

◆特集：最近の地震対策技術◆

# H16年新潟県中越地震における斜材付 $\pi$ 型PCラーメン橋の損傷分析

堺 淳一\* 運上茂樹\*\*

## 1. はじめに

2004年10月23日に発生した新潟県中越地震は、最大震度7が観測される非常に強い地震であった。橋梁では落橋に至るような甚大な被害は見られなかったが、古い基準で設計された鉄筋コンクリート橋脚の段落し部の損傷、支承の破損等、従来から多く見られるような損傷が生じた<sup>1)</sup>。

地震により損傷を生じた橋梁の中には、高速道路の跨道橋として採用される場合の多い斜材付 $\pi$ 型PCラーメン橋1橋もあったことが報告されている<sup>2)</sup>。斜材付 $\pi$ 型PCラーメン橋は、跨道橋であることから橋梁規模がある一定以下であること、また、不静定構造であるとともに、橋軸方向に対しては斜材背面の地盤の抵抗も寄与することが考えられることから一般に地震時に大きな変形が生じにくく、相対的に地震時の安定性が高い構造系といえる。これまでに地震によって顕著な被害を受けた事例も報告されておらず、今回の地震でも垂直材のひびわれ程度の損傷で甚大なものではなかったが、初めて確認された損傷例といえることができる。

そこで、本研究では、損傷を受けた斜材付 $\pi$ 型PCラーメン橋を対象として地震応答解析により損傷分析を行うとともに、本形式の橋梁の耐震性能を解析的に評価した。本文は、その結果をまとめたものである。

## 2. 解析対象とした橋梁と地震被害

解析対象は、図-1に示すように橋長が50.26m、中央支間長が30.52m、幅が5.4mの直接基礎に支持された斜材付 $\pi$ 型PCラーメン橋である。ここには後述する解析モデルも示している。本橋は主桁、斜材、垂直材、橋脚、基礎により構成されている。P1側からP2側に向かって上り勾配になっており、P2側の端部はP1側の端部よりも1.9m高い。P1、P2における橋脚高さはそれぞれ2m、3mであり、垂直材の部材長はそれぞれ4.6m、5mである。上部構造の総重量は5100kNである。本橋は、震度7が観測された川口町において関越自動車道を跨ぐ橋梁で、橋軸方向はおおむね東西に向いている。

本橋は、1981年(昭和56年)に建設されている。当時の設計水平震度は0.17である。耐震設計上の地盤種別は、I種地盤に分類される。主桁、斜材、垂直材のコンクリートの設計基準強度は35N/mm<sup>2</sup>であり、橋脚と基礎のコンクリートの設計基準強度は24N/mm<sup>2</sup>である。鉄筋にはSD295が用いられている。PC鋼材としては、主桁にはPC鋼線(12 $\phi$ 7)が、斜材にはA種I号(SBPR80/95)のPC鋼棒( $\phi$ 23)が用いられている。

主桁の構造はPC中空床版である。斜材はPRC構造であり、上端は主桁に下端は橋脚に剛結されている。垂直材はRC構造であり、この上下端は

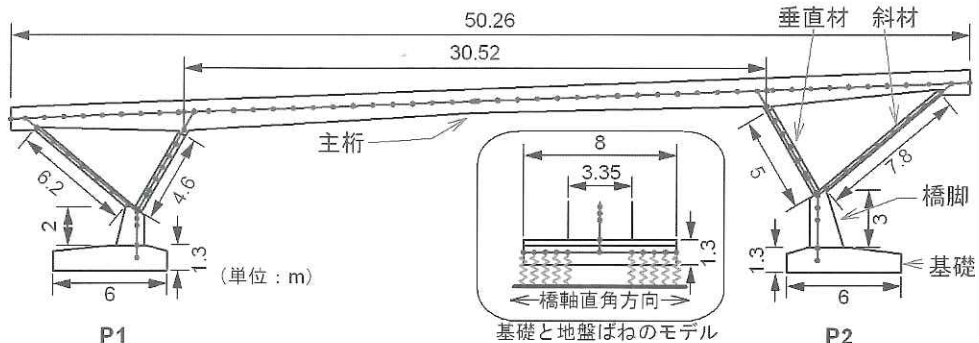


図-1 解析対象とした斜材付 $\pi$ 型PCラーメン橋と橋軸直角方向の解析モデル

Analytical Investigations on Seismic Performance of a  $\pi$ -Shaped Frame Type Bridge Damaged During the 2004 Niigata-Chuetsu Earthquakes

