

RC床版をアルミニウム床版に取り替えることによる 鋼アーチ橋の耐震性向上に関する解析的検討

A numerical investigation on seismic improvement of the steel arch bridges
by exchanging RC deck for aluminum deck

児玉喜秀*, 原田隆典**, 野中哲也***, 宇佐美勉****, 中村真貴*****

Yoshihide Kodama, Takanori Harada, Tetsuya Nonaka, Tsutomu Usami, Masaki Nakamura

* (株)地震工学研究開発センター (〒880-0902 宮崎県宮崎市大淀 3-5-18 南宮崎駅前ビル)

kodama@eerc.co.jp

** 工博, 宮崎大学教授, 工学部社会環境システム工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)

*** 博(工), (株)地震工学研究開発センター (〒880-0902 宮崎県宮崎市大淀 3-5-18 南宮崎駅前ビル)

**** D.Sc. 工博, 名城大学教授, 理工学部社会基盤デザイン工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501)

***** 博(工), 宮崎大学研究員, 工学部社会環境システム工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)

It is common in the current steel arch bridges that the weight of the RC deck occupies more than half of the full weight of upper bridge structures. Therefore, the current steel arch bridges are one of the top heavy structures, and then, the large inertial forces act to the RC deck during an earthquake. In consequence, the arch rib base and an end support, etc. are damaged greatly in many cases if seismic design is insufficient. In this paper, as a seismic improvement of the steel arch bridges, the effect of the weight of the deck by exchanging the current RC deck for the lighter aluminum deck onto the improvement of inelastic behavior of the steel arch bridges is numerically investigated. It is found that the steel arch bridges with the aluminum deck are one of the effective seismic improvements.

Key Words: aluminum deck, steel arch bridge, nonlinear dynamic analysis, seismic improvement

キーワード: アルミニウム床版, 上路式鋼アーチ橋, 非線形動的解析, 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, 履歴型ダンパーや粘性型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。制震構造では, 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次部材等を軸降伏型ダンパー(座屈拘束ブレース等)に置換^{1)~6)}し, 大地震時に許容範囲の損傷をダンパーのみに集中させて, 主構造を健全な状態に収めるというも

のである。置換する2次部材等は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多い。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のが非常に困難な場合もある。また, 震源断層近傍においては, 座屈拘束ブレースのような履歴型ダンパーの設置では耐震性が向上しないという研究成果⁷⁾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。すなわち上部構造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

