

上路式鋼アーチ橋の RC 床版をアルミニウム床版に 取り替えることによる耐震性の向上

野中 哲也¹ 宇佐美 勉²

¹正会員 株式会社耐震解析研究所 (〒466-0059 名古屋市昭和区福江 2-9-33-303)

²フェロー会員 名城大学教授, 理工学部建設システム工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501)

要旨

上路式鋼アーチ橋においては、RC 床版の重量が全重量の半分以上も占めるのが一般的であり、大地震時に RC 床版に対して大きな慣性力が作用して、アーチリブ基部や端支柱等が大きく損傷する場合が多い。その慣性力を低減するため、床版を軽くすることが耐震向上策において効果があると思われる。そこで、本研究では、上路式鋼アーチ橋を対象にして、RC 床版をアルミニウム床版に取り替えることにより、どの程度耐震性が向上するか解析的検討を実施した。対象の上路式鋼アーチ橋は、一般的な橋長のアーチ橋と比較的小規模なアーチ橋の2種類である。その結果、比較的短周期の上路式鋼アーチ橋に対して、特に耐震性が向上することが確認できた。

キーワード：アルミニウム床版、上路式鋼アーチ橋、耐震補強、耐震性向上

1. はじめに

阪神大震災以降、上路式鋼アーチ橋等のような特殊橋梁に対しても耐震補強の研究が各研究機関にて精力的に行われてきた。現在、その研究成果を活用して、部材補強といった従来の補強方法と併用することもあるが、制震ダンパー等の設置による制震構造がよく採用されている。制震構造とは、主部材の鋼板増厚や部材追加等による強度と変形性能を向上させる従来の補強とは異なり、地震後に取替えまたは補修が容易にできる2次部材等に対してのみ大地震時に許容範囲の損傷をさせて、主構造を健全な状態に収めるというものである。この2次部材等をエネルギー吸収部材と称し、上路式鋼アーチ橋においてはアーチ下横構や支柱の対傾構がそれに相当する。実際は、この2次部材の代わりに積極的かつ安定したエネルギー吸収をさせる制震ダンパーを用いることになる。しかし、対象橋梁の構造特性によっては、制震ダンパー等の設置が困難で、主構造の損傷を許容値内にすることが非常に困難な場合もある。

一方、地震外力そのものを下げる方法も考えられる。すなわち重量を軽くして慣性力を下げることである。上路式鋼アーチ橋の構造的特徴としては、RC床版の重量が全重量の半分以上(約6割程度)も占めるのが一般的である。そのため、大地震時にRC床版に対して大きな慣性力が作用して、アーチリブ基部や端支柱、さらには2次部材の下横構や対傾構等が大きく損傷する場合が多い。その慣性力を低減するため、床版を軽くすることが耐震向上策において効果があると思われる。

そこで、本研究では、上路式鋼アーチ橋を対象にして、RC床版を重量の軽いアルミニウム床版(AL床版)に取り替えることにより、どの程度耐震性が向上するか解析的検討を実施した。対象の上路式鋼アーチ橋は、一般的な橋長のアーチ橋と比較的小規模なアーチ橋の2種類である。

2. 対象橋梁（モデル橋 1）と解析モデル

(1) 対象橋梁

まず、対象としては、図-1に示すような橋長 174m（アーチ支間長：114m）の上路式鋼アーチ橋¹⁾であり、山間部に比較的多い形式の橋梁である。本橋梁は、上部構造のほとんどの重量を占める床版の重心位置が、アーチリブを補剛する補剛桁上にある橋梁形式であり、道示²⁾において動的挙動が複雑な橋梁に分類される。

