

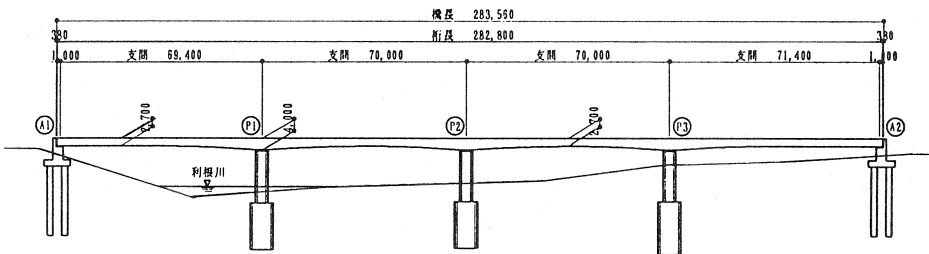
(46) 利根川橋(4径間連続PC箱桁橋)の免震設計

住友建設(株)・ピーシー橋梁(株)共同企業体 正会員○古賀 友一郎
 日本道路公団東京第二建設局構造技術課 渡辺 陽 太
 日本道路公団東京第二建設局高崎工事事務所 中村 康 裕
 住友建設(株)・ピーシー橋梁(株)共同企業体 正会員 藤原 保 久

1. はじめに

北関東自動車道利根川橋は、群馬県高崎市と前橋市の間に位置し、一級河川利根川を渡河する4径間連続PC箱桁橋である。本橋では耐震安全性の向上を目的として高減衰ゴム支承(HDR)を用いた免震構造を採用している。橋梁の耐震設計は、平成8年12月に改訂された「道路橋示方書・同解説・V耐震設計編」の規定に従って、震度法および地震時保有水平耐力法により行っている。新道示(耐震設計編)では、従来具体的な規定がなかった「免震設計」「支承部」および「落橋防止システム」について設計手法が新たに規定されており、これらの適用にあたっては種々の比較検討を行っている。本論文では、耐震設計を中心とした設計概要、動的解析による照査、免震支承の試験結果について報告する。

側面図



平面図

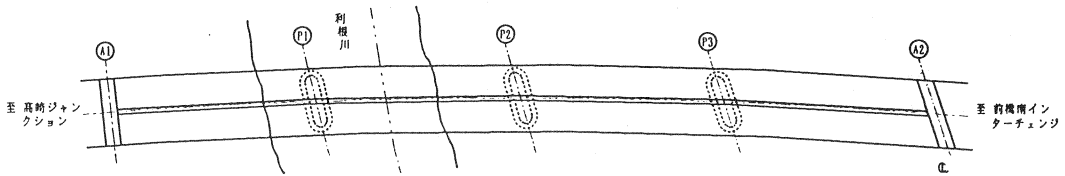


図-1 全体一般図

2. 橋梁概要

上部構造は、4径間連続PC箱桁橋で有効幅員が9.75mの上下線分離構造である。下部構造は上下線一体構造のケーソン基礎で、橋脚は高さ18m～17.5mの小判形である。

免震支承はP1、P2、P3橋脚部に配置して3脚分散とし、A1、A2橋台部にはすべりゴム支承を配置した。

橋梁諸元を表-1に、橋梁一般図を図-1、2に示す。

橋種	プレストレストコンクリート道路橋
道路規格	第1種2級B規格
橋格	1等橋
構造形式	4径間連続PC箱桁橋
橋長	283.56m
支間割り	69.5+70.0+70.0+71.4m
有効幅員	9.75+9.75m
斜角	87° 00' 19" ~ 68° 59' 41"
勾配	縦断0.3%, 横断4.5%
活荷重	B活荷重