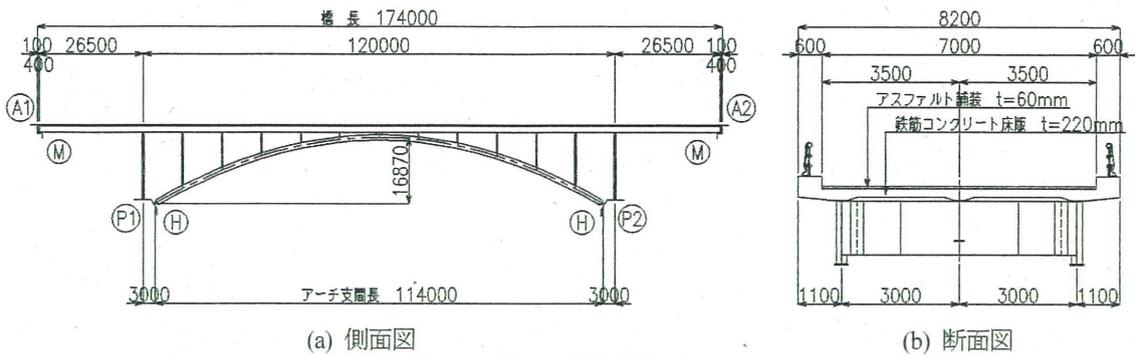


図-1 対象橋梁

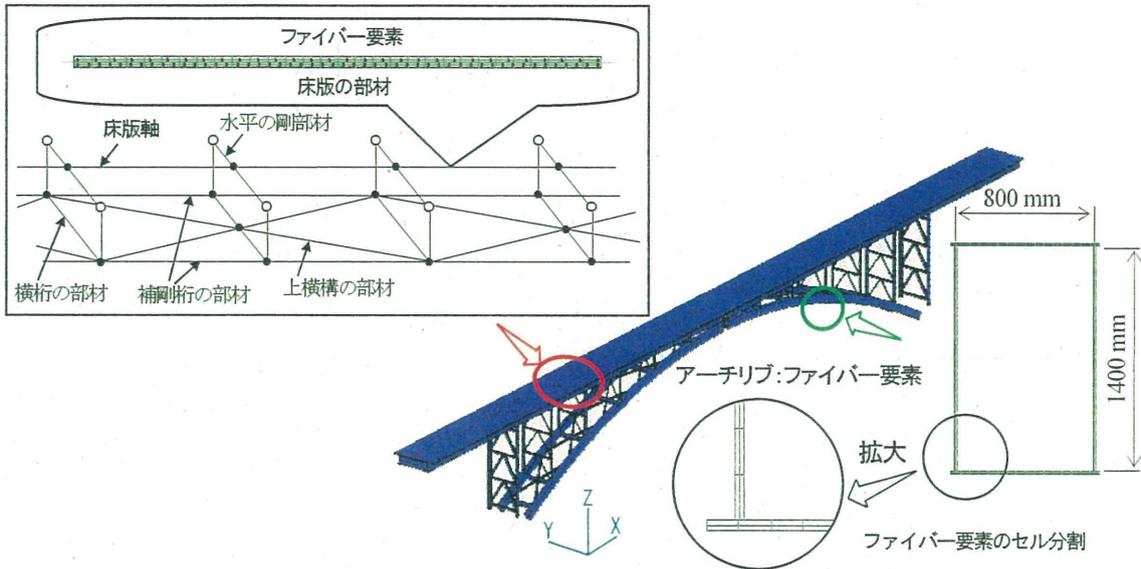


図-2 RC床版アーチ橋の解析モデル

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、一般的な規模の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。アルミニウム床版は、大倉ら⁹⁾¹⁰⁾によって技術開発された道路橋用床版とし、アルミニウム合金の押出形材を摩擦攪拌接合で繋いだもの（後述の図-3）で、RC床版の1/5という軽量さと耐食性に優れるといった特徴がある。また、入力地震動については、道路橋示方書で規定されている波形¹⁰⁾と文献7)により作成した断層永久変位を含む横ずれ断層近傍の波形を用いることにした。

2. 対象橋梁と解析モデル

2.1 対象橋梁

対象橋梁としては、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RC床版の重心位置が、補剛桁上にある橋梁形式であり、道路橋示方書¹⁰⁾において動的挙動が複雑な橋梁に分類される。

2.2 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、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で分割した。なお、支承の破壊や橋台との衝突は考慮していない。

RC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)~3)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。RC床版と補剛桁を結合する部材については、文献1)におけるRC床版のモデル化に従い、スラブアンカーの剛性を考慮したバネ要素とした。