メナーゼヒンジにより、それぞれ主桁と橋脚に結合されている。

地震による損傷が確認されたのは垂直材であり、本研究ではこれに着目した解析を行った。図-2に垂直材の断面と配筋を示す。垂直材は、断面が橋軸直角方向に3.35m、橋軸方向に0.4mの長方形であり、軸方向鉄筋としてはD16が30本配置されており、軸方向鉄筋比にすると0.44%である。

帯鉄筋、中間帯鉄筋としてはD13が200mm間隔で配置されている。垂直材の上端のメナーゼヒンジのヒンジ筋としてはD29が、下端のヒンジ筋としてはD32が用いられており、いずれもヒンジから約1mの位置で定着されている。ヒンジ部には割裂補強鉄筋としてD13が150mm間隔で配置されている。

地震後には、写真-1及び図-3に示すような損傷が確認された。ここで、図-3中の括弧内の数字はひびわれ幅（単位：mm）を示している。両サイドの垂直材に損傷が確認されたが、P2側の損傷程度が大きい。P1側は、垂直材に水平ひびわれが生じるとともに、側面角部においてかぶりコンクリートの部分的な剥離が生じた。ひびわれ幅としては、0.3mm以下と小さい。ひびわれの発生位置は、ヒンジ筋の定着部付近に相当する箇所である。P2側は、下端のヒンジ位置から高さ約1.5mの位置に生じた水平ひびわれと角部におけるかぶりコンクリートの部分的な剥離が生じた。この損傷が生じたのも、ヒンジ筋の定着部付近に相当する箇所である。このひびわれを中心として上下方向に斜めひびわれが生じている。せん断によるひびわれ幅としては、平均的には0.5mm程度である。また、ヒンジ下端の隅角部においてもかぶりコンクリートが剥離した箇所では鉄筋は露出していなかった。

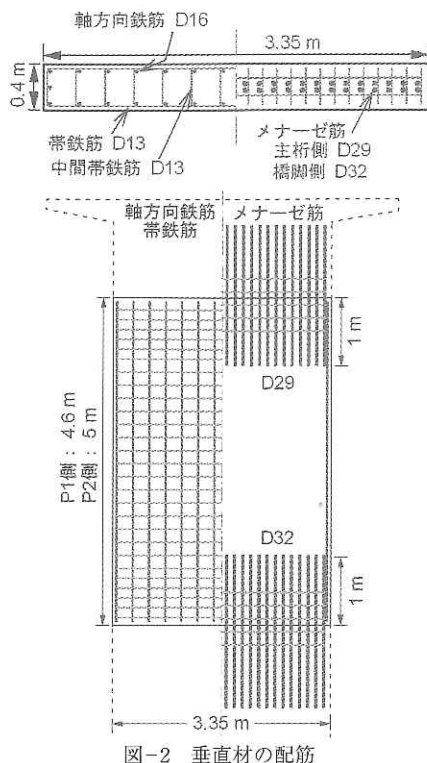
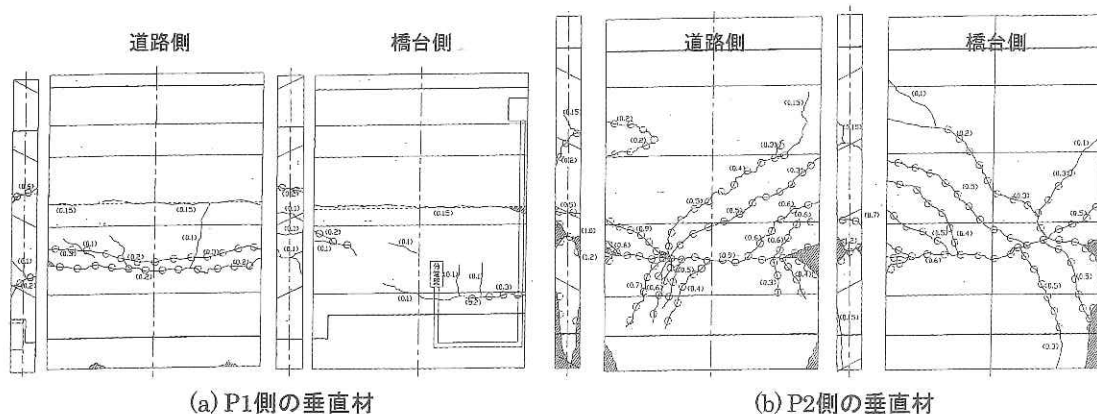