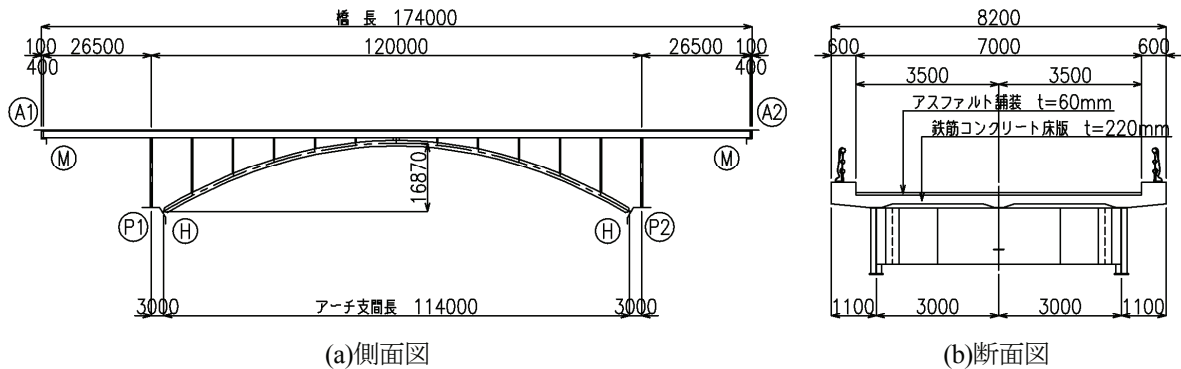


図-1 モデル橋 1

(2) 解析モデル

対象橋梁のモデル化は、図-2に示すように、ファイバーモデルによる3次元骨組モデルとした。アーチリブおよび端支柱は箱形断面であり、補剛桁、支柱の水平材や対傾構、アーチ支材や横構はH形断面であり、各断面に対してファイバー要素分割した。なお、支承の破壊や橋台との衝突は考慮していない。

床版については、板構造であるためシェル要素でモデル化する方法もあるが、文献 1)を参考にして、ファイバー要素（梁要素）でモデル化した。床版のファイバー要素は、床版軸と補剛桁のずれを考慮した上で、図-2の拡大図に示すようにコンクリートセルと鉄筋セルから構成されている。

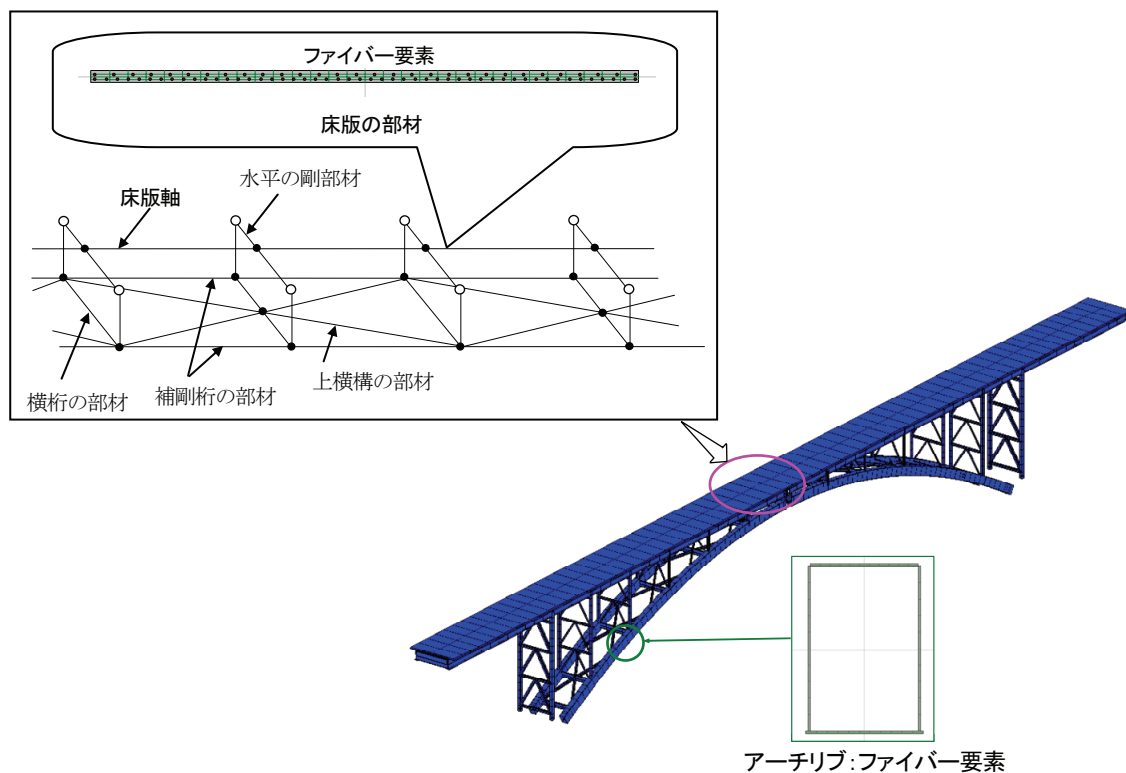


図-2 解析モデル

本橋梁の構造的な特性から、床版も塑性化する可能性があり、ファイバー要素断面の各セルの材料構成則としては標準的なものを用いる。鋼材および鉄筋については、2次勾配が $E/100$ のひずみ硬化を考慮したバイリニアモデルとし、硬化則は移動硬化則とした。コンクリートの材料構成則については、道示²⁾で規定されたものを用い、圧縮のみ受け持つ（引張なし）とした。ただし、除荷および再載荷については初期勾配で行う¹⁾ものとした。

(3) 応答解析条件

入力地震動としては、上路式鋼アーチ橋の建設地点および対象橋梁の応答特性を考慮して、道示²⁾のI種地盤のタイプIIの標準波形を用いることにし、この地震波を橋軸方向と橋軸直角方向に作用させる。時間積分法としては、ニューマークの β 法を用い、減衰はレーリー減衰とした。解析手法としては、材料非線形性と幾何学的非線形性を同時に考慮した動的複合非線形解析を採用した。