本橋梁の構造的特性から、床版も塑性化する可能性が

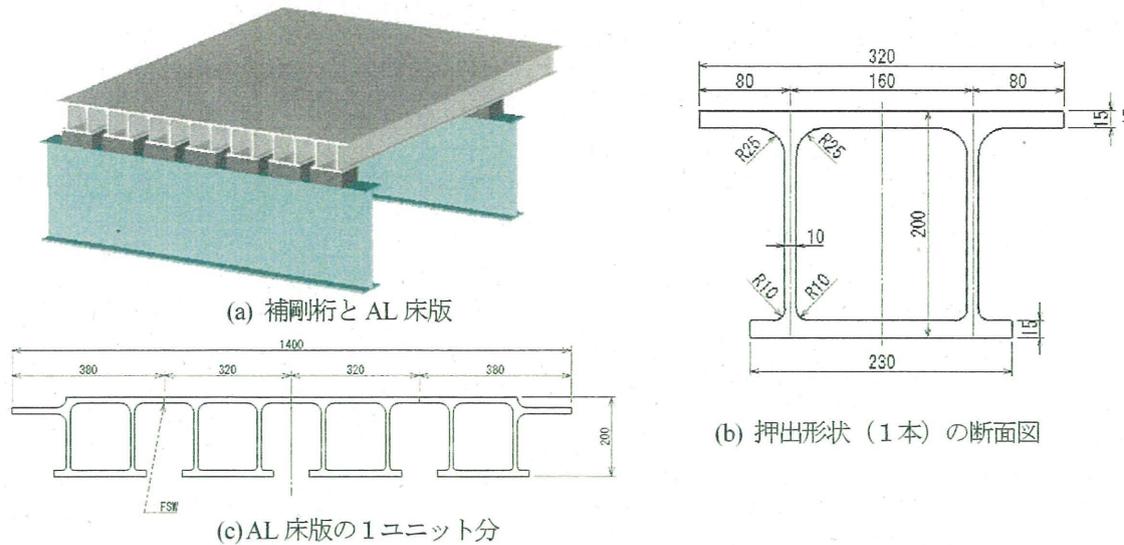


図-3 AL床版の構造^{8),9)}

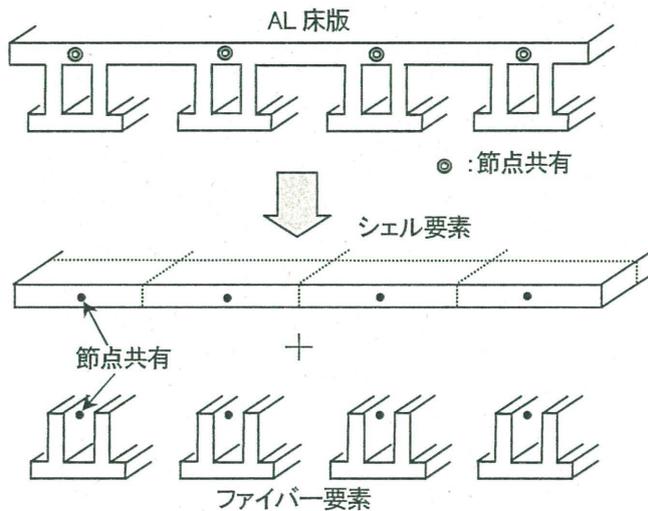


図-4 AL床版のモデル化

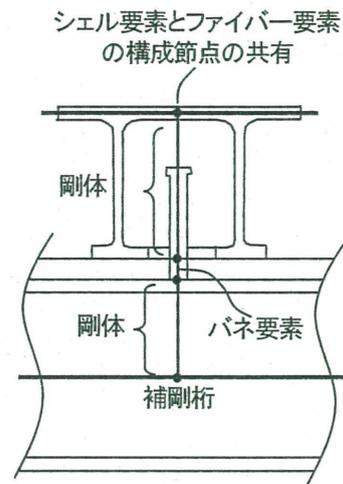


図-5 AL床版と補剛桁のモデル化

あり、ファイバー要素断面の各セル（コンクリートと鉄筋）の材料構成則としては塑性化を考慮した標準的なもの¹⁾を用いる。すなわち、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、道路橋示方書¹⁰⁾で規定されたものを用い、圧縮のみ受け持つとした。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。

2.3 応答解析条件

入力地震動としては、上落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、道路橋示方書¹⁰⁾のI種地盤のタイプIIの標準波形（以下、「標準波形」と呼び）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（ $\beta=1/4$ ）を用い、代表的な2つのモードから

レーリー減衰を設定した。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

3.1 AL床版の構造

検討対象の上落式鋼アーチ橋の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^{8),9)}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。

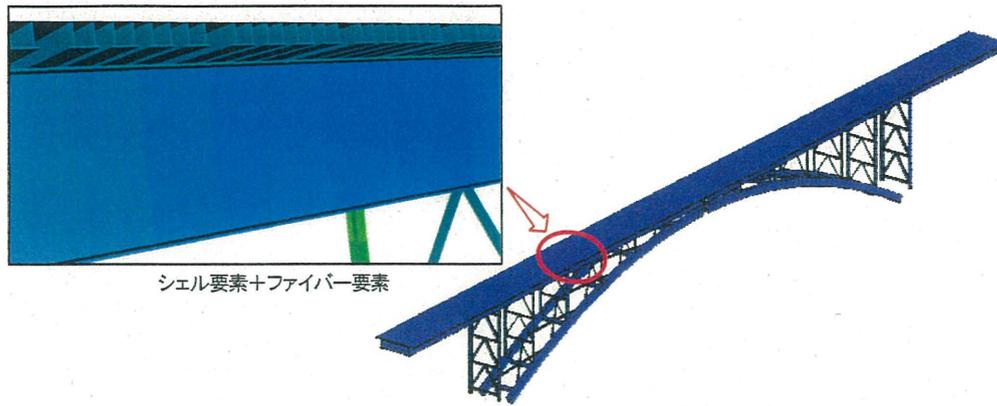


図-6 AL床版アーチ橋の解析モデル

表-1 RC床版アーチ橋の周期

モード次数 <i>n</i>	振動数 <i>f</i>	周期 <i>T</i>	有効質量比		
	Hz	sec	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%

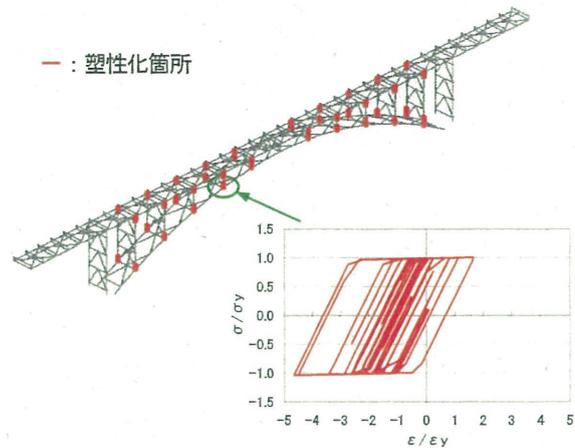
表-2 AL床版アーチ橋の周期

モード次数 <i>n</i>	振動数 <i>f</i>	周期 <i>T</i>	有効質量比		
	Hz	sec	X	Y	Z
1	1.0480	0.9539	19%	0%	0%
2	1.4990	0.6672	0%	67%	0%
3	2.2310	0.4482	0%	0%	1%
4	3.0680	0.3260	0%	0%	0%
5	3.7390	0.2675	13%	0%	0%
6	3.8770	0.2579	0%	0%	56%
7	4.1610	0.2403	0%	0%	0%
8	4.9750	0.2010	25%	0%	0%
9	5.0210	0.1992	0%	18%	0%
10	5.1710	0.1934	0%	0%	2%

