本道路協会
- 2) 岡村甫、前川宏一、鉄筋コンクリートの非線形解析と構成側、1991年5月、技報堂出版