3. アルミニウム床版（AL床版）への変更モデル

(1) AL床版の構造

検討対象の上路式鋼アーチ橋のRC床版をAL床版に取り替える。AL床版（開閉断面AL床版）の構造を図-3に示す。同図(a)に示すように、中空の部材が橋軸直角方向に並ぶような形式で、対象橋梁の補剛桁上にAL床版が設置される。常時荷重で設計されたAL床版の1本分の押出形状の寸法を同図(b)に示す。1本の押出を複数本（本検討で4本）で構成して、AL床版の1ユニットとなる（同図(c)）。このAL床版ユニットは、鋼製高力ボルトを用いて接合される。

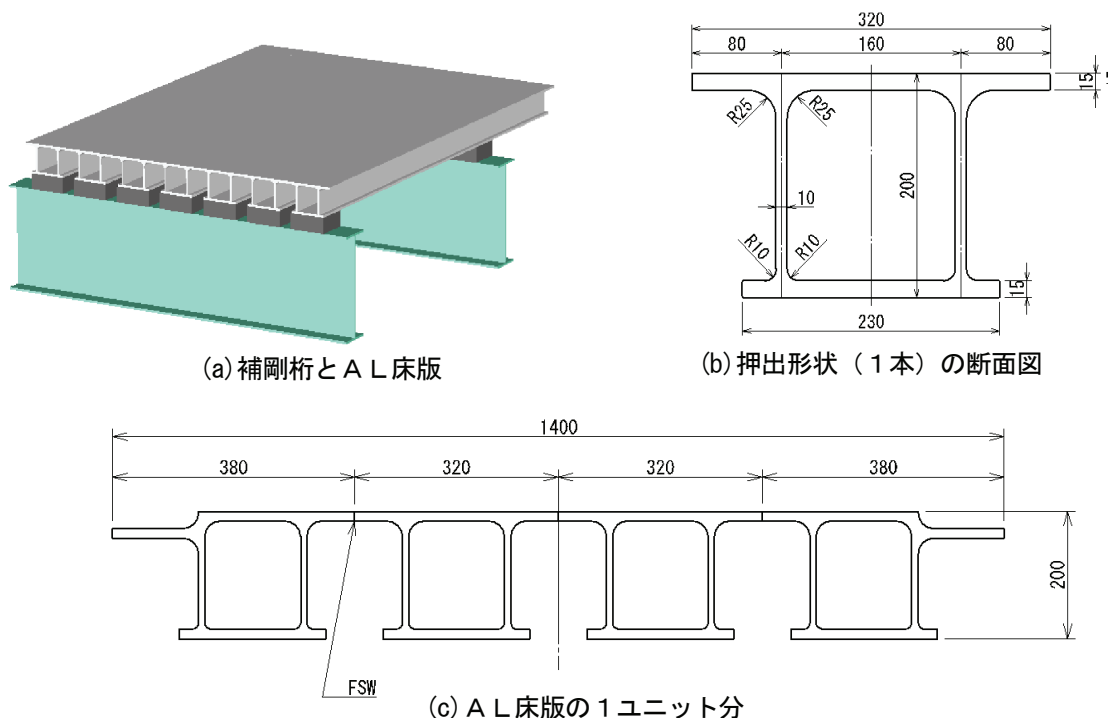


図-3 AL床版の構造

(2) AL床版のモデル化

AL床版に対しても、RC床版と同様にファイバーモデルでモデル化する(図-4)。AL床版ユニット毎にAL床版と補剛桁を連結され、AL床版ユニットのボルト接合継手に対応する部分をファイバー要素でモデル化し、各ユニットを連結させる。このようにモデル化することにより、RC床版と同様にAL床版も塑性化が考慮できる。