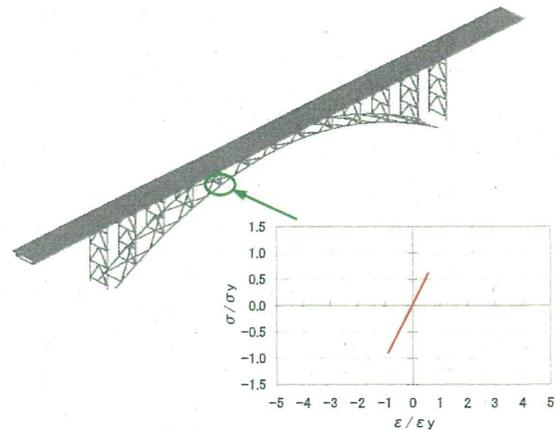
3.2 AL床版のモデル化

上路式鋼アーチ橋のような特殊橋梁の床版に対して、AL床版を使った場合のアーチ橋のモデル化は提案されていない。AL床版の構造上、ファイバー要素だけによるモデル化では橋軸方向と直角方向の剛性を正確に評価することが難しい。そこで、本研究では、シェル要素とファイバー要素を組合せてモデル化を行うことにする。ここで用いたシェル要素は、ファイバー要素と同様に材料非線形性と幾何学的非線形性の両方を考慮した要素である。前述のRC床版と同様にAL床版も塑性化が考慮できるモデル化を行う。

図-3で示したような形状のAL床版に対して、押出形状をシェル要素でモデル化することも考えられたが、全てシェル要素でモデル化すると要素数が膨大になるため、図-4に示すように床版上面に対応する部分をシェル要



(a) RC床版アーチ橋



(b) AL床版アーチ橋

図-7 標準波形による解析結果 (橋軸方向)

素で、それ以外の断面部分 (押出形状の大部分) をファイバー要素でモデル化する。ファイバー要素の構成節点は、シェル要素の構成節点と共有させる。なお、使用した解析ソフトはEERC/Fiber¹¹⁾である。この解析ソフトはファイバー要素の断面定義において、構成節点がせん断中心である必要がなく、閉断面である必要もない。本研究におけるAL床版のモデル化の妥当性を検証するため、

表-3 各部位の橋軸解析結果比較 (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	0.31	0.49
	G2	0.99	0.91	0.31	0.49
アーチリブ	AR1	0.48	0.92	0.15	0.31
	AR2	0.48	0.92	0.15	0.31
支柱	L	3.57	4.63	0.72	0.89
	R	3.57	4.63	0.72	0.89
横桁		0.13	0.10	0.04	0.06
下支材		0.28	0.04	0.08	0.00
下横構		0.13	0.35	0.03	0.11
水平材		0.19	0.24	0.06	0.08
対傾構		0.93	0.98	0.29	0.26

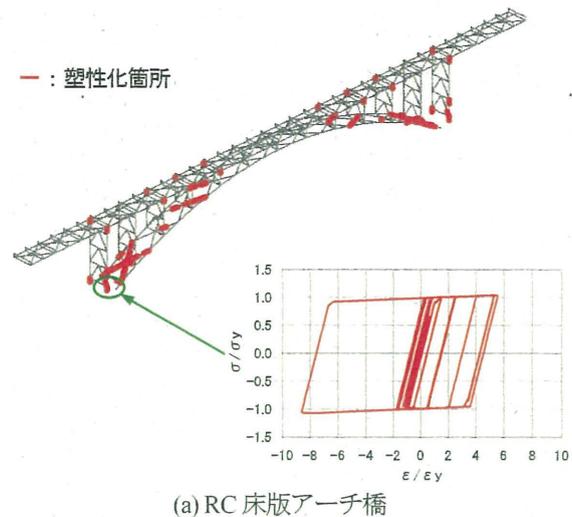
1ユニット分を全てシェル要素でモデル化した場合と比較したところ、ほぼ等しい剛性となることが確認できている。AL床版をこのようにモデル化することによって、シェル要素数は約4000程度にまで減らすことができた。AL床版と補剛桁の接合については、図-5のようにバネ要素で接合されている。このバネ要素は、RC床版撤去からAL床版設置までの架設ステップを考慮するため、AL床版には橋面荷重による応力のみ生じ、アーチ鋼重によって応力が生じないように剛性を変化させている。橋面荷重載荷時のバネ定数は文献1)におけるRC床版のモデル化を参考にして、スラブアンカーをスタッドの剛性に置き換えて設定した。バネ定数の値としては、RC床版のスラブアンカー剛性に比べ、AL床版のスタッド剛性の方がかなり大きくなっている。このようにモデル化した解析モデルを3次元表示させると図-6のようになる。

材料構成則については、本AL床版に採用している6000系アルミニウムが、ひずみ硬化が非常に小さいため、文献12)を参考にしてパイリニアモデルの移動硬化則とし、第2次勾配は $E/250$ とした。なお、ヤング率は $E=69.0\text{GPa}$ 、0.2%耐力は $\sigma_{0.2}=278\text{MPa}$ とした。ヤング率は鋼材の1/3程度、0.2%耐力はSS400材程度の値である13)。

