

合成アーチ橋の初期断面力を評価した動的解析手法に関する一考察

A study on the dynamic analysis method for the composite arch bridge in consideration of initial member forces

山花豊*, 大塚久哲**, 谷野洋一***, 布下浩 ***

Yutaka Yamahana, Hisanori Otsuka, Yoichi Tanino, Hiroshi Nunoshita

* (株) 銭高組 土木本部技術部 (〒163-1024 東京都新宿区西新宿 3-7-1)
(九州大学大学院工学府 建設システム工学専攻 博士後期課程)

** 工博 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門 教授 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

*** (株) 銭高組 土木本部技術部 (〒163-1024 東京都新宿区西新宿 3-7-1)

Many concrete arch bridges have been constructed by concrete lapping method with pre-erected composite arch. Member forces of the arch rib are changed by the effect of creep and shrinkage of the concrete. Especially, the axial force of the lapping concrete member is largely reduced. It is danger that the arch rib is designed without proper estimation of the initial axial force in the dynamic analysis. The authors studied on the dynamic analysis method of the composite arch rib with taking into consideration of the initial axial force. The study proved the method could be available for the dynamic analysis of the member, which has the different axial stress in the same section.

Key Words: composite arch, seismic design, nonlinear dynamic analysis, creep, shrinkage

キーワード: 合成アーチ, 耐震設計法, 非線形動的解析, クリープ, 乾燥収縮

1. はじめに

コンクリートアーチ橋の架設工法には固定支保工架設工法をはじめとして, その規模, 架設条件によって数種の工法が挙げられる。その中でも適用アーチスパン 50m~150m の架設工法として, 鋼管アーチを先行架設し, 鋼管内にコンクリートを充填した後, スプリング部から順次巻き立ててアーチリブを完成させる合成アーチ巻き立て工法の実施例が増えてきている。これまで同工法においては, 合成効果による耐荷力の増加や曲げ変形能力を設計上定量的に評価できないことから, 鋼管部材は架設部材として扱われ完成系部材には考慮されていない¹⁾。

筆者らは, より合理的な合成アーチ橋の設計を目指し, コンク

リートのクリープ・乾燥収縮の影響も含めた断面力算出・部材検討の一手法を提案し, 合成アーチ部材断面の断面力 (特に軸力) 分布を正しく評価しなければ危険側の設計となることを示している²⁾。さらに, 完成系部材に鋼管アーチを評価することで耐震性・経済性の向上が図れることも示している³⁾。

本稿では, アーチ部材断面の断面力分布を初期断面力として考慮した合成アーチ橋の動的解析手法を提案し, それに基づいた合成アーチ橋に関して行った非線形動的解析結果について述べる。

2. 検討概要及び検討モデル

2.1 検討モデル

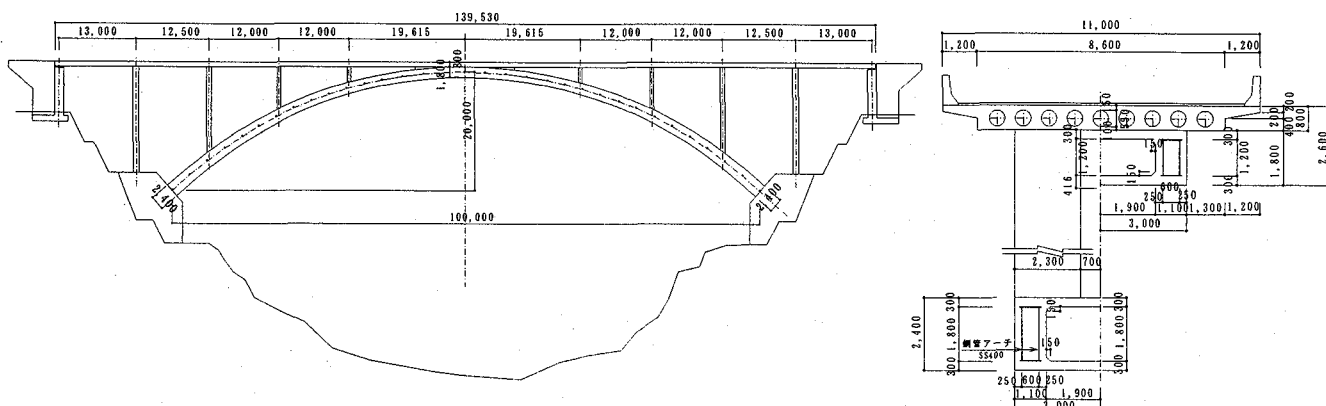


図-1 一般図(アーチスパン 100m:単位 mm)

検討対象は、図-1に示すアーチスパン長 100m の上路式コンクリートアーチ橋で、アーチリブはコンクリート充填鋼管アーチ部材をRC巻き立てした部材とし、補剛桁はRC中空床版とする。鋼管アーチ部材は、フランジ厚 $t=16\text{mm}$ 、ウェブ厚 $t=12\text{mm}$ とした。使用材料、材料強度を表-1に、部材断面諸元を表-2に示す。

アーチ部材の初期断面力は、図-2に示す同一節点を有する重複部材からなる平面フレームモデルにて、

表-1 使用材料、材料強度

材料及び強度	単位重量 kN/m^3	ヤング係数 kN/m^2
SD345	77.0	2.0×10^8
SS400	77.0	2.0×10^8
$\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$	24.5	3.1×10^7
$\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$		2.8×10^8

施工順序、クリープ・乾燥収縮の影響を考慮して算出した。この重複(2本軸)部材モデルは、アーチリブ部材をコンクリート充填鋼管部材とRC巻き立て部材に分けたが、同一節点を有するもので、RC巻き立て部材のクリープ・乾燥