図-2 垂直材の配筋



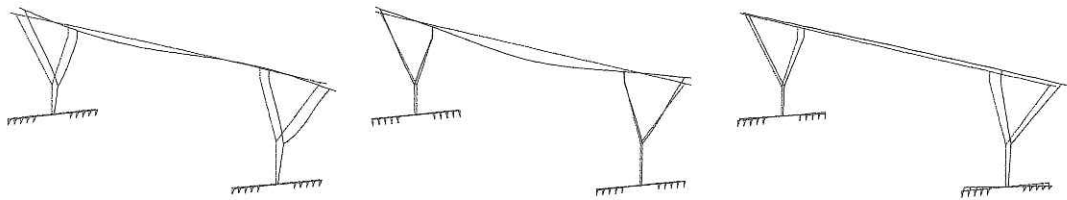
写真-1 P2側の垂直材の損傷



(a) P1側の垂直材

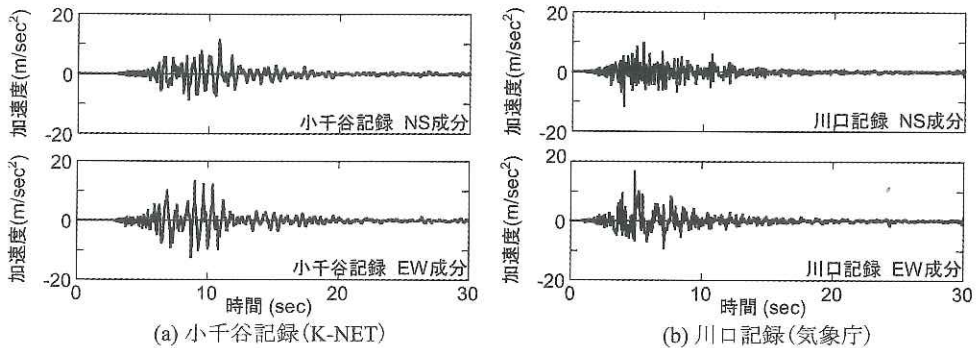
(b) P2側の垂直材

図-3 垂直材の地震被害 (図中の ( ) 書きはひびわれ幅 (mm) を示す)



(a) 1次モード (橋軸方向) (b) 2次モード (鉛直方向) (c) 3次モード (直角方向)

図-4 振動モード (橋軸直角方向の解析モデルの場合)



(a) 小千谷記録(K-NET)

(b) 川口記録(気象庁)

図-5 新潟県中越地震で観測された地震動

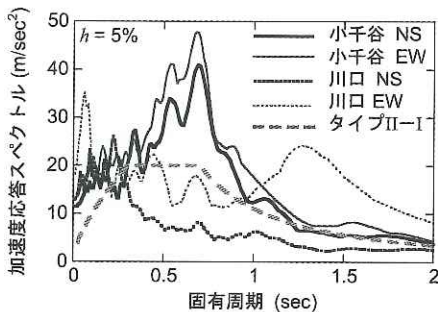


図-6 解析に用いた地震動の応答スペクトル

損傷状況と構造条件から、主として橋軸直角方向の地震力により、垂直材に曲げ損傷および斜めひびわれが生じたと推測される。せん断損傷の被災度に関する既往の研究<sup>3)</sup>から、この程度の損傷であれば、塑性域には達しているものの、「中被害」と判定される状態であり、垂直材としてはまだ軸力を保持可能であるとともに、橋軸直角方向に対しても水平耐力の低下もほとんどなく、破壊までは変形性能を残存していると判断される。