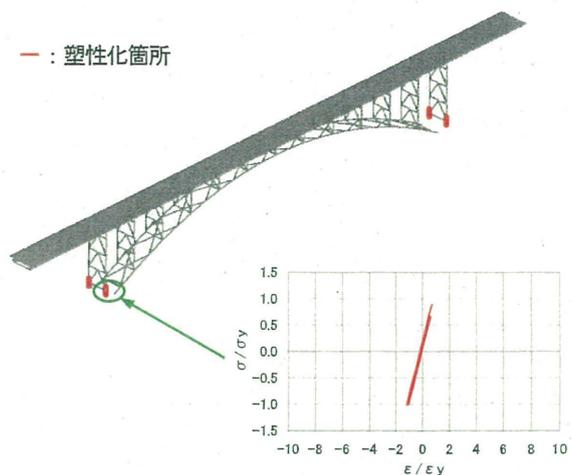
4. 標準波形による地震応答解析

4.1 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。これらの表の有効質量比から橋軸方向は卓越モードが複数あることがわかる。RC床版、AL床版ともに、橋軸方向(X方向)の代表的な逆対称モードが1次、橋軸直角方向(Y方向)の代表的な対称モードが2次となっている。その固有周期としては、RC床版では橋軸方向が1.368秒、直角方向が0.949秒となっている。AL床版では床版重量の軽減により短周期化され、橋軸方向が0.954秒(RC床版に対して69.7%に低減)、直角方向が0.667秒(RC床版に対して70.3%に低減)となった。



(a) RC床版アーチ橋



(b) AL床版アーチ橋

図-8 標準波形による解析結果(橋軸直角方向)

4.2 地震応答解析結果(橋軸方向)

対象橋梁の橋軸方向に対して標準波形を作用させた場合の地震応答解析結果を図-7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床版アーチ橋では弾性範囲になっている。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。(同図(a))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床版アーチ橋では全ての部位で弾性範囲内に抑えることができた。対象橋梁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。

4.3 地震応答解析結果(橋軸直角方向)

対象橋梁の橋軸直角方向に対して標準波形を作用させた場合の地震応答解析結果を図-8に示す。塑性化した

表-4 各部位の直角解析結果比較 (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	0.44	0.49
	G2	0.73	0.66	0.45	0.53
アーチリブ	AR1	0.74	0.91	0.55	0.67
	AR2	0.56	1.11	0.52	0.70
支柱	L	5.89	7.03	1.02	1.07
	R	5.65	8.66	0.99	1.02
横桁		0.96	0.95	0.58	0.59
下支材		2.40	2.43	0.78	0.75
下横構		3.91	10.31	0.86	0.92
水平材		0.88	0.92	0.52	0.54
対傾構		0.96	1.01	0.54	0.53

表-6 各部位の直角静的解析結果比較 (ε/ε_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

表-5 RC床版重量変更による解析結果比較 (ε/ε_y)

		RC床版(重量=1.0)		RC床版(重量=0.2)	
		引張	圧縮	引張	圧縮
補剛桁	G1	0.84	0.63	0.61	0.42
	G2	0.73	0.66	0.56	0.38
アーチリブ	AR1	0.74	0.91	0.75	0.90
	AR2	0.56	1.11	0.73	0.86
支柱	L	5.89	7.03	2.76	5.25
	R	5.65	8.66	4.51	3.14
横桁		0.96	0.95	0.86	0.87
下支材		2.40	2.43	2.00	2.04
下横構		3.91	10.31	3.39	10.33
水平材		0.88	0.92	0.83	0.86
対傾構		0.96	1.01	0.89	0.86

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床版アーチ橋においては端支柱基部近辺がわずかに塑性化している程度である。端支柱の塑性化の程度は、RC床版アーチ橋で約9ε_y(同図(a))、AL床版アーチ橋では降伏点を過ぎた程度(同図(b))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。RC床版アーチ橋においては、主部材の支柱やアーチリブ以外に下支材、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、全て弾性範囲内に抑えることができ、橋軸直角方向においては、支柱がわずかに塑性化する結果となった。ただし、応答自体は大きく低減されているため、橋軸方向と同様に耐震性を向上させることが確認できた。

また、参考までに、RC床版アーチ橋において、床版重量を0.2倍して同様な地震応答解析を実施した。解析モデルは、前述した解析モデルに対して床版の重量だけを0.2倍したものである。その解析結果を前述した結果と比較したものを表-5に示す。この結果から、床版重量をAL床版相当の重量にしても、前述したAL床版の結果(表-4)と一致しないことがわかる。床版の重量だけでなく、AL床版の材料特性と断面剛性による影響が大きいと判断できる。