表-2 部材断面諸元

		断面積 m^2	I_y m^4
スプリング部	鋼管	0.1770	0.0787
	充填コンクリート	1.9698	0.4938
	巻立コンクリート	5.4098	4.3721
クラウン部	鋼管	0.1400	0.0312
	充填コンクリート	1.3138	0.1464
	巻立コンクリート	4.8368	2.1929
エンドポスト		7.0000	0.5833
鉛直材	$t=0.8\text{m}$	3.6800	0.1963
	$t=0.6\text{m}$	2.7600	0.0828
補剛桁		5.4618	0.3651

収縮の影響を評価できるモデルである²⁾。なお、充填鋼管部材はほぼ密閉された構造であるためクリープ・乾燥収縮しない部材として取り扱っている。また、充填鋼管アーチは、スプリング部では一般的にはヒンジ構造とされているが、本研究では剛結構造とし耐震設計上同部材を構造部材として見なしている。

図-3に、アーチリブスプリング部における施工段階からクリープ終了時までの軸力の推移を示す。充填コンクリート打設時に鋼管部材に大きな軸力が発生し、施工段階を追って充填鋼管部材、RC巻き立て部材ともに軸力が増加している。橋面工完成后、クリープ・乾燥収縮の影響で巻立てコンクリート部材の断面力(特に軸力)が充填鋼管部材に移行している。RC巻き立て部材では軸力が耐力に及ばず影響が大きいことと、アーチリブの破壊・損傷判定は周囲部材であるRC巻き立て部材で行われることから、RC断面検討を行う場合は、RC巻き立て部材と充填鋼管部材に分けて行うことが望ましいと考える。

図-4に全死荷重時のアーチリブの断面力を示す。ここでは、クリープ・乾燥収縮の影響を考慮しない場合を左側、考慮する場合を右側に表している。充填鋼管部材の他に主鉄筋の拘束の影響も考慮して算出したもので、主鉄筋の拘束を考慮しない場合に比べ断面力移行量は小さくなっているものの、無視できない値であることが分かる。このことは耐震設計においても同様で、初期断面力、特に初期軸力を正しく評価して解析を行う必要がある。

2.2 検討概要

まず、L1地震時に対する検討を実施し、アーチリブを全断面

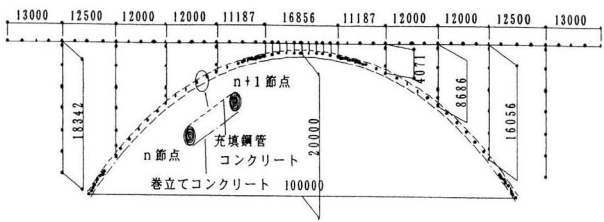


図-2 フレーム解析モデル

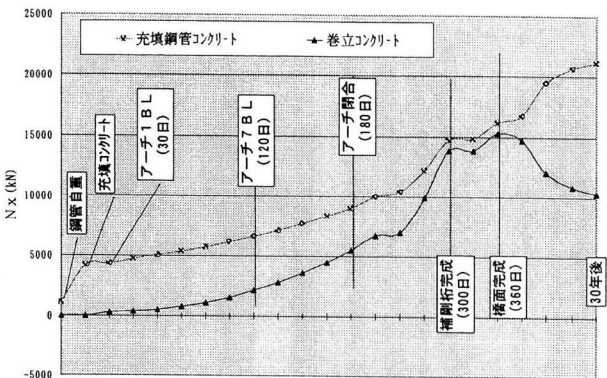


図-3 スプリング部軸力推移

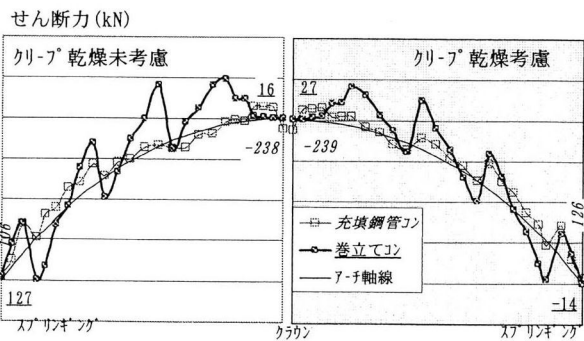
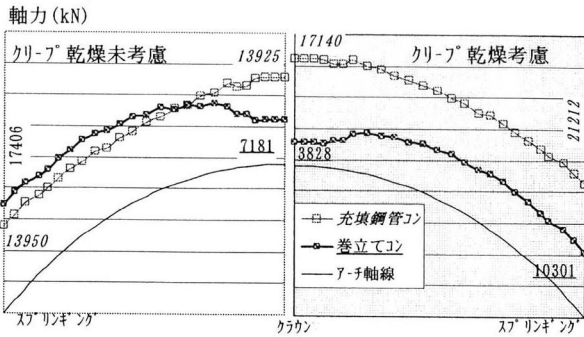
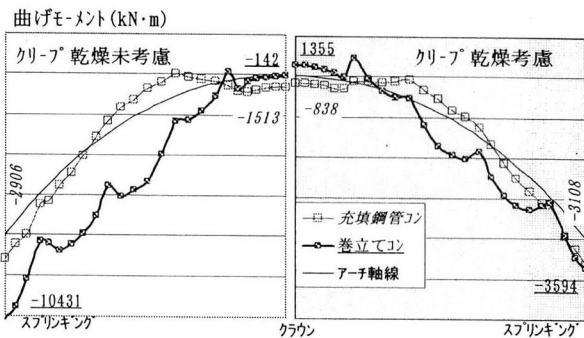


