

第6回 耐震解析（その3） PC 構造物への適用

講師：花島 崇*

1. はじめに

今回は耐震解析のまとめとして、過去2回にわたり解説のあった「耐震解析の基礎知識」と「耐震解析の基礎技術」を用い、実際のPC構造物の耐震解析へ適用した事例を紹介します。

第4回の講座の中の「4. 耐震解析の種類と特徴」では、耐震設計を行う場合の解析法の紹介がありました。そこでは、耐震解析法は、静的解析と動的解析の2種類に分類され、前者には震度法と地震時保有水平耐力法が、後者には、応答スペクトル法と時刻歴応答解析法の解説がありました。またこれらの解析法にはおのおの特徴があり、解析に際し、目的に応じ適切な解析方法の選定が重要であると

の解説がありました。

今回は、3径間のPC斜材付π型ラーメン橋の耐震解析の事例を紹介します。高規格幹線道路の跨道橋などに従来より良く用いられる構造形式で、PC3径間連続ラーメン構造同様の挙動を示す形式です。なお主桁構造は、版桁構造となっておりますが、基本的には箱桁構造と変わりませんので、その点ご了承下さい。

2. 耐震解析事例

2.1 構造一般図

図-1に橋梁全体一般図を示します。本橋の特徴は、下記のとおりです。

(1) 道路線形条件、交差物件の条件から、一般的な斜材付

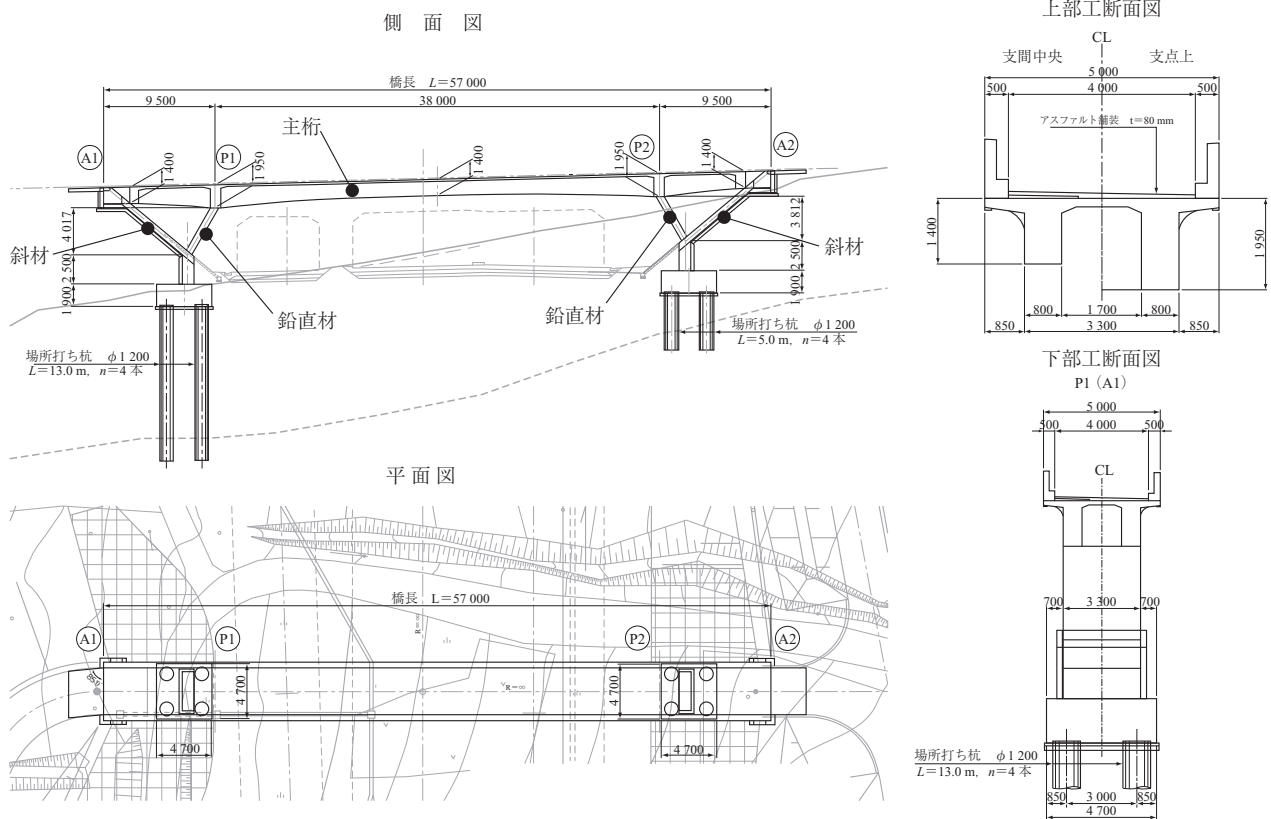


図 - 1 全体一般図

* Takashi HANAJIMA : (株) 日本構造橋梁研究所

π 型ラーメン橋と比較すると、中央支間長が広く構造高が低い扁平形状である。

- (2) 傾斜地形に位置する橋梁であり、地盤条件も傾斜していることから基礎形状を含め、非対称構造である。

2.2 耐震設計条件

ここでは、講座第4回、第5回に示した耐震設計条件を元に、本橋で設定した設計条件を示します。

(1) 耐震設計の目的

耐震設計の目的は、構造物の重要度に応じ必要な耐震性能を確保することです。今回は対象が跨道橋でかつ高規格幹線道路上にかかる橋梁であるため、想定外の大規模地震に対しても落橋することなく、高規格幹線道路を緊急輸送路として使用する重要な役割があります。したがって、落橋は是が非でも免れなければならないため、想定外の大規模地震に対して余裕をもった設計、いわゆる冗長性（リダンダンシー）を有する設計を行う必要があります。