4.4 静的荷重による橋軸直角方向の検討

ここでは、前述のAL床版による動的解析結果におけ

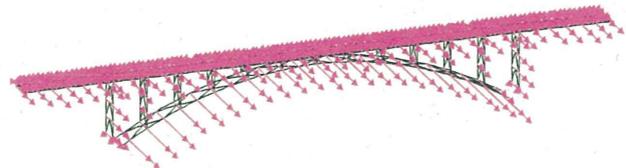


図-9 橋軸直角方向に静的荷重荷

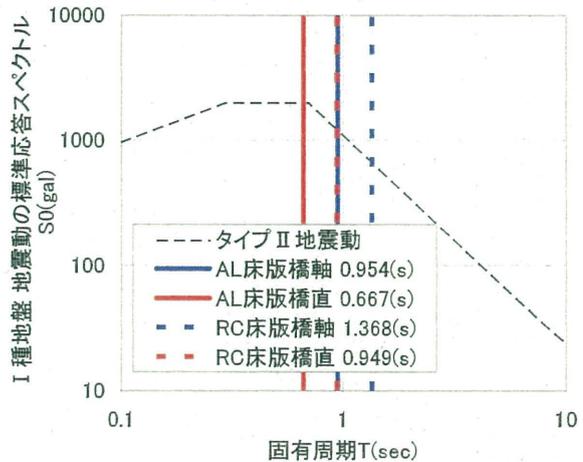


図-10 地震動と対象橋梁の周期の関係

る応答低減効果を確認するため、橋軸直角方向に対して地震力が変化しないと仮定した静的解析を実施した。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。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-9)。その解析結果を表-6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ことが実証された。

しかし、静的解析結果に比べ、動的解析結果の応答値の低減率が低かったため、ここで標準波形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-10に示す。図内にRC床版アーチ橋

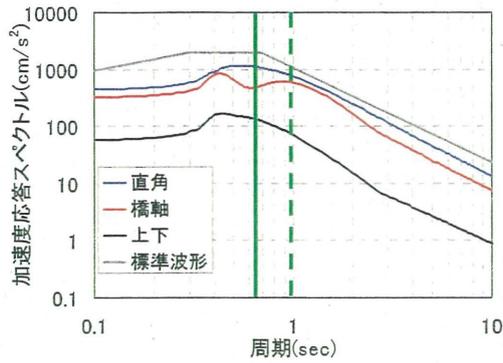


図-11 加速度応答スペクトル (P1)

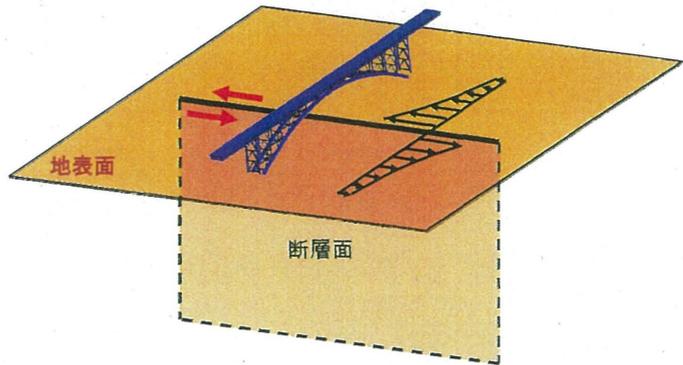


図-12 対象橋梁と断層の位置関係

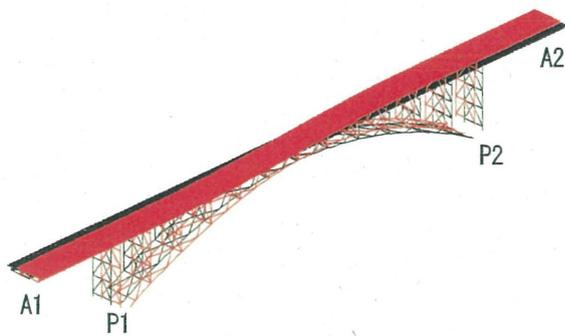


図-13 AL床版の最大変位図
(表示変形倍率 10 倍)

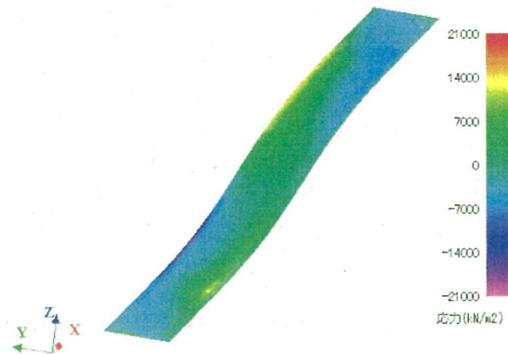


図-14 AL床版の応力コンター図
(AL床版のシェル要素のみ表示)

とAL床版アーチ橋の橋軸方向と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橋軸直角方向の固有周期が0.949秒から0.667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れたが、一方で地震力(加速度)が増加したため、橋軸方向と橋軸直角方向ともに動的解析による応答値の低減効果が小さくなったと考えられる。

5. 断層近傍波形による地震応答解析

5.1 断層近傍波形の作成

本アーチ橋に対して、断層永久変位を含む地震動を作用させた地震応答解析を実施する。この地震動については、運動学的断層モデルと水平成層地盤の剛性行列によって解析的に求められる振動数-波数領域の地震波動場を3重逆フーリエ変換して理論的に断層永久変位を含む地震動変位波形を合成し、この変位波形の振動数領域の微分により入力加速度波形を作成した。このように作成された加速度波形(以下、「断層近傍波形」と呼ぶ)は断層による地盤の永久変位を含むことになる。詳細な作成