垂直材以外の部材では損傷は報告されていないが、橋台が50cm程度沈下し、桁端が半分程度露出したことが報告されている<sup>2)</sup>。

### 3. 解析モデルと入力地震動

橋全体系をばね要素によりモデル化した地震応答解析を実施した。このモデルは図-1に示した通りである。上述のように垂直材の損傷原

因は橋軸直角方向の地震動によるものと考えられるが、ここでは橋軸方向、橋軸直角方向に対してそれぞれ解析を行った。なお、橋軸方向には斜材の背面土の影響があることや、基礎の構造特性に方向性があることから、橋軸方向、橋軸直角方向に、それぞれモデル化して個別に解析した。

主桁、斜材、垂直材、橋脚、基礎はTakeda型復元力特性を有する非線形はり要素でモデル化した。曲げモーメント～曲率の骨格曲線は、道路橋示方書<sup>4)</sup>の手法に従って求めた。以下に示す、許容値、終局値は、いずれも道路橋示方書の定義に基づくものである。ここで、帯鉄筋は道路橋示方書に規定されるフックによって定着されていないため、帯鉄筋による横拘束効果は考慮していない。メナーゼヒンジは、Takeda型復元力特性を有する非線形回転ばねでモデル化した。なお、ヒンジ筋は垂直材と橋脚に定着されているが、定着長が不十分なため、垂直材と橋脚の復元力特性にはヒンジ筋の影響を考慮しないものとした。このため、実際の被害としては、垂直材の下端から1.5m程度の位置でひびわれ等の損傷が集中したが、後述の解析では垂直材の下端に損傷が生じるという結果となっているので、解析結果の解釈において注意する必要がある。

主桁と垂直材、主桁と斜材、斜材と橋脚、橋脚と基礎の接合部は剛部材としてモデル化した。

地盤と基礎の相互作用は、地盤ばねによってモデル化した。これらのばねは、浮き上がりを考慮

表-1 主桁の最大応答変位

入力地震動	橋軸直角 (m)	橋 軸 (m)
小千谷記録	0.132	0.021
川口記録	0.030	0.013
タイプII-I-1	0.092	0.015
タイプII-I-2	0.074	0.015
タイプII-I-3	0.069	0.015

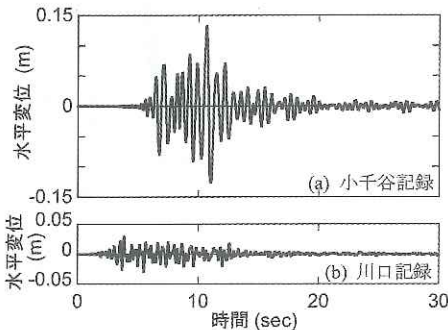


図-7 主桁の応答 (橋軸直角方向加震)

できるような非線形ばねとした。また、橋軸方向の解析モデルでは斜材と地盤の相互作用を考慮するために、同様の非線形ばねを用いた。

固有値解析結果によれば、橋軸直角方向の解析モデルの1次、2次、3次モードは図-4に示すようにそれぞれ橋軸方向、鉛直方向、橋軸直角方向の振動モードである。これらの固有周期は0.72秒、0.43秒、0.34秒である。一方、橋軸方向の解析モデルでは、斜材が地盤に支持されていることから、1次、2次、3次モードの固有周期は、それぞれ0.26秒(鉛直方向)、0.22秒(軸方向)、0.21秒(橋軸直角方向)と橋軸直角方向のモデルよりも短い。

地震応答解析における減衰モデルとしては、Rayleigh減衰を用いた。非線形はり要素には2%、地盤ばねには10%の減衰定数を見込み、ひずみエネルギー比例減衰法により、主要な2つのモードの振動数および減衰定数を求めた。