図-4 アーチリブ死荷重時断面力

表-3 解析モデル

モデル名	アーチリブ部材	鉛直材・補剛桁	備 考
1 1本軸 M-φモデル	1本の梁部材 (軸力変動考慮)	1本の梁部材 (軸力変動非考慮)	クリープ解析の結果をもとに得られた全 死荷重断面力として入力
2 2本軸 M-φモデル①	同一節点を有する2本の 梁部材 (軸力変動考慮)	1本の梁部材 (軸力変動非考慮)	同 上
3 2本軸 M-φモデル②	同 上	1本の梁部材 (軸力変動非考慮)	アーチリブスプリング部全死荷重 時の軸力に近づけて初期断面力とした
4 2本軸 ファイバーモデル	同一節点を有する2本の ファイバー部材	1本の梁部材 (軸力変動非考慮)	同 上

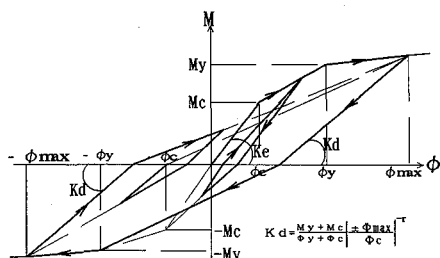


図-5 復元力特性 (武田モデル)

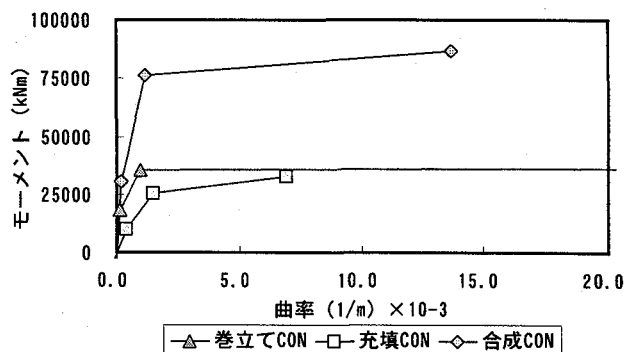


図-7 スケルトンカーブ

2軸M-φモデル: スプリング部

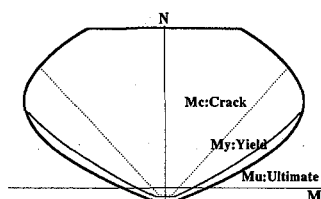


図-6 M-N相関曲線

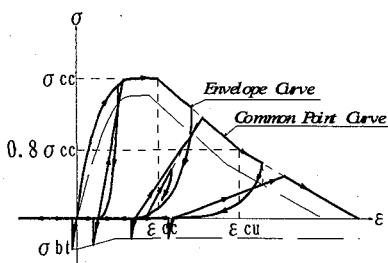


図-8 コンクリートの応力歪み曲線

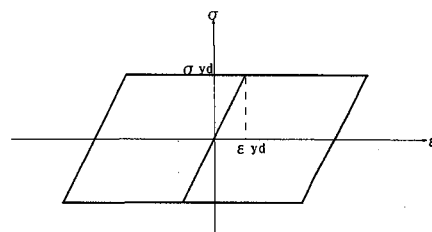


図-9 鉄筋、鋼板の応力歪み履歴

で設計する場合と2部材に分けて設計する場合の比較を行う。次に、本研究で提案する2本軸部材(重複部材)モデルと、一般的な1本軸部材モデルにより非線形動的解析を実施し、比較・考察を行う。2本軸部材モデルは、初期断面力を正しく評価でき、計算時間も短くて済むM-φモデルと、ファイバーモデルについて非線形動的解析を実施し、2本軸部材モデルの妥当性を検証する。ただし、現在の動的解析プログラムにおいては、ファイバーモデルの場合、コンクリートアーチ橋の様にクリープ・乾燥収縮の影響を受け2次的に変化した断面力を含む初期断面力状態を正確に作り出すことが出来ないため、スプリング部の軸力調整を行った自重解析による初期断面力を用いる。2本軸部材M-φモデルについても同じ初期断面力を用いたものと比較する。

2.3 解析モデル

解析モデルの一覧を表-3に示す。解析モデルはアーチリブ部材断面内での軸力分布の違いを反映させるために、図-2と同様にアーチリブ部材を梁要素からなる2本軸部材M-φモデル(2次元モデル)と、2本軸部材ファイバーモデルの2つのモデルを提案し、それらに加え比較検討のため1本軸部材M-φモデルについても解析を行う。

アーチリブ梁要素部材の復元力特性としては、軸力変動型のM-φモデル(図-5, 6:ディグレーディングトリリニア型の武田モデル)を用いるものとする。本検討では、鉛直材、補剛桁の復元力特性は軸力一定型の武田モデルを使用する。また、スプリング部での部材のスケルトンカーブを図-7に示す。

ファイバーモデルは、アーチリブを2本のファイバー部材(RC巻立て部材とコンクリート充填鋼管部材)に分けて同一節点で結んだもので、鉛直材、補剛桁は2本軸部材M-φモデルと同様に、軸力一定型の1本軸M-φ梁モデル(武田モデル)としている。ファイバー部材は、断面内のコンクリート、鉄筋および鋼管を構成要素に分割し、各微小要素毎に応力-ひずみ関係による非線形特性を設定し、断面内の応力分布から断面力を求める。各部材の応力歪み関係は、コンクリート($\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$)は拘束筋による拘束効果のある応力-歪み曲線(図-8)を用い、鋼管(SS400)、主鉄筋(SD345)は図-9に示す応力-ひずみ曲線を用いた。図-10にファイバー要素分割を示す。