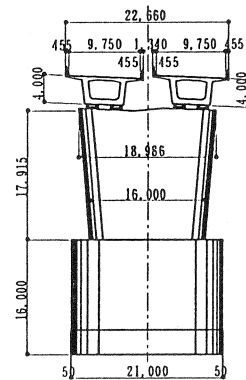


図-2 断面図

3. 耐震設計

3-1 基本方針

- ・耐震設計は平成8年度に改訂された「道路橋示方書 V耐震設計編」に基づいて震度法及び地震時保有水平耐力法によって行った。
- ・弾性支持による構造物の長周期化と支承の高減衰性により地震力を低減する免震構造とし、橋脚の耐力照査においても免震効果を考慮した。
- ・端部支承はスベリ支承であり、主桁が斜角を有しているため、橋台部にコンクリートブロックを設けて直角方向の移動を制限した。
- ・橋軸方向は免震とし、直角方向は震度法レベルで固定、保耐法レベルで免震とした。
- ・大地震後の復旧を考慮して、免震支承は取り替え可能な構造とした。
- ・地震時保有水平耐力法に用いる等価水平震度の算出法は、橋脚の履歴減衰によるエネルギー吸収を前提としているため、免震支承の耐力は橋脚の地震時保有水平耐力以上を確保するものとした。

3-2 支承の設計

免震支承としては、高減衰ゴム支承（HDR）を採用した。免震方向は、上記の基本方針に従って震度法レベルでは、直角方向に鋼製サイドブロックで固定する構造とした。一方、保耐法レベルの地震に対しては、サイドブロックの取付けボルトが破断するように部材強度を設定し、直角方向にも免震となるようにした。

橋梁全体の固有周期は、上部工変位を考慮し、地震時水平力が下部工保有水平耐力を上回らない範囲で、支承工費が最も経済的になるように設定した。その設計結果を表-2、3に、形状図を図-3に示す。

表-2 支承の設計条件・設定

項目	単位	免震支承
死荷重反力	(t)	1145.7
活荷重反力	(t)	342.9
移動量	ガ-ブ・乾燥収縮 (mm)	19.0
	温度変化 (mm)	25.3
平面形状	(mm)	1750*1700
ゴム厚	(mm)	46*5=230

表-3 支承の動的特性

項目	震度法		保耐 I		保耐 II	
	橋軸方向	直角方向	橋軸方向	直角方向	橋軸方向	直角方向
等価剛性(tf/m)	2084	2291	1343	1311	1343	1272
固有周期(sec)	1.705	1.508	2.143	1.923	2.143	1.951
減衰定数	21.6%	21.9%	18.7%	18.2%	18.7%	17.9%
設計水平震度	0.21	0.23	0.40	0.53	0.40	0.64
支承移動量(mm)	132.6	107.6	394.3	435.1	394.3	547.5
せん断ひずみ	57.7%	46.8%	171.4%	189.2%	171.4%	238.0%
局部せん断ひずみ	117.6%	105.1%	243.0%	262.2%	243.3%	318.0%

3-3 耐力の設定

支承部材の設計、橋脚の照査では各地震レベルに応じて表-4に示すように耐力の設定をした。

表-4 各地震レベルと部材耐力

項目	ケース	震度法	地震時保有
		レベル	水平耐力法
支承本体 ゴム	支圧応力度	80×1.5=120kg/cm ²	120kgf/cm ²
	せん断歪み	150%	250%
	局部せん断歪み	277% (γ=1.8)	416% (γ=1.2)
	破断歪み	500%	
鋼製部材	σsa=σsy/1.7	1.5σsa	1.5σsa
橋脚	許容応力度以下	地震時保有水平耐力	

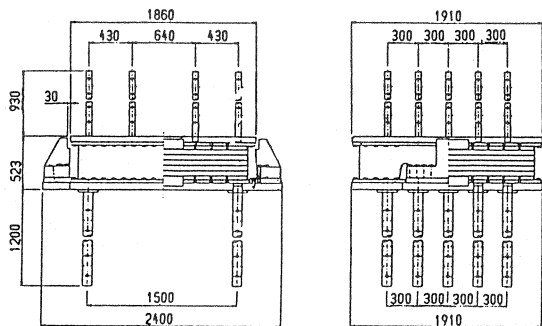


図-3 支承一般図

3-4 橋軸直角方向の検討

橋軸直角方向に保有水平耐力法レベルの地震力が作用すると、P1～P3 支承サイドブロックの取り付けボルトが破断し免震構造となる。主桁はA1, A2 橋台部を支点として大きく変形し、直角方向に大きな曲げモーメントが作用する。この時の主桁の安全性を確認するため、地震時曲げモーメントに対して主桁の直角方向曲げ破壊抵抗モーメントの照査を行った。検討手法は、主桁の形状を近似的にT桁形状に置き換え、以下の2つの条件のもとに、曲げ破壊抵抗モーメントを算出した。