(2) 適用基準

道路橋示方書・同解説V耐震設計編（平成24年3月）日本道路協会を基本とします。

(3) 橋の重要度の区分

(1)の目的がありますので、重要度の区分ではとくに重要度の高い橋となるB種の橋とします。

(4) 地盤種別

地盤の基本固有周期 T_g より、当該地の耐震設計上の地盤種別はII種となります。

(5) 設計地震動と目標とする橋の耐震性能

表-1に示す様に、レベル1地震動、レベル2地震動に対して耐震性能を規定します。

(6) 耐震性能の照査方法

ラーメン構造ですので、表-2に示す照査方法とします。

表-1 設計地震動と目標とする橋の耐震性能¹⁾

設計地震動		A種の橋	B種の橋
レベル1地震動		地震によって橋としての健全性を損なわない性能（耐震性能1）	
レベル2地震動	タイプIの地震動（プレート境界型の大規模な地震）	地震による損傷が橋として致命的とならない性能（耐震性能3）	地震による損傷が限定的なものにとどまり、橋としての機能の回復が速やかに行い得る性能（耐震性能2）
	タイプIIの地震動（兵庫県南部地震のような内陸直下型地震）		

表-2 耐震性能の照査方法¹⁾

地震時の挙動の複雑さと耐震性能の照査に適用できる耐震計算法				
照査する耐震性能	橋の動的特性 地震時の挙動が複雑ではない橋	静的解析の適用性が限定される橋		動的解析の適用性が限定される橋
		塑性化やエネルギー吸収を複数箇所に考慮する橋又はエネルギー一定則の適用性が十分検討されていない構造の橋	高次モードの影響が懸念される橋	
耐震性能1	静的照査法	静的照査法	動的照査法	動的照査法
耐震性能2 耐震性能3	静的照査法	動的照査法	動的照査法	動的照査法
適用する橋の例	・固定支承と可動支承により支持される桁橋（曲線橋を除く） ・両端橋台の単純桁橋（免震橋を除く）	・弾性支承を用いた地震時水平力分散構造を有する橋（両端橋台の単純橋を除く） ・免震橋 ・ラーメン橋 ・鋼製橋脚に支持される橋	・固有周期の長い橋 ・橋脚高さが高い橋	・斜長橋、吊橋等のケーブル系の橋 ・アーチ橋 ・トラス橋 ・曲線橋