拘束条件は、アーチリブスプリング部は完全固定、補剛桁は端部でピンローラ、鉛直材の補剛桁部との接合はピン結合とし、減衰常数は補剛桁を0.03、アーチ部材、鉛直材を0.02とした。

また、入力地震動はⅠ種地盤におけるタイプⅡ地震動（神戸海洋気象台観測波 T2-1-1：最大加速度812gal）を用い、解析時間は20秒間とした。解析プログラムはTDAPⅢを使用した。

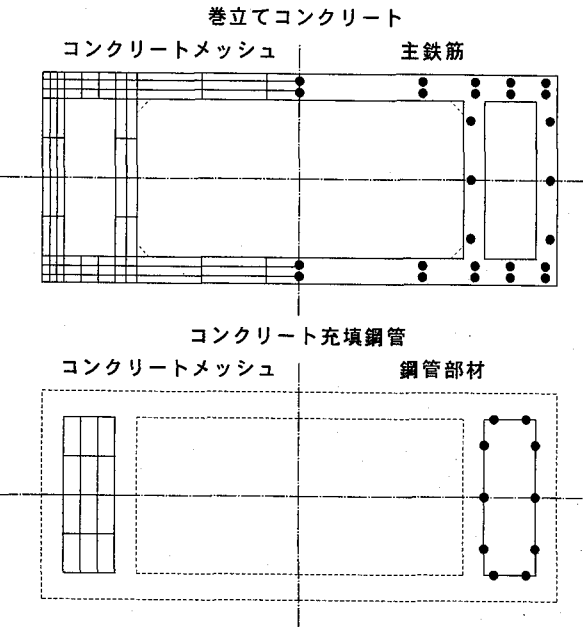


図-10 ファイバー要素分割

3. L1地震時の検討

L1地震時(橋軸方向 kh=0.2)の断面力を表-4に示す。それに対するRC断面検討の結果を表-5に示す。同表からは、i) 全断面で設計する場合に比べ、ii) 2部材に分けて設計する場合の鉄筋量が約2倍近い値となり、クリープ乾燥収縮によりRC巻立て部材の軸力が軽減された影響が顕著に表れている。また、コンクリート充填鋼管については、同様の影響により軸力が卓越するため、鋼管の上フランジ側に若干の引張応力が発生する程度で全く問題ない。

このように、鋼管がある場合は曲げモーメントを低減するなど合成部材に有利に働く反面、巻立て部のコンクリートの軸力が減少するため、設計上留意すべき点と考える。

表-4 L1地震時断面力 (スプリング)

	断面力	単位	充填鋼管	巻立て部材	合計
全死荷重時 (クリップ終了時)	M	kN・m	-3108	-3594	-6702
	N	kN	21212	10301	31513
面内地震 Kh=0.2	M	kN・m	-5255	-22931	-28186
	N	kN	-1686	-2935	-4621
設計断面力	M	kN・m	-8363	-26525	-34888
	N	kN	19526	7366	26892

表-5 L1地震時RC断面検討 (スプリング)

		鉄筋量 (cm ²)	σ_s (N/mm ²)	σ_c (N/mm ²)
i)	全断面	D16@150 D16@150	158.88	287.5
			13.9	
ii)	巻立て	D25@150 D22@150	357.52	259.9
			8.1	
	充填鋼管	鋼管フランジ	-	9.3
		鋼管フランジ	-	-96.3

σ_s : +引張り σ_c : +圧縮

なお、巻立て部材の鉄筋量は架設時断面力により決定されているもので、L1地震に対しては若干余裕を残す状態であるといえる。

4. 非線形動的解析結果 (L2地震時)

4.1 固有値解析結果

図-11に1軸部材M-φモデルの固有モード図を示す。2軸部材M-φモデル、ファイバーモデルも同様な結果となっており、初期モデルが妥当であることが分かる。表-6に固有値を示す。一次モードは、橋軸方向、2次モードは橋軸直角方向が卓越している。

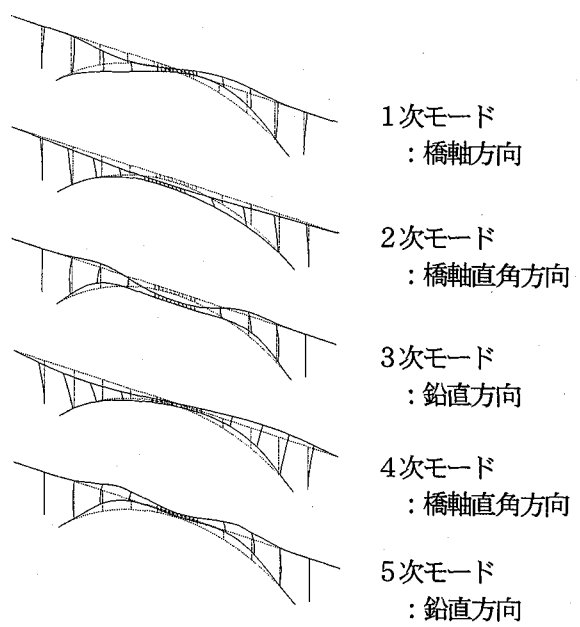


図-11 固有モード図 (1軸M-φモデル)

表-6 固有値

次数	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	累積有効質量比 (%)		
			橋軸	直角	鉛直
1	1.419	0.705	31		
2	1.546	0.647	31	67	
3	3.004	0.333	31	67	2
4	3.740	0.267	31	67	2
5	4.825	0.207	31	67	52