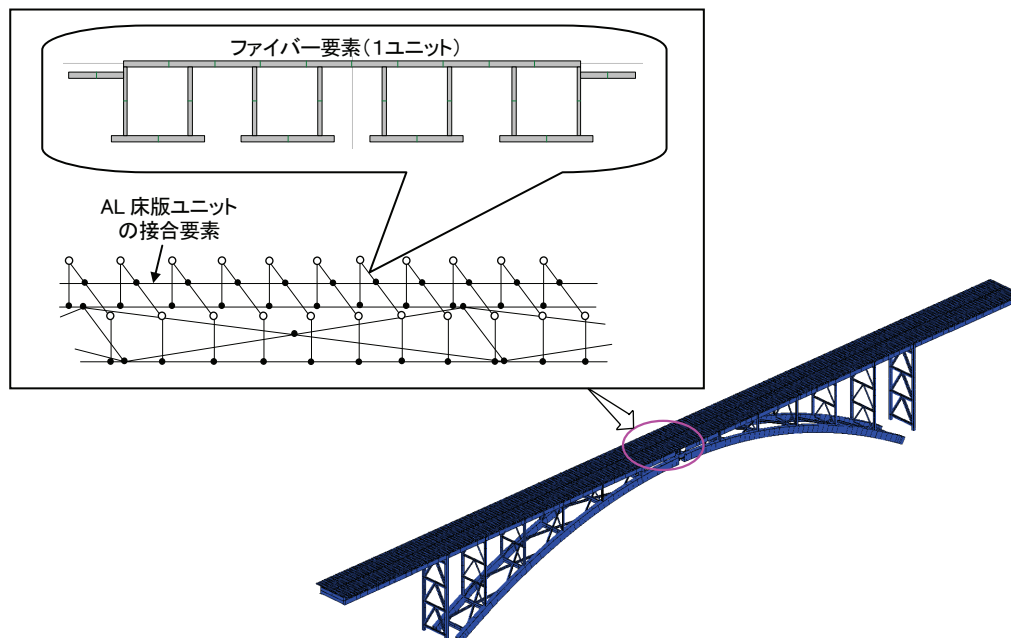


図-4 AL床版の解析モデル

4. モデル橋1の地震応答解析結果

(1) 固有周期

対象橋梁の振動特性を把握するため、固有振動解析を実施した。RC床版とAL床版の解析結果をそれぞれ表-1, 2に示す。これらの表から、RC床版、AL床版とも、橋軸方向(X方向)が1次モード、橋軸直角方向(Y方向)が2次モードであることがわかる。RC床版で、橋軸方向で1.368秒、直角方向で0.949秒となっているのに対して、AL床版では短周期化され、橋軸方向で0.866秒(RC床版に対して63%に低減)、直角方向で0.632秒(RC床版に対して67%に低減)となった。

表-1 RC床版アーチ橋の周期

モード次数 n	振動数 f Hz	周期 T sec	有効質量比		
			X	Y	Z
1	0.7308	1.3683	17%	0%	0%
2	1.0538	0.9489	0%	72%	0%
3	1.6038	0.6235	0%	0%	2%
4	2.1174	0.4723	0%	0%	0%
5	2.5665	0.3896	29%	0%	0%
6	2.6319	0.3800	0%	0%	53%
7	3.2246	0.3101	0%	13%	0%
8	3.6563	0.2735	33%	0%	0%
9	3.7051	0.2699	0%	0%	14%
10	3.9371	0.2540	13%	0%	0%

表-2 AL床版アーチ橋の周期

モード次数 n	振動数 f Hz	周期 T sec	有効質量比		
			X	Y	Z
1	1.1543	0.8663	18%	0%	0%
2	1.5815	0.6323	0%	70%	0%
3	2.4422	0.4095	0%	0%	1%
4	3.3339	0.2999	0%	0%	0%
5	3.9798	0.2513	0%	0%	57%
6	4.0421	0.2474	18%	0%	0%
7	4.5919	0.2178	0%	0%	0%
8	5.1273	0.1950	18%	0%	0%
9	5.2983	0.1887	0%	0%	1%
10	5.7320	0.1745	0%	18%	0%

(2) 地震応答解析結果（橋軸方向）

モデル橋1に対する橋軸方向の地震応答解析結果を図-5に示す。塑性化した部材を太線（赤線）で示している。RC床版アーチ橋において多くの支柱が塑性化しているのに対して、AL床版アーチ橋では1箇所わずかに塑性化している程度である。RC床版アーチ橋の支柱は、大きく塑性化し、 $5 \epsilon_y$ 近くまで達している。

各部材に対して、塑性化の状況を整理すると、表-3のようになる。表内の色付き網掛けは、塑性化した部材を示している。橋軸方向において塑性化する部材は、支柱のみであり、AL床版アーチ橋ではほとんど弾性範囲内に抑えることができた。モデル橋1の橋軸方向においては、AL床版に替えることにより、耐震性が向上することが確認できた。