地震応答解析の際に死荷重による断面力を考慮するために、静的解析を行った。ここでは、自重+橋面荷重、乾燥収縮、有効プレストレス力を考慮した。本橋のプッシュオーバー解析によると、橋軸方向には曲げ降伏が生じる前にP2側の橋脚が震度0.92においてせん断破壊すると解析上評価される。橋軸直角方向の降伏震度としては0.65となる。これより、不静定構造であることや背面地盤の拘束効果など本橋の構造特性から、いずれの方向に対しても相対的に大きな耐力を有しており、これからも地震被害を受けにくい構造であること

が推定される。

本橋は川口町に位置するため、解析では新潟県中越地震の本震において気象庁の川口町川口で観測された地震波を用いることとした。これは、震度7の記録である。また、K-NETにより小千谷市において強度の強い地震動が観測されていることからこの地震波も用いることとした。以下、これらを小千谷記録、川口記録と呼ぶ。本橋の橋軸方向がおおむね東西に向いているため、橋軸方向の解析にはEW成分を、橋軸直角方向の解析にはNS成分をそれぞれ用いた。これらの時刻歴および応答スペクトルを図-5、6に示す。

また、現行の道路橋示方書に基づき、耐震性能を評価するという観点から、道路橋示方書に示される設計用の地震動(タイプII地震動I種地盤の3波)も用いることとした。

#### 4. 新潟県中越地震の地震動を用いた地震応答解析結果

図-7に小千谷記録と川口記録を作用させたときの主桁の中心位置における水平変位を示す。また、表-1に各解析ケースにおける主桁の最大応答変位を示す。ここでは後述する設計用地震動による結果もあわせて示している。橋軸直角方向には、小千谷記録の場合には、最大で0.13mの水平変位が生じるが、川口記録では最大でも0.03mの変位しか生じない。川口記録で応答が小さいのは、図-6からも分かるように固有周期が0.4秒以上の領域での地震動の強度が小さいためである。一方、橋軸方向には、斜材背面における地盤による拘束もあり、最大でも0.02m程度の応答である。

図-8は、橋軸直角方向に小千谷記録のNS成分を入力した際の斜材下端、垂直材下端、橋脚下端の曲げモーメント~曲率の履歴を許容曲率と比較した結果である。これによれば、垂直材のみに損傷が生じる結果となり、垂直材の下端において降伏を超える応答が生じる。P1側の垂直材では設計上の許容値以内にとどまるが、P2側の垂直材では終局以内ではあるが計算上許容値を超える応答が生じる。斜材、橋脚はひびわれモーメントは超えるが降伏には達しない。前述のように実被害ではヒンジ筋の定着端部の上方で損傷が集中したが、本解析では垂直材の端部のモデル化にヒンジ筋を考慮しなかったため垂直材の下端で損傷が生じる結果となった。なお、川口記録を橋軸直角方向に入力する場合には、いずれの部材も曲げ降伏には達しない結果となった。

橋軸方向の解析では、小千谷記録、川口記録を用いる場合にも斜材の一部に降伏をわずかに超え

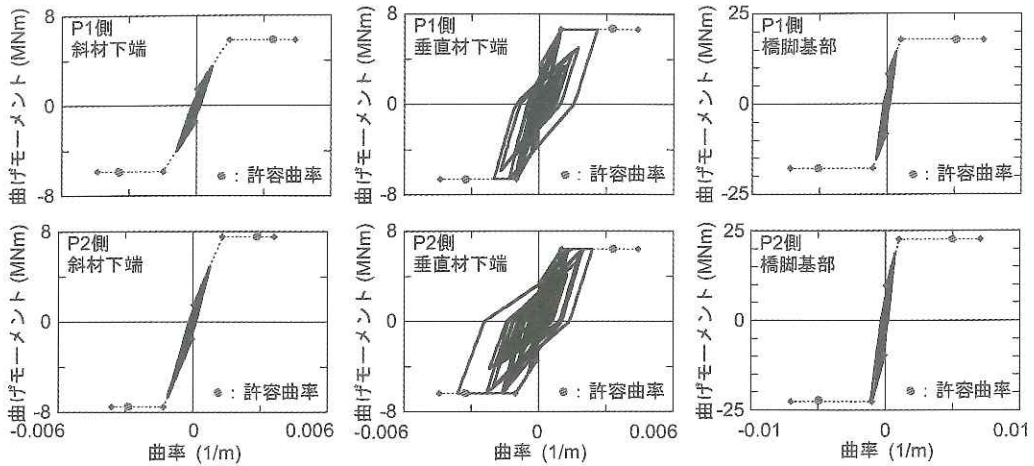


図-8 主要な部材の曲げモーメント～曲率の履歴 (小千谷記録NS成分により橋軸直角方向加震)