4.2 橋軸方向解析結果

(1) 初期断面力の取り扱いについて
2軸M-φモデルの初期断面力は、クリープ・乾燥収縮の影響を考慮した2軸部材モデルでの解析結果より得られた部材断面力をそれぞれの部材の初期値としている。1軸M-φモデルの初期断面力は、全断面での断面力(前述2部材の断面力を合計したもの)を用いる。
ファイバーモデルでの初期断面力は、プログラム上、M-φモ

デルのように断面力を入力できないため、アーチリブを2部材としたファイバーモデルでの自重解析時に軸力調整を行って、軸力状態をクリープ解析で算出した初期値にあわせたものである。

(2) 応答加速度

図-12にファイバーモデルでの入力加速度（スプリング部）とクラウン部での時刻歴応答加速度を示す。入力加速度最大812gal に対して、クラウン部で最大550gal 程度の応答値となっている。

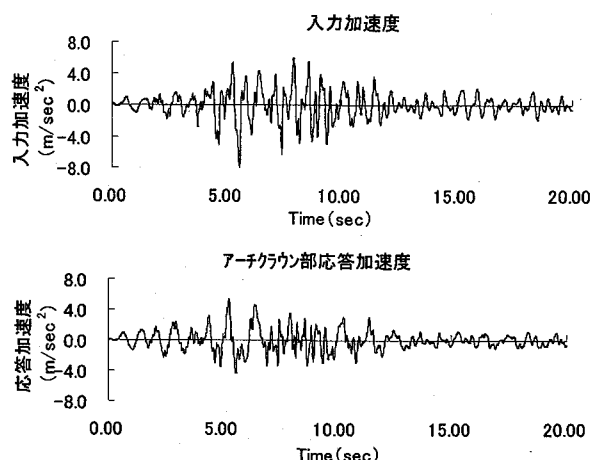


図-12 時刻歴応答加速度：ファイバーモデル（クラウン部）

(3) 応答変位

図-13にファイバーモデルでのクラウン部における時刻歴応答変位を示す。橋軸方向に最大9.7cm 変位していることが分かる。

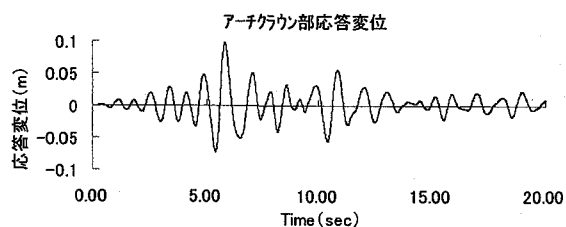


図-13 時刻歴応答変位：ファイバーモデル（クラウン部）

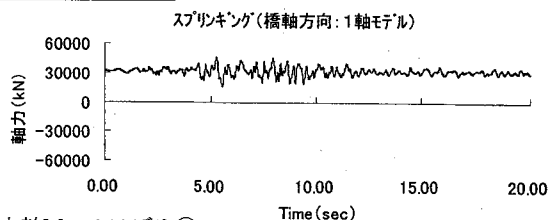
(4) 応答軸力

初期軸力として、コンクリート充填鋼管部材 21200kN、RC巻立て部材 10300kN、全断面で 31500kN としており、図-14の時刻歴応答軸力図を見ると、2本軸ファイバーモデル、2本軸M-φモデル②も同等の初期値を示していることが分かる。その後の応答値は、1本軸、2本軸のM-φモデルは、合計値で約20000kN～45000kNの幅で変動しているが、ファイバーモデルでは約14000～53000kNの幅で変動しており変動幅が大きくなっている。一般に、ファイバーモデルにおいては、引張域に入ったコンクリート要素は、以後、引張を受けるステップにおいて無効となるため中立軸の変動が生じ、過大な軸力が発生することが知られている。本解析でも同様に、解析処理上の問題に起因し、幅広く軸力が変動しているものと思われる。

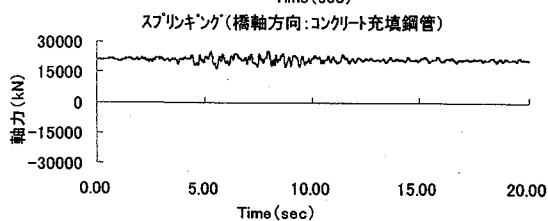
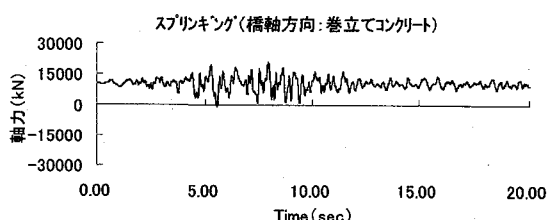
2本軸M-φモデルでは、コンクリート充填鋼管部材の断面積

がRC巻立て部材に比べ小さいため軸力伝達比率が小さく、変動幅も狭くなっている。

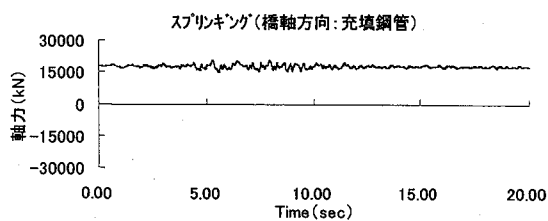
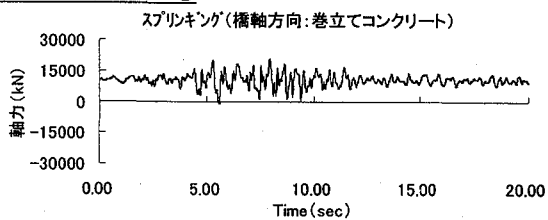
1 本軸M-φモデル