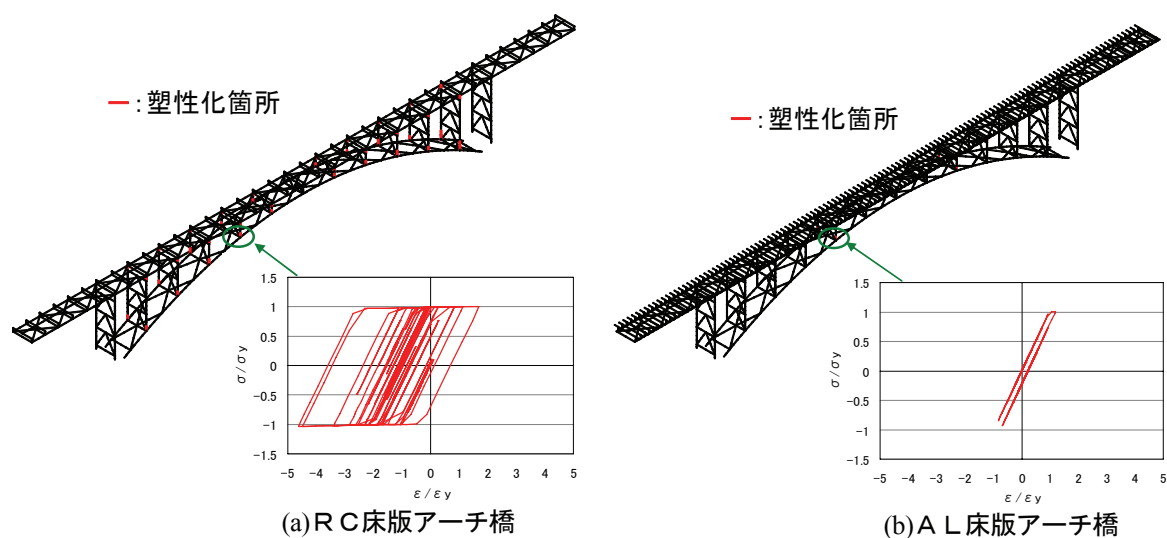


図-5 モデル橋1の解析結果（橋軸方向）

表-3 モデル橋1の解析結果の比較 (ϵ/ϵ_y)

		RC床版		AL床版	
		引張	圧縮	引張	圧縮
補剛桁	G1	0.99	0.91	0.49	0.56
	G2	0.99	0.91	0.49	0.56
アーチリブ	AR1	0.48	0.92	0.21	0.37
	AR2	0.48	0.92	0.21	0.37
支柱	L	3.57	4.63	1.27	1.39
	R	3.57	4.63	1.27	1.39
横桁		0.13	0.10	0.05	0.05
下支材		0.28	0.04	0.08	0.00
下横構		0.13	0.35	0.04	0.12
水平材		0.19	0.24	0.10	0.12
対傾構		0.93	0.98	0.44	0.41

(3) 地震応答解析結果（橋軸直角方向）

モデル橋1に対する橋軸直角方向の地震応答解析結果を図-6に示す。塑性化した部材を同様に太線（赤線）で示している。RC床版アーチ橋の方が多くの支柱が塑性化しているが、AL床版アーチ橋でもアーチリブ基部近辺や端支柱基部近辺の部材が塑性化している。その塑性化の程度は、RC床版アーチ橋で約 $9 \epsilon_y$ 、AL床版アーチ橋で約 $6 \epsilon_y$ である。

各部位に対して、塑性化の状況を整理すると、表-4のようになる。主部材の支柱やアーチリブ以外に、2次部材の下支材、下横構、対傾構の2次部材も大きく塑性化している。前述の橋軸方向においては、AL床版に替えることにより、ほとんど弾性範囲内に抑えることができたが、橋軸直角方向においては、それほど塑性化が低減できない結果となった。

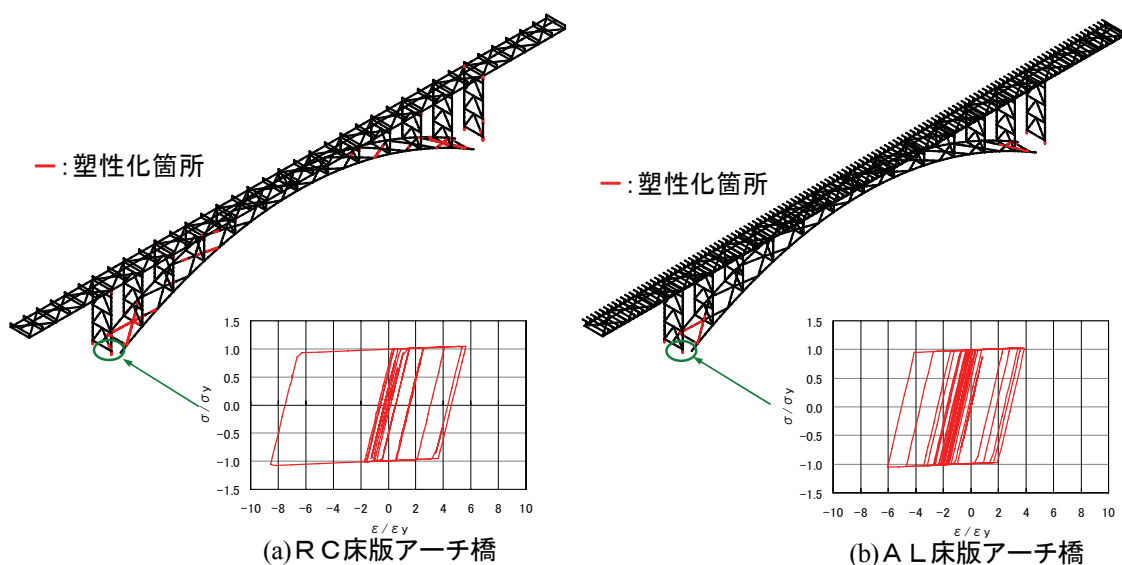


図-6 モデル橋1の解析結果（橋軸直角方向）

表-4 モデル橋1の解析結果の比較 (ϵ/ϵ_y)