2.3 本橋特有の解析条件

前項では、一般的な耐震設計条件を示しました。本講座で示す事例は、上記のほか以下の条件を設定し、特徴ある設計を行っていますので紹介します。

本事例は、当初平成14年の道路橋示方書で設計しましたが、平成24年の道路橋示方書の改訂に伴い再度設計内容の見直しを行ったものです。また、道路橋示方書の改訂に伴い、発注先の設計基準も変更となり、併せてその考えも取り入れた設計を行っています。したがって、ここに示す例が、必ずしもすべての構造物に同じように適用できるというわけではありません。もっとも大切なことは、耐震解析をする際に、解析対象の条件を踏まえ、2.2(1)で示したように耐震設計の目的をどのように設定するか、そして、その目的に見合った解析・設計をどのように行うかが重要なポイントとなります。

本橋ではその点について、2.2(2)適用基準に示した道路橋示方書のみならず、発注先の設計基準や最新の知見を踏まえ、以下を設定しました。

- (1) レベル2地震動に対する耐震性能照査法は、橋軸方向、橋軸直角方向共に動的照査方法を基本とします。
- (2) 上部構造部材を非線形梁要素（M- ϕ 非線形要素：剛性低下型トリリニアモデル）にてモデル化します。
- (3) 初期断面力解析では、死荷重時の軸力を用いた非線形要素による動的解析を行います。また、ラーメン形式のため、軸力が最大・最小となる場合の影響（軸力変動）を適切に考慮できるようにモデル化を行います。
- (4) 減衰定数はレーリー減衰を使用しますが、上部構造を非線形梁要素でモデル化するため、非線形特性を考慮し減衰定数を0.05と設定します。
- (5) 加振方向は、橋軸方向と直角方向の2方向ですが、橋軸方向は非対称のラーメン構造形式であることから、入力地震動の正負を変えた動的解析を実施することにします。
- (6) 安全性の照査（上部工曲げモーメントの照査）では、上部工の応答曲率 ϕ と応答回転角 θ が、それぞれ許容曲率 ϕ_a と許容回転角 θ_a を超えないようにすることとします。
- (7) 2.2(1)で示した本橋の目的と、2.3に示した基準の改訂から、さらに構造挙動が安全側となるように、非線形動的解析手法による設計のみならず、非線形静的解析手法による設計も行い、その両方の解析結果を満足するような設計を行うこととします。この条件は、本橋のもっとも特徴ある設計条件の一つであり、結果的に非常に厳しい条件での設計を行うこととなりました。

参考までに、表-3にこれらの具体的な内容を示します。

3. 耐震解析結果

3.1 初期の検討結果

前節に記載したように、平成14年の道路橋示方書で設計した構造諸元に対して、平成24年の道路橋示方書を適用した解析を実施した結果、表-4に示す点において、安全率を超過しました。