2 本軸M-φモデル①



2 本軸M-φモデル②



2 本軸ファイバーモデル

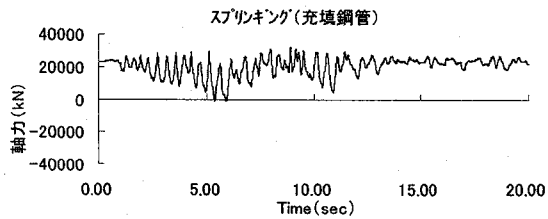
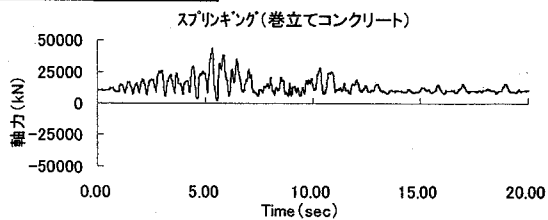
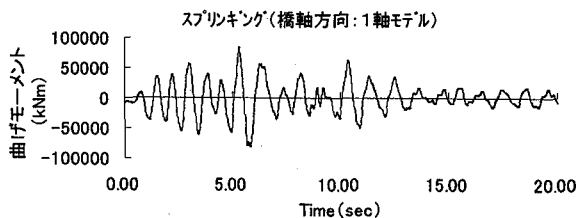


図-14 時刻歴応答軸力図

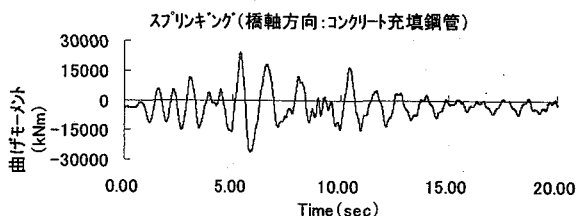
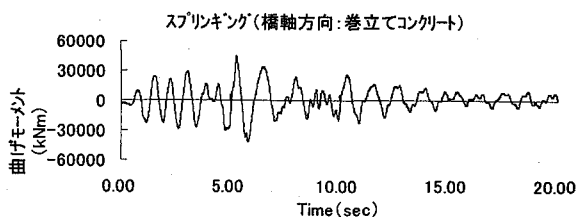
(5) 応答曲げモーメント

図-15の各モデルの時刻歴応答曲げモーメント図を見ると、2本軸M-φモデルと2本軸ファイバーモデルで最大応答値に差があることが分かる。すなわち、1本軸M

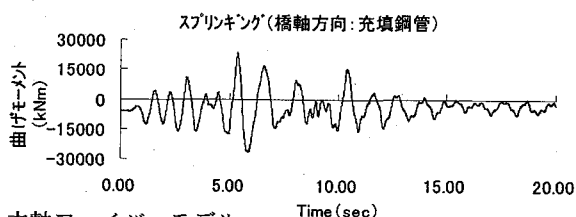
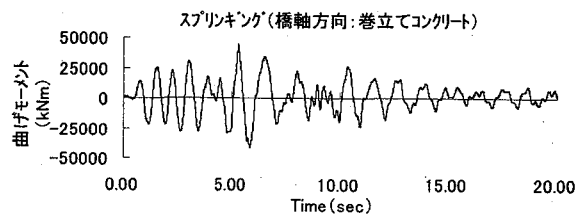
1本軸M-φモデル



2本軸M-φモデル①



2本軸M-φモデル②



2本軸ファイバーモデル

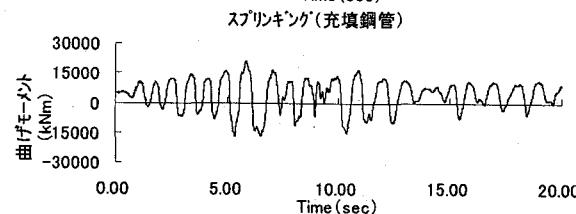
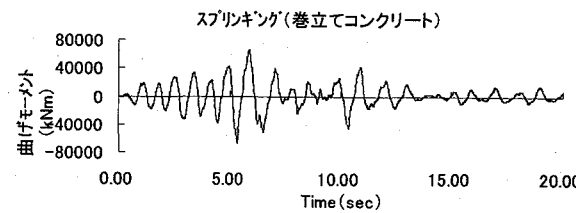


図-15 時刻歴応答曲げモーメント

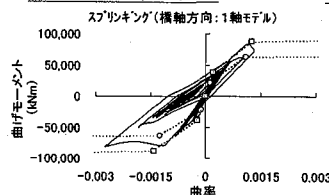
φモデルの84200kNmに対し、2本軸M-φモデルでは2部材の合計値が70700kNm、2本軸ファイバーモデルでは合計値が88200kNmとなっている。この理由としては、部材の曲げ降伏耐力に比例しており、2本軸M-φモデルのモデル化で単純に2つの梁部材に分けてスケルトンを設定したため、部材の2本の降伏耐力を合算しても1本モデルの降伏耐力より小さい。2本軸ファイバーモデルについても同様のことがいえるが、ファイバーモデルのRC巻立て部材の軸力が比較的高いレベルで変動しているため、結果的に応答値が高くなる。逆に充填鋼管部材は応答軸力が平均的に低くなるため、応答曲げモーメントも他に比べ小さい。