- ・引張鋼材として、上下床版、ウェブ、張出し部のPC鋼材を考慮する。
- ・張出し床版部は無視する。

主要断面の検討結果を表-5に、曲げモーメント図を図-4に示す。いずれの箇所においても、作用曲げモーメントより桁の曲げ破壊抵抗モーメントの方が大きく、主桁の安全度が確認された。

表-5 橋軸直角方向の検討

	曲げ破壊抵抗モーメント	作用曲げM(kN-m)	判定
A1-P1	23766	> 11520	OK
P2	26544	> 1210	OK
P1,P3	32206	> 6973	OK
P1-P2,	11710	> 11285	OK

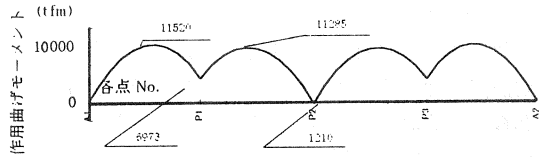


図-4 曲げモーメント図

3-5 落橋防止システム

橋軸方向の落橋防止装置としてPCケーブルにより主桁と橋台パラペットを連結する装置を設置した。落橋防止装置は免震支承の許容せん断ひずみ(250%)に相当する移動量を超えてから作動するよう遊間を設定した。また、作動後急激な加力を防止するため、特殊な緩衝装置を採用した。

図-5にその構造図を示す。図-5の2から3の間で、円錐形の緩衝ゴム材の変形を利用して、緩衝効果を大きくしている。また剛性の高い容器の中に緩衝ゴム材を密閉するため、許容支圧応力度を従来の120kg/cm²から250kgf/cm²に緩和でき、装置全体がコンパクトになった。

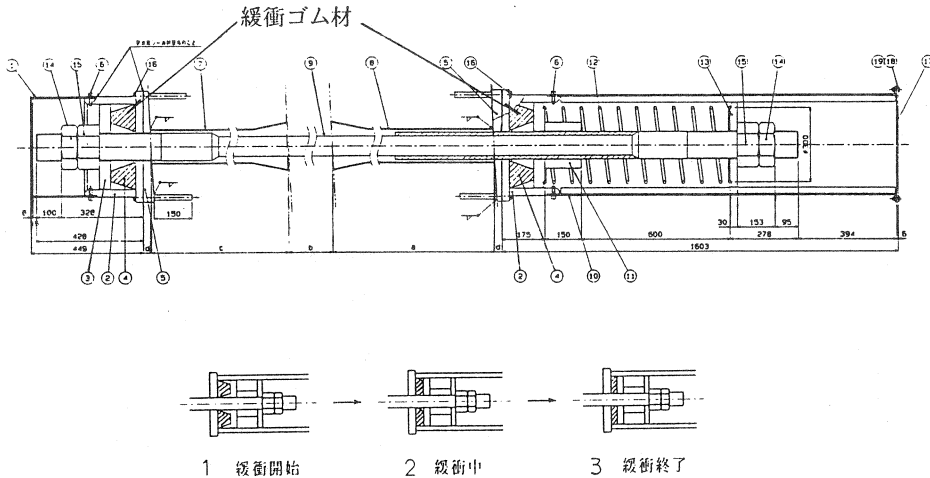


図-5 落橋防止装置図

伸縮装置は震度法レベルの移動を吸収できる構造のためジョイントプロテクターは設置していない。直角方向には、変位制限構造としてジョイントプロテクターを兼ねるコンクリート製ブロックを桁端部に設置した。概略図を図-6に示す。