表 - 3 道路橋示方書¹⁾ならびに設計基準²⁾の変更点

項目	道路橋示方書(平成14年)および設計要領第二集(平成23年版)	道路橋示方書(平成24年)および設計要領第二集(平成24年版)
解析手法	動的解析 時刻歴応答解析 固有値解析はサブスペース法による。 固有値解析における橋脚、垂直材、斜材の剛性は、塑性ヒンジ(M-θ)、非線形部材(M-φ)は降伏剛性を用いる。 上部工は全断面有効剛性が基本。	時刻歴応答解析 固有値解析はサブスペース法による。 固有値解析における橋脚、垂直材、斜材の剛性は、塑性ヒンジ(M-θ)、非線形部材(M-φ)の初期勾配(ひび割れ剛性)を用いる。上部工は全断面有効剛性が基本。
解析モデル	モデル化 上部工のモデル化は非線形梁要素(M-φ非線形要素)でモデル化する。 M-φ非線形要素:剛性低下型トリリニアモデル	上部工のモデル化は非線形梁要素(M-φ非線形要素)でモデル化する。 M-φ非線形要素:剛性低下型トリリニアモデル (コンクリートの応力-ひずみ曲線見直し)
	直角方向の判定 直角方向の鉄筋降伏の判定は、ウェブ外縁鉄筋が降伏またはPC鋼材が弾性限界に達する曲率で行う。	直角方向の鉄筋降伏の判定は、ウェブ外縁鉄筋またはPC鋼材が弾性限界に達する曲率のいずれか小さい方で行う。 著しく不合理となる場合には、ウェブ外縁鉄筋の降伏ひずみの3倍程度を許容値としても良い。
	下部工 塑性ヒンジ長: $Lp = 0.2h - 0.1D$ ($0.1D \leq Lp \leq 0.5D$) 初期断面力解析: ①初期断面力(死荷重)解析の軸力を用いた非線形要素による動的解析。	塑性ヒンジ長: $Lp = 9.5\sigma_{sy}^{(U/6)} \beta n^{-(1/3)} \phi'$ ($Lp \leq 0.15h$) 初期断面力解析: ①初期断面力(死荷重)解析の軸力を用いた非線形要素による動的解析。 ②ラーメン形式のため、軸力最大・最小値の軸力変動の影響を適切に考慮できるようにモデル化。
	減衰 等価減衰定数の設定 上部構造:非線形要素にてモデル化、減衰定数は0.01~0.02。	等価減衰定数の設定 上部構造:非線形要素にてモデル化、非線形特性を考慮して減衰定数は0.05。
加振方向	橋軸方向と橋軸直角方向の2方向	橋軸方向と橋軸直角方向の2方向、ラーメン構造であることから震動の正負を変えた動的解析を実施。
安全性の照査	上部工 曲げモーメントの照査 上部工の応答曲率φが許容曲率φa以下であることを照査。 最大応答曲率φ<許容曲率φa(φy) ただし、橋軸方向におけるφaは、修復可能な箇所に対して、修復限界状態として鉄筋ひずみが降伏ひずみの3倍(3φy)とする。	曲げモーメントの照査 上部工の応答曲率φが許容曲率φa以下であることを照査、 最大応答曲率φ<許容曲率φa(φy) ただし橋軸方向におけるφaは、PC鋼材が弾性限界に達する曲率(φpc)、または引張縁側にPC鋼材配置が無い箇所で圧縮応力度2N/m ² 以上の場合は、最外縁鉄筋が降伏に達する曲率の3倍(3φy)程度とする。
	下部工(塑性ヒンジ部) 回転角の照査 最大応答回転角θが許容回転角θa以下であることを照査 最大応答回転角θ<許容回転角θa $\theta a = \theta y + (\theta u - \theta y)/a$, a:タイプIの時3.0, タイプIIの時1.5	回転角の照査 最大応答回転角θが許容回転角θa以下であることを照査 最大応答回転角θ<許容回転角θpa2 $\theta pa2 = \theta py + (\theta pls2 - \theta py) / (\delta pls2 - \delta py) * (\delta pls2 / \alpha2 - \delta y)$, $\alpha2 = 1.2$ (タイプI, II共通)
	下部工(一般部) 終局モーメント 最外縁の軸方向圧縮鉄筋位置におけるコンクリートひずみが終局ひずみεcuに達した時。	限界状態 最外縁の軸方向鉄筋の引張りひずみが耐震性能2の許容引張りひずみεstに達した時。 および最外縁の軸方向圧縮鉄筋位置におけるコンクリートの圧縮ひずみが圧縮限界ひずみに達するときの曲率を比較し、小さい方の曲率を与える方とする。 橋脚の曲率照査(塑性化を考慮する領域0.4h) 最大応答曲率φが許容曲率φa2以下であることを照査する。 最大応答曲率φ<許容曲率φa2, $\phi a2 = \phi ls2 / \alpha2$, $\alpha2 = 1.2$

表 - 4 初期の検討における照査結果

解析種別	解析内容	安全率超過の状況
動的解析	軸力変動の影響を考慮したケース	タイプII, 軸力最大時に主桁上縁の応答曲率が超過
動的解析	入力地震動の正負を考慮したケース	タイプII, 負の入力地震時に主桁上縁の応答曲率が超過
静的解析	プッシュオーバー解析	P1 → P2時に主桁下縁の応答曲率が超過

3.2 対応方針

初期の検討結果より、主桁の応答曲率の超過を押さえるために、常時、レベル1地震時に4つの対応方針を実施します。

- 方針1: 主桁PC鋼材本数を増量したケース
 - 方針2: 桁高のみ増厚したケース
 - 方針3: 斜材・鉛直材を増厚したケース
 - 方針4: 桁高・斜材・鉛直材を増厚したケース
- 上記方針1~4の結果を受けて、さらに追加で、
- 方針5: 支点部桁高を増厚するケース
 - 方針6: PC鋼材位置を調整するケース
 - 方針7: 主桁主鉄筋量を増量するケース