(6) M-φ履歴曲線

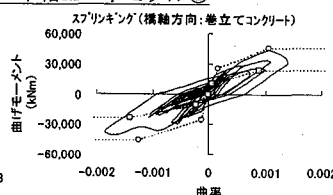
図-16にスプリング部でのM-φ履歴を示すが、全モデル部材降伏に達していることが分かる。2本軸モデルでは充填鋼管部材も降伏している。2本軸ファイバーモデルでは、図-17に示す鉄筋及び鋼管の応力歪み履歴曲線からも部材の上縁側で降伏に達していることが分かる。

初期値の異なる2つの2本軸M-φモデル(モデル①、②)の結果をみると、スプリング部では応答曲げモーメント、応答曲率共にモデル②がわずかに大きく、全く同じ評価となることがいえる。ここには示していないが、クラウン部に関しては初期軸力に多少差があり、M-φ履歴に差がでているが、有意差ではない。

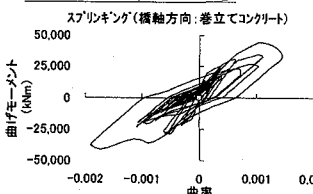
1本軸M-φモデル



2本軸M-φモデル①



2本軸M-φモデル②



2本軸ファイバーモデル

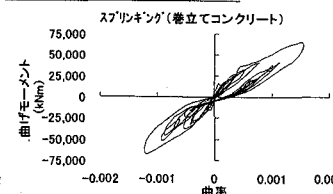


図-16 M-φ履歴曲線

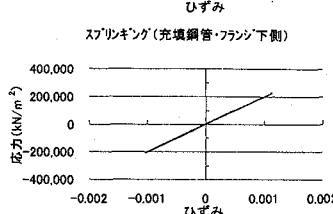
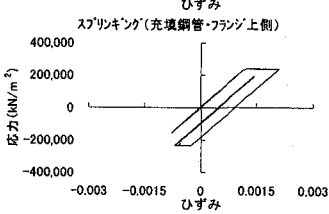
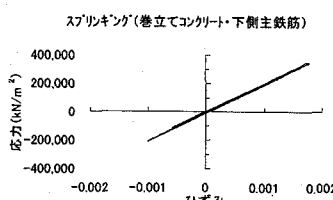
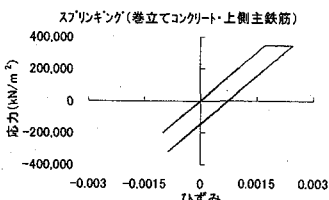
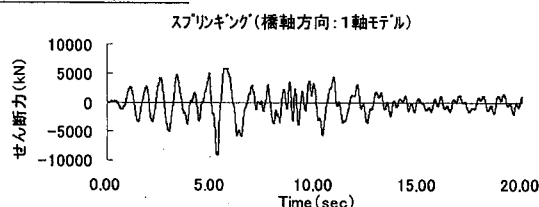


図-17 鋼材の応力-ひずみ履歴曲線

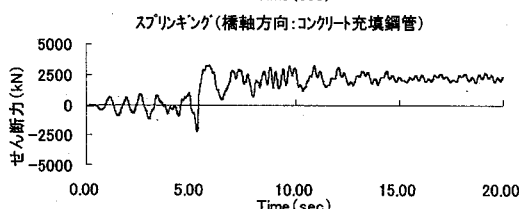
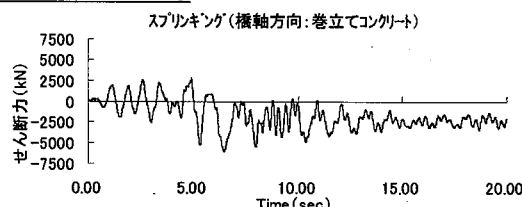
(7) 応答せん断力

図-18に各モデルの時刻歴応答せん断力図を示す。1本軸モデルは2本軸ファイバーモデルの合算値(約6000~9400kN)とほぼ同じ幅で変動している。2本軸ファイバーモデルの2部材

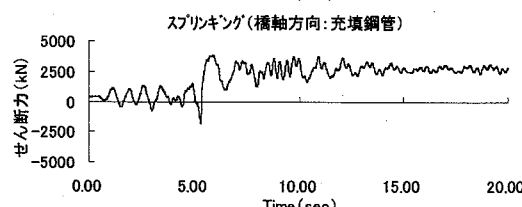
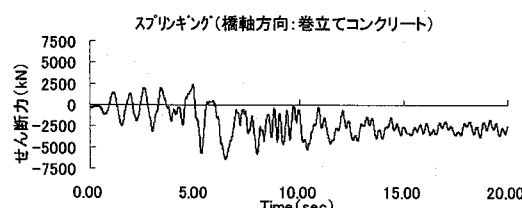
1本軸M-φモデル



2本軸M-φモデル①



2本軸M-φモデル②



2本軸ファイバーモデル

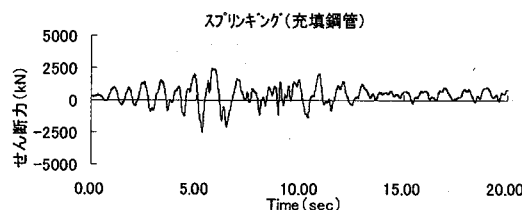
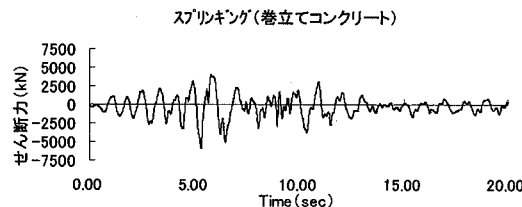