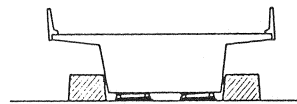


図-6 変位制限装置図

4. 動的解析

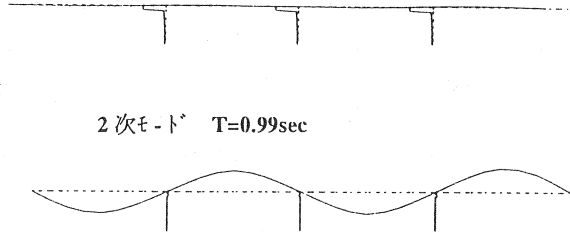
4-1 固有値解析

震度法レベルの支承の剛性を使った固有値解析の結果を図-7に示す。主要モードは主桁水平変位モードで固有周期は1.66秒で、設計解析値とほぼ同じ値となった。2次モードには主桁鉛直たわみモード、その後6次から8次で各下部工の卓越モードが現れている。これらの結果を踏まえ非線形動的解析を行った。

1次モード T=1.66sec

2次モード T=0.99sec

図-7 モード図



4-2 非線形動的解析

(1) 解析方法

橋梁全体の動的特性を把握し、大地震時における耐震安全性を照査するため、全橋モデルによる非線形動的解析を行った。解析方法は各部材の非線形性を考慮した弾塑性時刻歴応答解析とし、解析モデルは図-8に示す全体骨組モデルを用いた。RC部材のモデル化は各断面ごとに複数のエレメントに分割したファイバーモデルを用い、各ファイバーの応力-歪み関係は図-9のように設定し、免震支承は等価線形バネとしてモデル化した。入力地震波は「道路橋の耐震設計に関する資料」(日本道路協会)に記載されている時刻歴応答解析用Ⅱ種地盤標準波形の中-タイプⅠ「板島橋」-タイプⅡ「JR鷹取駅」を用いた。

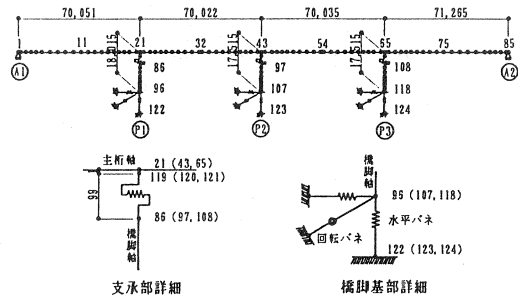


図-8 骨組図

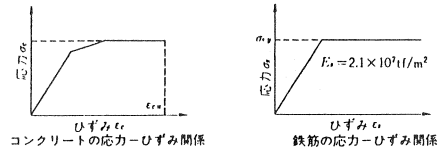
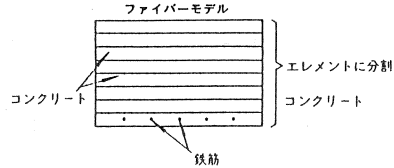


図-9 応力-ひずみ関係図

(2) 結果

表-6に主な解析結果を示す。表より各最大応答値は許容値以内であり、耐震安全性は確保されている。以下に各応答値に対する考察を記す。

1) 主桁の応答

図-10にタイプⅠ加速度入力波形、応答波形、図-11にタイプⅡ加速度入力波形、応答波形を示す。タイプⅡの主桁応答加速度は、橋脚天端の応答加速度に比べ低減されている。これは主桁が免震支承によって柔らかく支持され、長周期化されていること、さらに橋脚の履歴減衰によって地震エネルギーが吸収されるからである。それに対してタイプⅠの主桁の応答加速度は、橋脚天端の応答加速度に比べ低減が見られない。これは地震波の持つ特性によるものと思われる。

表-6 非線形動的解析の最大応答値と照査結果

		P 1 橋脚		P 2 橋脚		P 3 橋脚	
		タイプⅠ	タイプⅡ	タイプⅠ	タイプⅡ	タイプⅠ	タイプⅡ
加速度 (gal)	入力波	363	682	363	682	363	682
	主桁水平方向	613	644	613	643	613	643
変位 (mm)	橋脚天端水平方向	413	934	397	931	394	930
	主桁(1)	651	695	650	695	651	695
	橋脚天端(2)	131	132	126	126	122	123
	相対変位(1)-(2)	520	563	524	569	529	571
支承のせん断ひずみ(%)<250		226%	245%	228%	247%	230%	248%
	橋脚	18463	16646	16667	17212	18115	16286
橋脚基部	曲げモーメント(tf・m)	21518		20994		21490	
	せん断力(tf)	1885	2023	1874	1997	1890	1996
	せん断耐力Pu	6155	6335	6155	6335	6155	6335
	応答塑性率	1.88	2.00	1.86	1.88	1.79	1.98
	許容塑性率	2.11	4.81	2.46	6.39	2.38	6.10