を行います。

3.3 対応後の検討結果

3.2に示した方針にしたがい各ケースの耐震解析を行いました。その結果、方針7の対応をした場合のみ、制限値

を満足する結果となりました。表-5に、上記方針1~7までの対応によって、初期の構造諸元に対して変更となった箇所と照査結果を示します。

方針7によるケースの詳細を紹介します。初期の検討段階では、動的解析において入力地震動の正負を考慮した際に、主桁の上縁側(鉛直材付近)にて、タイプII地震動において制限値(鉄筋降伏曲率φsy以内)を満足できない箇所がありました。しかし、部材厚の変更、PC鋼材位置の調整、主桁鉄筋量の増加(主鉄筋径D16 → D22への変更)を行うことで、応答曲率が減り、上縁側の降伏曲率が大きくなり耐震性を満足しました(図-2)。

また、同様に初期の検討段階において、静的解析のプッシュオーバー解析により、主桁下縁側の中央支間付近で、主桁の応答曲率がPCの降伏曲率φpyを超過しましたが、方針7による諸元変更後の結果では、降伏曲率を満足する結果となりました(図-3)。

表 - 5 方針1～7による構造諸元の変更箇所と照査結果

方針	上部工					下部工				照査結果
	主桁					斜材 (mm)	鉛直材 (mm)	たて壁 (mm)	基礎杭 (本)	
	端部 (mm)	支点部 (mm)	中央 (mm)	上側筋 (径・ピッチ)	PC 鋼材					
方針 1	1 300	1 950	1 300	D16ctc125	鋼材量増	400	500	1 000	4 本	常時 斜材、鉛直材 OUT
方針 2	1 400	1 950	1 400	D16ctc125	-	400	500	1 000	4 本	常時 斜材、鉛直材 OUT
方針 3	1 300	1 950	1 300	D16ctc125	-	500	600	1 000	4 本	L2 地震時 主桁 OUT
方針 4	1 400	1 950	1 400	D16ctc125	-	500	600	1 000	4 本	L2 地震時 主桁 OUT
方針 5	1 400	2 050	1 400	D16ctc125	-	500	600	1 000	4 本	常時 鉛直材 OUT
方針 6	1 400	1 950	1 400	D16ctc125	位置下げ	500	600	1 000	4 本	L2 地震時 主桁 OUT
方針 7	1 400	1 950	1 400	D25ctc125	位置下げ	500	600	1 000	4 本	OK

表 - 6 決定した構造諸元

	上部工					下部工					
	主桁					斜材 (mm)	鉛直材 (mm)	たて壁 (mm)	P1	P2	フーチング
	端部 (mm)	支点部 (mm)	中央 (mm)	上側筋 (径・ピッチ)	PC 鋼材						
当初設計	1 300	1 950	1 300	D16ctc125	-	400	500	D32	主筋 D32 帯筋 D22@150	主筋 D32 帯筋 D22@125	スターラップ D19
詳細設計	1 400	1 950	1 400	D25ctc125	位置下げ	500	600	D35	主筋 D32 帯筋 D22@125	主筋 D32 帯筋 D22@125	スターラップ D19

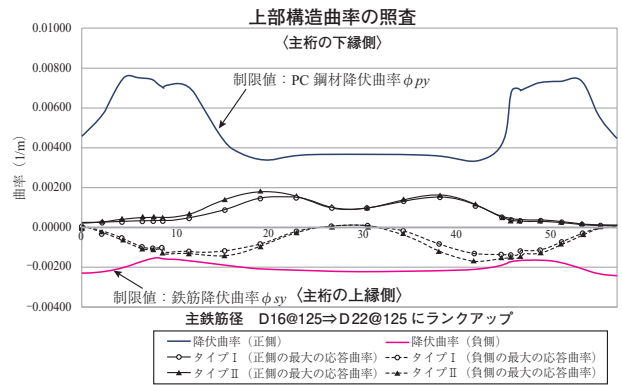
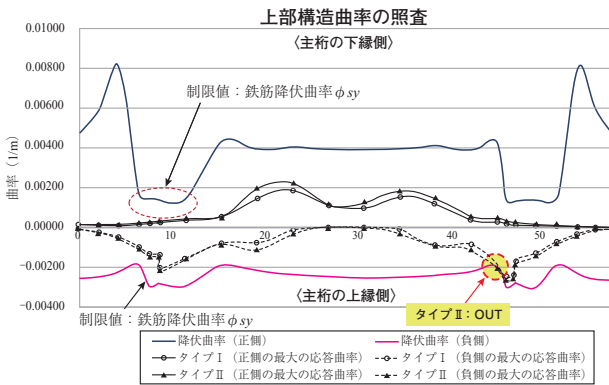