図-18 時刻歴応答せん断力図

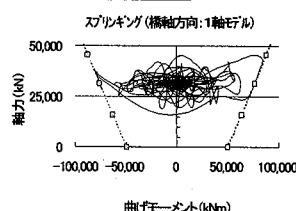
は共に同じ動きをしている。一方、2本軸M-φモデルでは、合算値で約4000kN~7800kNの範囲で変動し、5.3秒以後RC巻立て部材はマイナス側の領域で、充填鋼管部材はプラス側の領域で、明らかに挙動が異なっている。曲げモーメントと同様な理由で、2部材とも曲げ降伏した結果、部材の振動に大きな位相差が生れたためだと思われる。

(8) M-N履歴曲線

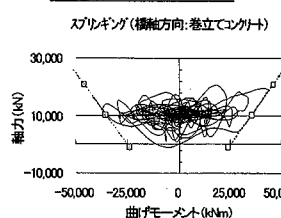
図-19にM-N相関曲線を示す。

図中、破線は初降伏時のM-N関係を表している。履歴曲線がこの破線に接するところで部材が降伏することになる。2本軸M-φモデルの結果を見ると巻立てコンクリート部材は軸引張状態になる前後で降伏に至っていることが分かる。一方、充填鋼管部材は高い軸力を保ったままであることが分かる。

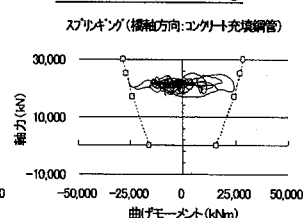
1本軸M-φモデル



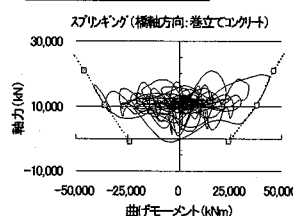
2本軸M-φモデル①



2本軸M-φモデル①



2本軸M-φモデル②



2本軸M-φモデル②

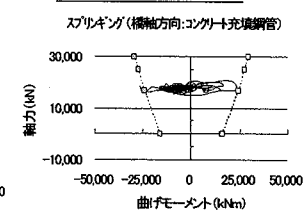


図-19 M-N相関履歴曲線

5. まとめ

合成アーチ橋においては、施工順序とコンクリートのクリープ・乾燥収縮の影響によりアーチリブ同一断面内での応力分布が変化し、RC巻立て部とコンクリート充填鋼管部で初期応力（断面力）が異なることが明らかとなっている。本研究では、このような部材初期断面力の違いを考慮できる非線形動的解析モデルとして、アーチリブ部材をRC巻立てコンクリート部材とコンクリート充填鋼管部材の2本軸線が同一節点で結ばれているモデル案（M-φモデル、ファイバーモデル）を提案した。その提案モデルにより、中規模の合成アーチ橋（アーチスパン 100m）を対象として、L2レベル地震に対する非線形動的解析（橋軸方向加震）を実施し、比較検討を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- ① 初期断面力を正しく評価した2本軸M-φモデルと、スプリング部での初期軸力を合わせた2本軸M-φモデルの解析結果はほぼ等しいと言える。ただし、クラウン部で初期軸力状態が若干合わない場合もあるため、クラウン部がクリティカルとなる場合は注意を要する。すなわち、初期軸力が合わせられればほぼ同じ結果が得られる。
- ② 2本軸M-φモデルでは、曲げ降伏耐力を部材毎に算出するため、全体の耐力が過小評価される傾向にある。しかし、降伏しやすい反面減衰が大きくなるため、応答値は小さくなる。本解析では応答に差が現れ、せん断力の応答波形が乱れるなど、留意すべき点もある。
- ③ 2本軸M-φモデルは、2本軸ファイバーモデルと比べ、計算時間が短くて済むなど扱い易く、また安全側の結果が得られる。
- ④ 2本軸ファイバーモデルでは、軸力変動が大きく、かつ高い軸力で変動するため、部材降伏に至りにくくなる傾向がある。
- ⑤ 2本軸ファイバーモデルは、部材間の位相差はほとんどなく、全体挙動は1本軸M-φモデルに近い。

本モデルは合成アーチ橋に限られたものではなく、同様な合成構造にも適用可能と考える。今後、これらのモデルの適用性、有意性についてさらに知識を蓄積し、合理的、経済的な合成構造の実現を目指したい。

参考文献

- 1) NCB研究会編：新しい合成構造と橋，山海堂，pp205—210,1996.2
- 2) 山花，星，大塚：合成アーチリブの部材断面力・変位評価における鋼管の影響と解析モデルに関する考察，九州橋梁・構造工学研究会 土木構造・材料論文集，第18号，2002.12
- 3) 山花，大塚，谷野：合成アーチ橋の地震応答特性に関する解析的研究，第11回日本地震工学シンポジウム（2002）論文集，2002.11
- 4) 土木学会：鋼・コンクリート複合構造の理論と設計（2）応用編，設計編，pp.62-67,1999.4
- 5) 谷野，大塚，山花：合成アーチ橋の耐震性に関する一考察（その1），（その2），土木学会第56回年次学術講演会講演概要集，平成13年10月
- 6) 井上，他：合成アーチ巻き立て工法による城址橋の計画，橋梁と基礎，Vol.22, No.2, 1988.2
- 7) 山本，他：合成アーチ巻き立て工法による城址橋の設計と施工，橋梁と基礎，Vol.23, No.11, 1989.11
- 8) 水取：中路式RCアーチ橋の耐震性評価および耐震性向上に関する研究，九州大学学位論文，2000.3
- 9) 友近，大塚，山花，後藤：「合成アーチ構成部材の断面力に関する一考察」 土木学会第57回年次学術講演会講演概要集，平成14年9月

（2002年9月13日受付）