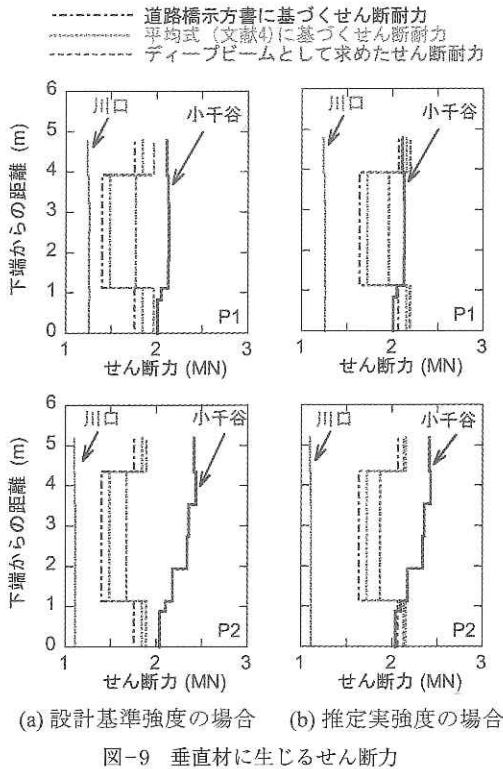


図-9 垂直材に生じるせん断力

る曲率が生じる程度であった。

図-9は、橋軸直角方向加震の場合の垂直材における応答せん断力とせん断耐力を比較した結果である。ここで、せん断耐力としては、道路橋示方書<sup>4)</sup>に準じて求めた場合、せん断耐力算定式的设计式ではなく平均式を用いた場合<sup>5)</sup>、さらにこれにディープビームとして耐力を求めた場合<sup>6),7)</sup>の結果を示している。損傷状況を見ると地震動のくり返しによる影響は小さいと考えられたため、

道路橋示方書に準じる場合にはくり返しの影響に関する補正係数は考慮していない。また、材料強度には設計基準強度を用いる場合と材料強度の割り増しを考慮してこれを1.2倍とした場合(推定実強度)の結果を示している。

これによれば、小千谷記録を入力とする場合にはP2側の垂直材には最大で道路橋示方書に基づく場合、平均式を用いる場合、ディープビームとして求める場合のそれぞれのせん断耐力の1.7倍、1.6倍、1.4倍のせん断力が生じる。材料強度の割り増しを考慮してディープビームの効果を見込むと、応答せん断力はせん断耐力の1.3倍程度となる。一方、川口記録の場合にはこれらの耐力より小さいせん断力しか生じない。せん断耐力の評価は一般にばらつきが大きい、図-9に示したせん断力分布からはP2側垂直材においてせん断力が厳しい結果として評価されており、これはP1側垂直材には主として水平ひびわれが、P2側垂直材には水平ひびわれと斜めひびわれが生じたことと同じ傾向であることが確認される。

なお、橋軸方向加震の場合にはいずれの記録を用いる場合にも、垂直材に生じるせん断力はせん断耐力の30%以下と小さい。

以上より、両サイドの垂直材に降伏を超える応答が生じること、P2側の垂直材の方が応答率、応答せん断力が大きいことが解析的にも評価された。こうした結果は定性的には図-3、写真-1に示した被害を再現できているといえる。今回の垂直材の損傷は橋軸直角方向の地震力が支配的となり、曲げ損傷とせん断損傷の複合的な影響によって生じたことが解析的にも再現されたと考えられる。