図 - 2 動的解析（入力地震動の正負を考慮）左：初期検討段階，右：対応方針後

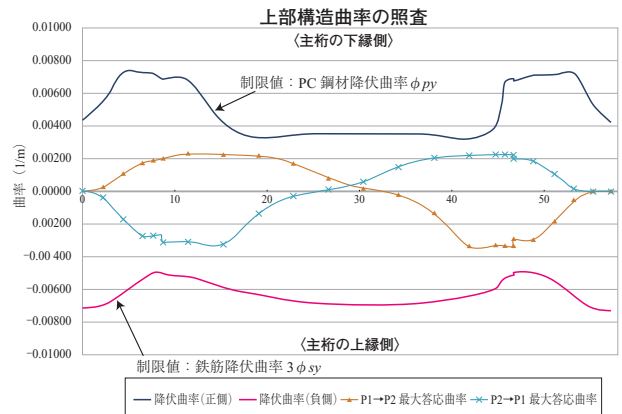
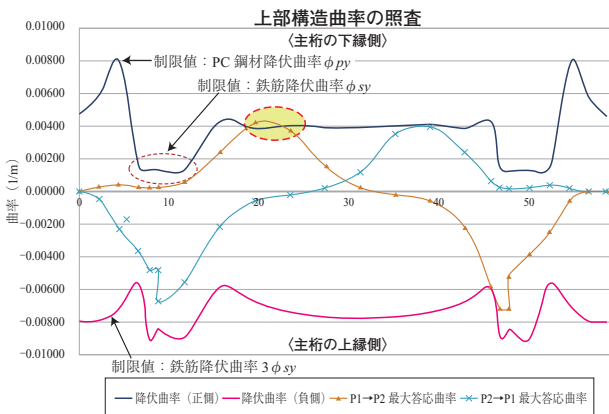


図 - 3 静的解析（プッシュオーバー解析）左：初期検討段階，右：対応方針後

最終的には、表 - 6 に示す様に、当初設計時点からの構造諸元の変更を行うことで、安全性を満足する結果を得ることが出来ました。

4. おわりに

今回紹介した事例は、道路橋示方書の改訂時期に実施したものであるため、結果的に一つの構造物で、改訂前後の両方の示方書に示される非線形静的解析、非線形動的解析を満足させる制約が生じてしまいました。したがって、非常に厳しい設計条件の下、難しい設計となってしまった例であるといえます。

もう一つ、今回の事例でいえることは、特殊な交差条件、地形条件から、扁平な形状の PC 斜材付 π 型ラーメン橋を採用しているということです。おそらく構造の成立と

いう観点からは、過去の平均的な適用実績から逸れているのかもしれませんが。

しかしながら、3.2 で紹介した耐震設計条件を満足させるためにとった対応方針は、どれも基本的なアプローチ手法です。収束するまでの道のりは遠かったというのが本音ですが、これらの対応を行うことで、制約条件を満足できるということを知っていただければ幸いです。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，平成 14 年 3 月 / 平成 24 年 3 月
- 2) 東日本高速道路 設計要領第二集 橋梁建設編 平成 23 年度版 / 平成 24 年度版

【2015 年 9 月 8 日受付】



刊行物案内

第 24 回 プレストレストコンクリートの 発展に関するシンポジウム 論 文 集

(平成27年10月)

本書は、平成27年10月に富山市（富山県民会館）で開催された標記シンポジウムの講演論文集です。

CD 版論文集：定価：12,000 円，会員特価 8,000 円／送料 300 円
 体 裁：プラスチック CD ケース入り
 書籍版論文集：定価：12,000 円，会員特価 10,000 円／送料 500 円
 体 裁：B5 判，箱入り