方法等については、文献7)を参照されたい。

P1基礎位置における断層近傍波形(橋軸方向、橋軸直角方向、上下方向の3方向)の加速度応答スペクトルを図-11に示す。この図から、橋軸直角方向の加速度が標準波形より小さく、RC床版アーチ橋とAL床版アーチ橋のそれぞれの固有周期(図内の実線がAL床版、破線がRC床版)における加速度応答スペクトルの差は、標準波形よりはやや小さいことがわかる。

地震の規模を、土木学会がレベル2地震として提案している伏在断層の場合の下限値M6.5とした。断層の種類としては、内陸地震の典型的な横ずれ断層とし、断層が地表面に現れる場合を想定する。本橋梁をその断層面に対して垂直にまたぐように配置する(図-12参照)。この断層永久変位を含む入力地震動による解析方法としては、対象橋梁の各基礎の位置で求められ地震動(3成分)を、その位置の基礎下端から多点入力として作用させる。

5.2 地震応答解析結果

(1) 変形状態

本アーチ橋に対して、断層永久変位を含む断層近傍波形を作用させた場合の地震応答解析結果の最大変位図を、AL床版アーチ橋を例にして図-13に示す。この図からわかるように、横ずれ断層永久変位により対象橋梁が平

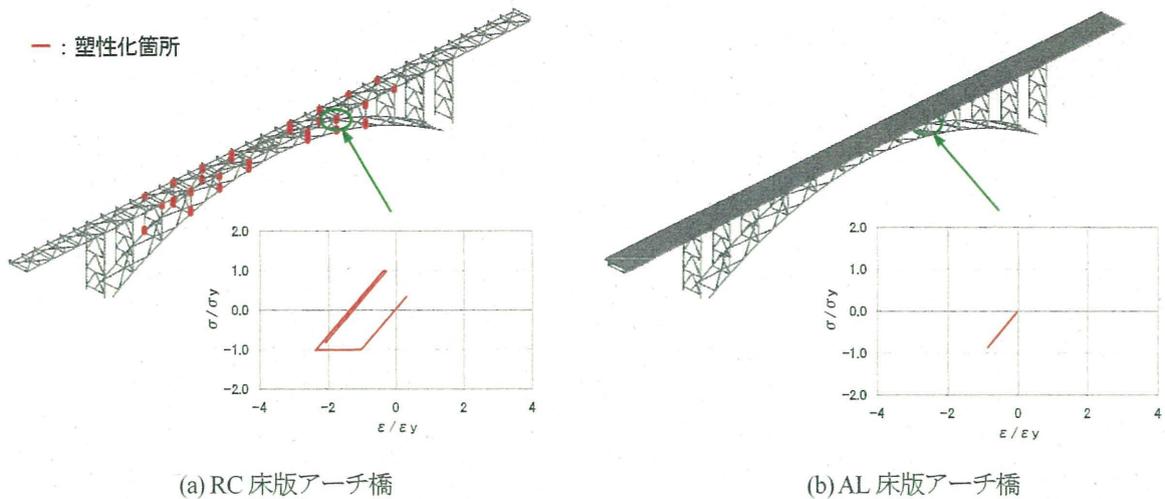


図-15 断層近傍波形による地震応答解析結果

表-7 各部位の解析結果比較 (ϵ/ϵ_y)

		RC床版		AL床版	
		引張	圧縮	引張	圧縮
補剛桁	G1	0.69	0.72	0.39	0.55
	G2	0.76	0.62	0.39	0.37
アーチリブ	AR1	0.37	0.71	0.37	0.50
	AR2	0.37	0.75	0.39	0.52
支柱	L	1.61	2.47	0.66	0.79
	R	1.75	2.36	0.76	0.84
横桁		0.32	0.32	0.25	0.26
下支材		0.55	0.48	0.38	0.35
下横構		0.57	0.72	0.47	0.53
水平材		0.31	0.40	0.26	0.27
対傾構		0.75	0.65	0.44	0.38

面的にS字型に変形した上に、地震時慣性力の影響を受けていることになる。地表面のP1基礎とP2基礎の相対変位は、約70cmであった。最大変形時のAL床版の主応力のコンターを図-14に示す。この図から、AL床版がS字型に変形することによって、応力分布がその形に変化していることがわかる。

このように変形しても、スタッドでしっかり固定され鋼材に比べ柔らかい(ヤング率が小さい)ため、AL床版が補剛桁にうまく追随していると思われる。なお、本RC床版アーチ橋においては、スラブアンカーの剛性を考慮したバネ要素でモデル化しているため、RC床版と補剛桁間のずれが確認される。

AL床版の発生応力値については、降伏応力に対して約1/10程度であり、AL床版は塑性化しない結果となった。後述する補剛桁の応答値(ひずみ)より低いのは、AL床版のヤング率が補剛桁の鋼材より約1/3と小さいことも要因と考えられる。

(2) 解析結果の比較

対象橋梁の塑性化状態を図-15に示す。RC床版アーチ橋の方が多くの支柱が塑性化しているのに対して、AL床版アーチ橋では塑性化せず、全て弾性範囲となった。断層近傍波形の場合は、慣性力だけでなく断層変位(変