		RC床版		AL床版	
		引張	圧縮	引張	圧縮
補剛桁	G1	0.84	0.63	0.51	0.56
	G2	0.73	0.66	0.45	0.62
アーチリブ	AR1	0.74	0.91	0.80	0.89
	AR2	0.56	1.11	0.75	0.94
支柱	L	5.89	7.03	3.90	6.06
	R	5.65	8.66	5.30	4.58
横桁		0.96	0.95	0.97	0.96
下支材		2.40	2.43	1.54	1.54
下横構		3.91	10.31	2.09	5.16
水平材		0.88	0.92	0.85	0.87
対傾構		0.96	1.01	0.90	0.87

AL床版に取り替えても橋軸直角方向の応答値があまり減少しなかったため、ここで入力地震動の周期特性との関係を考察する。本検討で用いた標準波形の加速動応答スペクトルを図-7に示す。図内にRC床版アーチ橋とAL床版アーチ橋の橋軸直角方向の固有周期も合わせて示している。この図から、AL床版に取り替えることにより対象橋梁の固有周期が0.949秒から0.632秒に短くなり、入力地震動の加速度応答スペクトルの最大2000galに達していることがわかる。すなわち、AL床版に取り替えることにより、対象橋梁が短周期化して、地震力が大きくなったことになる。AL床版になったことで、床版の重量が軽くなり慣性力が低減させられたが、一方で地震力（加速度）が増加したため、塑性化の低減効果は小さくなったと考えられる。

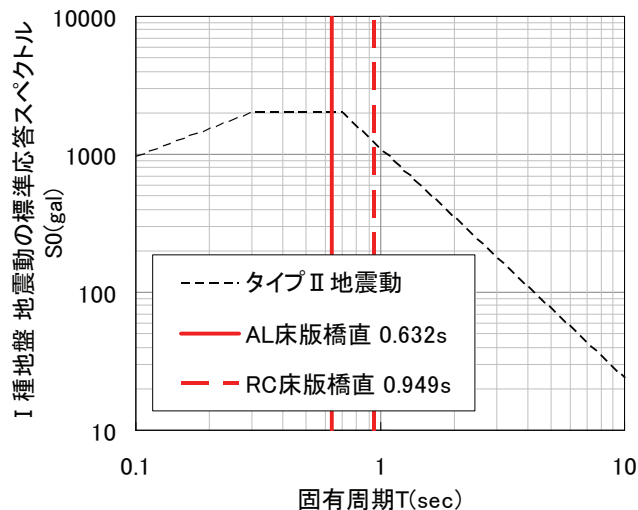


図-7 地震動と対象橋梁の周期の関係

5. 静的荷重による橋軸直角の解析結果

前述のモデル橋1の橋軸直角方向においては、固有周期が短周期化することにより地震力が増大したので、ここでは地震力が変化しないと仮定した上で、AL床版に替えることによる効果を概略的に確認することにした。対象橋梁の周期特性（表-1, 2）から、橋軸直角方向においては1自由度卓越であるといえるため、静的な荷重を作用させて比較検討することにした。作用させる静的な荷重は、橋梁全体に1Gの加速度を作用させた場合の荷重とし、質量を定義した節点に橋軸直角方向に作用させた（図-8）。その解析結果を表-5に示す。この表から、RC床版アーチ橋が支柱や2次部材で塑性化したのに対して、AL床版アーチ橋では弾性範囲となったことがわかる。これから、同じ地震力が作用すれば、AL床版に替えることにより大幅な耐震性の向上が期待できるといえる。

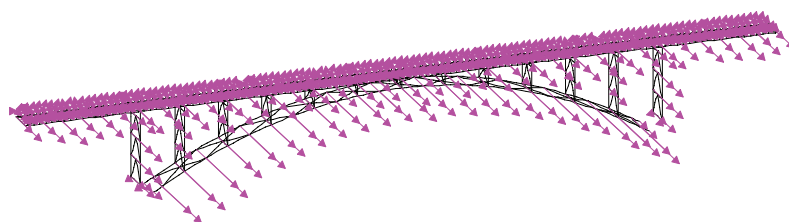


図-8 橋軸直角方向に静的荷重載荷

表-5 モデル橋1の解析結果の比較 ($\varepsilon/\varepsilon_y$)