2) 支承の応答

免震支承のせん断ひずみは、静的解析より大きな値が出ているものの許容値以内で、免震支承の試験結果からもその耐力は確認されており問題ない。

3) 橋脚の応答

図-12にタイプI地震波による橋脚下端の曲げモーメント、天端の応答変位を示す。橋脚下端の曲げモーメント、天端の応答変位は降伏点を上回っており、橋脚部材が塑性域に達している事を示している。塑性率で見るとタイプI、II地震波による応答塑性率が最大でそれぞれ $\mu=1.9$ 、 2.0 であり、いずれも許容塑性率以内である。従って保耐法レベルの大地震が作用した場合でも、橋脚の損傷は軽微なものと考えられる。橋脚の作用せん断力は、そのせん断耐力に対して余裕がある。これは橋脚部材が「復旧仕様」に従って設計されており、帯鉄筋、中間帯鉄筋がかなりの量で配筋されているためである。

橋脚の残留変位もそれぞれの地震波において、いずれの橋脚天端で2mm以下の値であり問題はない。

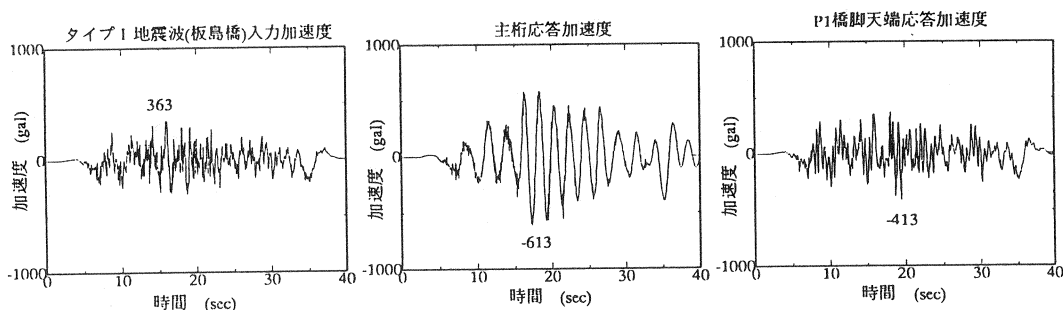


図-10 タイプI地震波と応答加速度

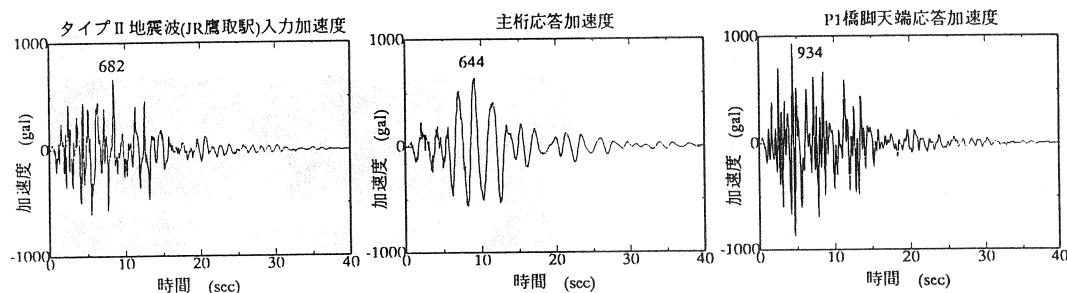


図-11 タイプII地震波と応答加速度

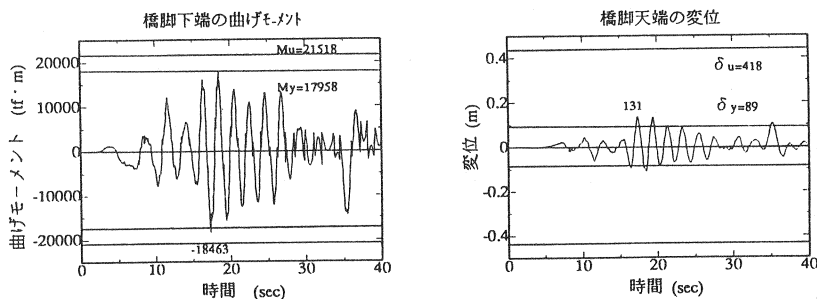


図-12 橋脚の曲げモーメントと変位

5. 支承の試験

免震支承の使用に先立って支承の諸特性を確認するため、性能確認試験を実施した。しかし、本橋で使用される免震支承は大型で、既存の試験設備では大変形時の特性を確認できないため、1/3縮小供試体によって確認することとした。また、縮小供試体試験では水平変位350%の極限試験を行い、保耐法レベルの許容値(250%)に対する安全性を確認した。以下による主な試験内容とその結果について記す。

5-1 性能確認試験