### 5. 設計用地震動を用いた地震応答解析結果

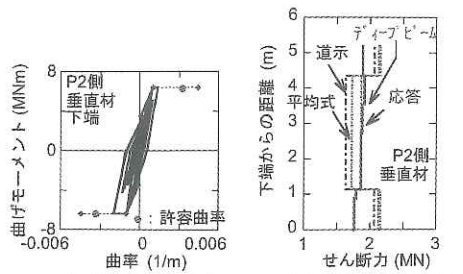
現行の道路橋示方書に基づき、耐震性能を評価するという観点から、道路橋示方書に示される設計用地震動（タイプII地震動I種地盤の3波形）を用いた地震応答解析を行った。主桁の最大応答変位をまとめた結果は表-1に示したとおりである。橋軸方向加震の場合には、応答変位は小千谷記録、川口記録を入力する場合と同程度であり、曲げおよびせん断力により推定される損傷もこれらの記録の場合と同程度である。橋軸直角方向には小千谷記録の60%程度の応答になる。

図-10には、橋軸直角方向に地震動を作用させた場合にP2側垂直材に大きな応答を生じたタイプII-I-3地震動を用いた場合の曲げとせん断に関する照査結果を示している。ここで、せん断耐力を求める際は推定実強度を用いている。表-1と図-10によれば、橋軸直角方向加震の場合には、応答は0.1m以下であること、応答曲率は降伏曲率を超えるが許容曲率以下におさまること、応答せん断力は、ディープビームの効果を考慮する場合のせん断耐力と同程度もしくはやや大きい程度であることが分かる。

### 6. 結論

本研究では、地震応答解析により2004年の新潟県中越地震で被災した斜材付π型PCラーメン橋の被災を分析するとともに、こうした形式の橋梁の耐震性能を評価した。本研究から得られた結論は以下の通りである。

- (1) 新潟県中越地震により、垂直材の下端のヒンジ筋の定着部付近でコンクリートの貫通ひびわれと角部のコンクリートの剥離が生じた。また、ヒンジ部の隅角部においてコンクリートが剥離した。P1側、P2側の垂直材はいずれも損傷が生じたが、損傷程度はP2側の方が大きかった。損傷の程度から、垂直材としては軸耐力、水平耐力ともに当初の耐力からほとんど低下しておらず、破壊までは変形性能を残存していると判断される。
- (2) 中越地震で観測された地震動を用いた解析より、小千谷記録の場合には、主桁に最大で0.17mの水平変位が生じるが、川口記録では最大でも0.03mの変位しか生じない。小千谷記録が作用する場合には、P1側の垂直材では許容値以内にとどまるが、P2側の垂直材では許容値を超える応答が生じる。また、垂直材にはせん断耐力の1.3倍程度の応答せん断力が生じる。こうした結果は定性的には実際に生じた被害を再現している。



(a) 曲げに関する照査 (b) せん断に関する照査  
図-10 設計用地震動 (II-I-3) による応答

- (3) 設計用地震動による解析により、橋軸方向には中越地震で観測された地震動と同程度の応答が生じること、橋軸直角方向には小千谷記録の60%程度の応答になることを示した。

### 謝辞

本研究では、東日本高速道路(株)新潟支社保全グループサブリーダーの丸山大三氏に貴重な資料を頂きました。地震応答解析には、(独)防災科学技術研究所のK-NETの観測記録を用いました。ここに記して関係各位に厚く御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所、(独)土木研究所、(独)建築研究所：平成16年(2004年)新潟県中越地震被害に係わる現地調査概要, 2005.
- 2) (社)プレストレストコンクリート技術協会：新潟県中越地震PC構造物震害調査報告書, 2005.
- 3) (社)日本道路協会：道路震災対策便覧(震災復旧編), p.105, 2007.
- 4) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002.
- 5) 河野広隆、渡辺博志、菊森佳幹：大型RCはり供試体のせん断強度に関するデータ集、土木研究所資料、第3426号, 1996.
- 6) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, 2002.
- 7) (財)海洋架橋・橋梁調査会：既設橋梁の耐震補強工法事例集, 2005.

堺 淳一\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所耐震研究  
グループ耐震チーム研究  
員, 工博  
Dr. Junichi SAKAI

運上茂樹\*\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所耐震研究  
グループ耐震チーム上  
席研究員, 工博  
Dr. Shigeki UNJOH