		RC床版		AL床版	
		引張	圧縮	引張	圧縮
補剛桁	G1	0.44	0.47	0.14	0.27
	G2	0.49	0.25	0.19	0.16
アーチリブ	AR1	0.04	0.99	0.00	0.44
	AR2	0.71	0.43	0.30	0.15
支柱	L	7.78	1.05	0.63	0.28
	R	1.10	10.37	0.30	0.70
横桁		0.98	0.99	0.41	0.41
下支材		2.02	2.04	0.51	0.50
下横構		2.68	7.71	0.52	0.57
水平材		0.91	0.95	0.36	0.38
対傾構		1.00	0.96	0.39	0.38

6. 対象橋梁（モデル橋2）

前述のモデル橋1の検討結果から、橋軸直角方向においてはAL床版に取り替えることによる明確な耐震性の向上が確認できなかったため、AL床版に替えることによる短周期化で地震力が変化しない固有周期を有する比較的短周期の上路式鋼アーチ橋について追加検討を実施した。

ここで対象とするモデル橋2（橋長：110m、アーチ支間長：70m）を図-9に示す。本橋梁も床版はRC床版である。モデル橋1と同様にAL床版に取り替えて比較検討する。

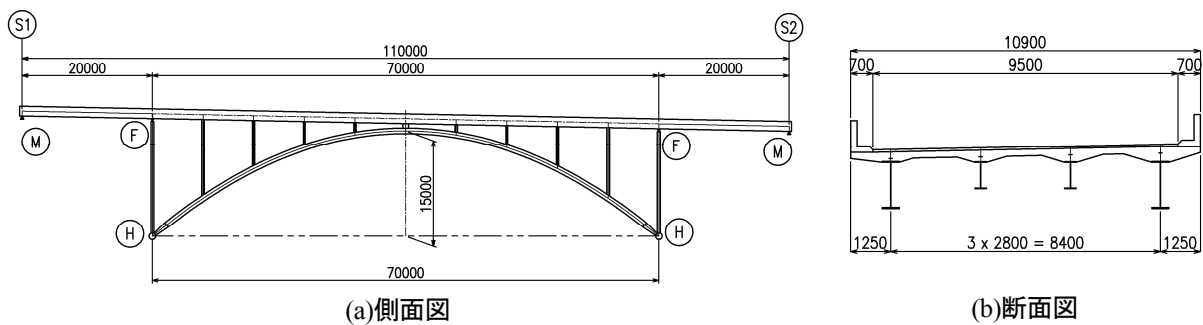


図-9 モデル橋2

7. モデル橋2の地震応答解析結果

(1) 固有周期

モデル橋2の振動特性を把握するため、固有振動解析を実施した。RC床版アーチ橋とAL床版アーチ橋の解析結果をそれぞれ表-6、7に示す。これらの表から、両アーチ橋とも1次と2次の周期の差はあまりないが、RC床版アーチ橋では橋軸方向で2次モード、橋軸直角方向で1次モードであるのに対して、AL床版アーチ橋では1次と2次が入れ替わっていることがわかる。

表-6 RC床版のアーチ橋の周期

モード次数 n	振動数 f Hz	周期 T sec	有効質量比		
			X	Y	Z
1	1.6177	0.6182	0%	20%	0%
2	1.6235	0.6160	8%	0%	0%
3	3.0905	0.3236	0%	0%	7%
4	3.6873	0.2712	15%	0%	0%
5	4.2056	0.2378	0%	0%	5%
6	4.6108	0.2169	0%	1%	0%
7	5.5495	0.1802	0%	0%	0%
8	6.3750	0.1569	0%	0%	0%
9	6.4518	0.1550	0%	0%	0%
10	6.8605	0.1458	0%	0%	0%

表-7 AL床版のアーチ橋の周期

モード次数 n	振動数 f Hz	周期 T sec	有効質量比		
			X	Y	Z
1	2.7534	0.3632	3%	0%	0%
2	2.9023	0.3446	0%	8%	0%
3	5.2954	0.1888	0%	0%	2%
4	5.5726	0.1794	0%	0%	1%
5	6.3211	0.1582	1%	0%	0%
6	6.8633	0.1457	0%	0%	0%
7	6.9866	0.1431	3%	0%	1%
8	7.1087	0.1407	1%	0%	2%
9	7.4198	0.1348	0%	6%	0%
10	8.0781	0.1238	0%	0%	0%

RC床版アーチ橋では橋軸方向で0.616秒，直角方向で0.618秒となっている．AL床版アーチ橋では短周期化され，橋軸方向で0.363秒（RC床版に対して59%に低減），直角方向で0.345秒（RC床版に対して56%に低減）となった．