形)も作用させたことになる。両アーチ橋にも、同じ断層変位が作用するが、質量が重い分だけRC床版アーチ橋の慣性力が大きくなって、支柱が塑性化する結果となった。標準波形ではAL床版アーチ橋が短周期となり地震力が増大したが、断層近傍波形ではその影響は小さかったといえる(図-11参照)。

RC床版アーチ橋の支柱の塑性化位置は、前述した標準波形の場合の端支柱(図-8参照)と異なり、端部よりアーチ中央である。また、RC床版アーチ橋の支柱の応力-ひずみ関係においては、履歴ループを描かないため、座屈拘束ブレース(軸降伏型ダンパー)を設置しても片効き状態となり履歴エネルギー吸収が期待できないと思われる。

各部位に対して、塑性化の状況を整理すると、表-7のようになる。RC床版アーチ橋において、支柱が塑性化しているのがわかる。AL床版アーチ橋でも応力が大きい部位は支柱であるが、弾性範囲である。

以上から、断層近傍波形においては、AL床版に取り替えることにより、橋軸直角方向で耐震性が向上することが確認できた。

6. まとめ

本研究では、上路式鋼アーチ橋に対して2種類の入力地震動により、既存の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) AL床版の押出形状を考慮した合理的なモデル化の方法を提案した。本検討ではAL床版は塑性化しなかったが、妥当性のある結果を導き出すことができるモデルとなっている。
- 2) 本検討の上路式鋼アーチ橋において、RC床版をA

L床版に変更することにより短周期化して、RC床版アーチ橋に対してAL床版アーチ橋の固有周期が約70%になった。

- 3) RC床版からAL床版に変更することにより、橋軸方向においては、全て弾性範囲内に抑えることができ、橋軸直角方向においては、支柱がわずかに塑性化する結果となった。橋軸方向と橋軸直角方向ともに応答値が低減され耐震性が向上したとえいる。
- 4) 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一方向載荷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確認できた。橋軸方向と橋軸直角方向ともにAL床版に変更することにより対象橋梁の固有周期が短くなり、その結果、作用させる標準波形の加速度応答スペクトルの性質から地震力が増大し、結果的に応答値の低減率が小さくなったといえる。
- 5) 加速度（慣性力）と断層変位の両方が作用する断層近傍波形においては、RC床版アーチ橋が塑性化するのに対してAL床版アーチ橋が慣性力低減により全て弾性範囲となり、AL床版に取り替える効果は確認できた。
- 6) 以上より、RC床版をAL床版に置き換えることにより、アーチ橋の耐震性は一般的に向上するが、その効果の程度はアーチ橋の構造的特性ならびに作用地震動の周期特性に依存することが分かる。

謝辞

土木学会・鋼構造委員会・アルミニウム合金材の鋼橋への適用検討小委員会（委員長：大阪大学大学院大倉一郎准教授）の委員の方々から貴重なご教示を得た。ここに記して謝意を表します。

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。

- 2) (社)日本鋼構造協会：土木鋼構造物の動的耐震性能照査法と耐震性向上策、2003。
- 3) (社)日本鋼構造協会：鋼橋の耐震設計の信頼性と耐震性能の向上、2009。
- 4) 森下邦宏、井上幸一、川島一彦、阿比留久徳、平井潤、本田誠：ダンパーブレースを組み込んだ上路アーチ橋部分構造の動的地震応答実験、土木学会論文集、No.766/1-68, pp.277-290, 2004。
- 5) 葛漢彬、日沖堅治、宇佐美勉：鋼アーチ橋に設置した座屈拘束ブレースの応答値、土木学会地震工学論文集、2005。
- 6) 本荘清司、横山和昭、前原直樹、田崎賢治、川神雅秀：鋼上路式アーチ橋の耐震補強設計に関する検討、構造工学論文集、Vol.55A, pp.515-524, 2009。
- 7) 児玉喜秀、原田隆典、野中哲也、中村真貴、宇佐美勉：震源断層近傍における鋼アーチ橋の応答特性と耐震補強法、構造工学論文集、Vol.58A, pp.436-447, 2012。
- 8) (社)日本アルミニウム協会、土木構造物委員会：道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋 設計・製作・施工ガイドライン、2011。
- 9) 大倉一郎、長尾隆史：道路橋用アルミニウム床版を用いた鋼桁橋 設計・製作・施工ガイドライン、アルミニウム合金材の土木構造物への活用に関するシンポジウム、土木学会・鋼構造委員会、pp.97-111, 2012。
- 10) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、丸善、2012。
- 11) 野中哲也、吉野廣一：パソコンで解くファイバーモデルによる弾塑性有限変位解析、丸善、2010。
- 12) 倉田正志、宇佐美勉：3種類の構造用アルミニウム合金の繰返し弾塑性構成則の開発とBRBの挙動解析への適用、構造工学論文集、Vol.57A, pp.579-591, 2011。
- 13) 大倉一郎、萩澤亘保、花崎昌幸：アルミニウム構造学入門、東洋書店、2006。

(2013年9月25日受付)