性能確認試験では、実大支承の100%水平変位に対する等価剛性・等価減衰定数を計測し、設計値と比較した。その結果、計測値と設計値との誤差は±10%以内であり、問題はなかった。

5-2 正負50回連続繰り返し耐久試験

縮小供試体を用い、175%水平変位を連続して50回繰り返し作用させ、支承の耐久性を確認した。その結果、50回載荷後の支承の履歴曲線は、ほとんど変化せず、支承の諸特性は安定していることが確認された。

5-3 極限試験

極限試験では、縮小供試体を用いて載荷変位を漸増させ、最終的には水平変位350%まで載荷した。その時の履歴曲線を図-13に示す。

250%載荷時までは安定した履歴曲線を示しているが、350%載荷時には変位に比べて荷重が急激に増加するハードニング現象が見られる。これより設計で想定している規模以上の地震力が作用した場合、免震支承自体がストッパーとして機能すると考えられる。また350%載荷には、被覆ゴムの一部に損傷が見られたものの、内部の本体部に損傷は見られず、十分な耐荷力を有していると判断される。極限試験状況を図-14に示す。

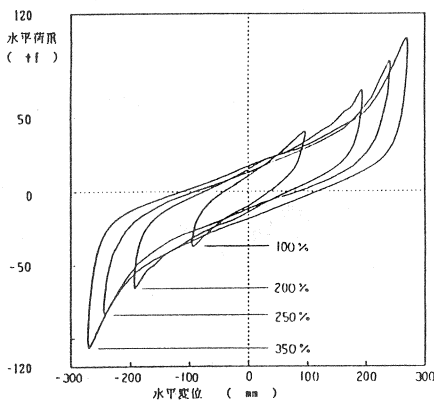


図-13 水平変位「荷重-ひずみ」曲線

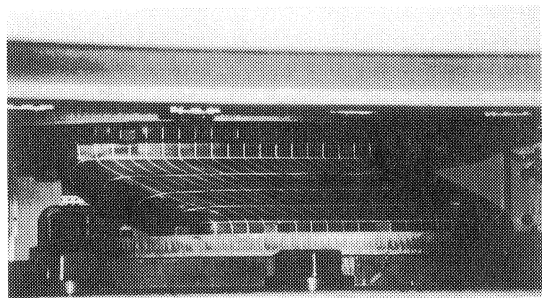


図-14 縮小モデルによる極限試験状況

6. まとめ

- 1) 道路橋示方書(平成8年12月)に従った、免震設計を採用することにより橋梁の耐震安全性が向上した。
- 2) 非線形動的解析によって保耐法レベルの大地震に対する安全性を照査した。
- 3) 免震支承の種々の試験により、免震設計の妥当性を検証した。

7. 参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説 平成8年12月 日本道路協会
- 2) 細木、渡辺「免震支承および反力分散支承を使用した橋脚の比較設計結果について」第一回免震・制震コロキウム、1998年11月、土木学会