ここで入力地震動の周期特性との関係を示す．本検討で用いた標準波形の加速動応答スペクトルとRC床版アーチ橋とAL床版アーチ橋の橋軸直角方向の固有周期を合わせて示すと，**図-10**のようになる．この図から，AL床版に替えることにより対象橋梁の固有周期が0.618秒から0.345秒に短くなるが，入力地震動の加速度応答スペクトルの最大2000galに両方とも達していることがわかる．すなわち，AL床版に取り替えても，作用する地震力は変わらないということになる．

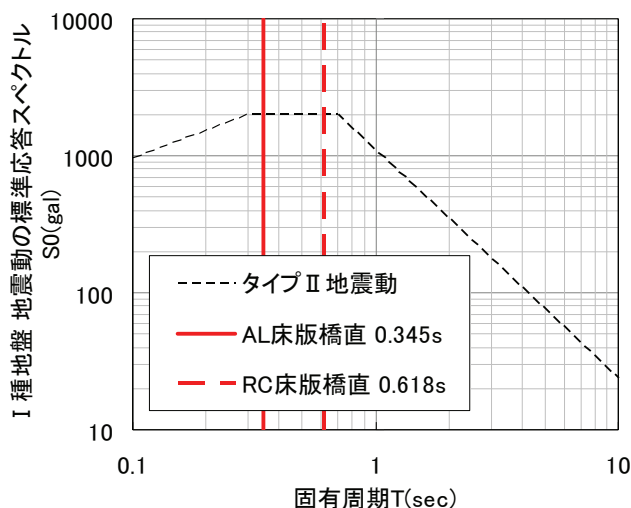


図-10 地震動と対象橋梁の周期の関係

(2) 地震応答解析結果（橋軸直角方向のみ）

前述の**図-10**から，作用する地震力については，RC床版アーチ橋，AL床版アーチ橋ともに同じであることが確認できたので，モデル橋1と同様にモデル橋2の地震応答解析を実施した．橋軸直角方向の地震応答解析結果を**表-8**に示す．この表から，まず，RC床版アーチ橋について，支柱，下横構，対傾構が大きく塑性化しているのがわかる．前述したように固有周期の関係で2000galの加速度の地震力が作用しているため，このように大きく塑性化した．特に，対傾構が約30 ϵ_y にも達している．

これに対して，AL床版アーチ橋では，弾性範囲には収まっていないが，大幅に塑性化は低減しているのがわかる．AL床版アーチ橋のこの程度の塑性化であれば，このままで許容するかまたは多少の他の補強対策（鋼板増厚等）を組合せて弾性範囲内にすることができると考えられる．

表-8 モデル橋1の解析結果の比較 (ϵ / ϵ_y)

		RC床版		AL床版	
		引張	圧縮	引張	圧縮
補剛桁	L	0.94	0.29	0.37	0.11
	R	0.57	0.37	0.29	0.13
アーチリブ	L	0.28	0.88	0.39	0.62
	R	0.50	0.78	0.45	0.57
支柱	L	10.37	13.43	2.01	2.36
	R	7.12	9.70	1.37	1.60
横桁		0.02	0.03	0.01	0.02
アーチ横支材		2.28	2.24	0.41	0.45
上横構		0.13	0.16	0.08	0.07
下横構		24.87	25.29	2.42	6.73
対傾構		18.74	30.54	1.48	2.01

8. まとめ

本研究では、2種類の上路式鋼アーチ橋に対して、オリジナルのRC床版のアーチ橋とAL床版に取り替えたアーチ橋の比較検討を実施した。得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 本検討の2種類の上路式鋼アーチ橋において、RC床版をAL床版に変更することにより短周期化して、RC床版に対して固有周期が約6割になる。
- 2) モデル橋1の橋軸方向については、RC床版からAL床版に変更することにより、塑性化が低減でき耐震性が向上したとえている。これに対して、橋軸直角方向では、AL床版に変更することにより対象橋梁の固有周期が短縮化して、作用させる標準波形の加速度応答スペクトルから地震力が増大し、結果的に塑性化はあまり低減しなかった。
- 3) 橋軸直角方向においては1自由度卓越であるため、1Gの加速度に対応する静的な荷重を作用させる解析を実施した結果、AL床版に取り替えることにより、塑性化していた部材が全て弾性範囲に収まり耐震性が大幅に向上することがわかった。
- 4) 比較的短周期のモデル橋1については、RC床版アーチ橋、AL床版アーチ橋共に、作用させる標準波形の加速度応答スペクトルの最大値に位置しているため、同等な地震力が作用することになる。この同等な条件では、AL床版に替えることにより大幅な耐震性の向上が確認できた。

参考文献

- 1) 宇佐美勉編, (社)日本鋼構造協会: 鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン, 技報堂出版, 2006.9.
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 1998.3.