

高性能軽量コンクリートのアーチ橋への適用に関する一考察

A study on the application of high performance lightweight concrete for arch bridges

山花豊*, 大塚久哲**, 星道彦***, 秋山博***

Yutaka Yamahana, Hisanori Otsuka, Michihiko Hoshi, Hiroshi Akiyama

* (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)

In late years research and development of high performance structural lightweight concrete is greatly pushed forward. In addition, it has been planned to apply this to prestressed concrete bridges aiming for reduction of dead load and total cost. It is also an important problem to reduce self-weight and to use rational method for construction of concrete arch bridge. In this study, we designed concrete arched bridges of a middle scaled span length ($L=100\text{m}$) using lightweight concrete and normal weight concrete. And we compared lightweight concrete and normal weight concrete for the structural characteristic, seismic performance and construction cost on these designed bridges.

Key Words: high performance structural lightweight concrete, composite arch, creep analysis

キーワード: 高性能軽量コンクリート, 合成アーチ, クリープ解析

1. はじめに

近年, 粗骨材内部の気泡が独立した構造を持ち, 耐久性に優れるいわゆる独立気泡型の高性能軽量骨材の開発が精力的に行われてきており, これまで問題とされてきた耐凍結融解性などの耐久性能が向上した結果, 死荷重の軽減を目的としてプレストレストコンクリート橋などへの適用が進められてきている。

一方, 50~150m 程度のアーチ支間を有するコンクリートアーチ橋では, 架設の合理化のため鋼管アーチを架設し, 鋼管内にコンクリートを充填した後, そのコンクリート充填鋼管アーチをスプリングからクラウン部に向けてコンクリート巻立てを行いアーチリブを完成させる合成アーチ巻立て工法の採用が増加してきている。一般に, アーチ橋の建設コストでは多くがRC構造を採用しているため部材そのものは鋼構造あるいはPCと比べて安価となるが, アーチリブの架設費が大きな割合を占める。このため, アーチ橋の建設では合成アーチ巻立て工法などによるアーチリブ架設の合理化がコストダウンに大きく寄与すると考えられる。

合成アーチ橋に高性能軽量コンクリートを採用した場合, アーチリブおよびアーチアバットの寸法を小さくできるほか, 架設に要する鋼管アーチ部材の小断面化および巻立てコンクリートの施工においてブロック長を大きくできることによる工期短縮などの利点が考えられる。

また, 軽量コンクリートの弾性係数は使用する軽量骨材により

異なり, 普通コンクリートのおよそ 50%程度となるため変形量が大きくなる傾向にあるが, 鋼管アーチ部材と合成するとクリープおよび乾燥収縮が鋼管により拘束されるため変形量が過大となることを抑えることが出来ると考えられる。このことから, 合成アーチ橋に軽量コンクリートを適用することは合理的であると考えられる。

しかし, 軽量コンクリートを合成アーチ橋に適用するには, ク

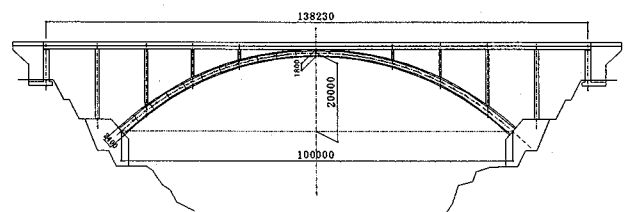
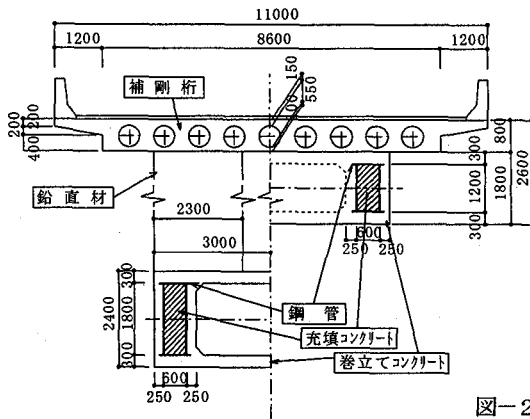


図-1 全体一般図

リープ性状や動的特性など十分に把握できていないことも少なくない。これらの課題を定量的に把握して評価することが高性能軽量コンクリートを合成アーチ橋に適用していく上で必要不可欠であると思われる。

本論文では, 中規模の合成アーチ橋に高性能軽量コンクリートを適用する場合, 鋼管によるクリープ・乾燥収縮の影響に対する拘束効果, 振動特性および耐震性に関して報告する。

普通コンクリート



高性能軽量コンクリート
(アーチリブに適用)

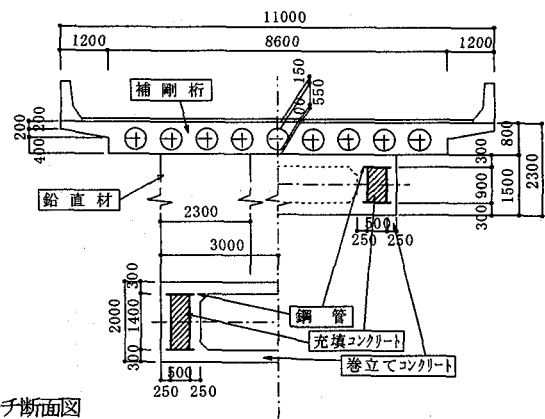


図-2 アーチ断面図

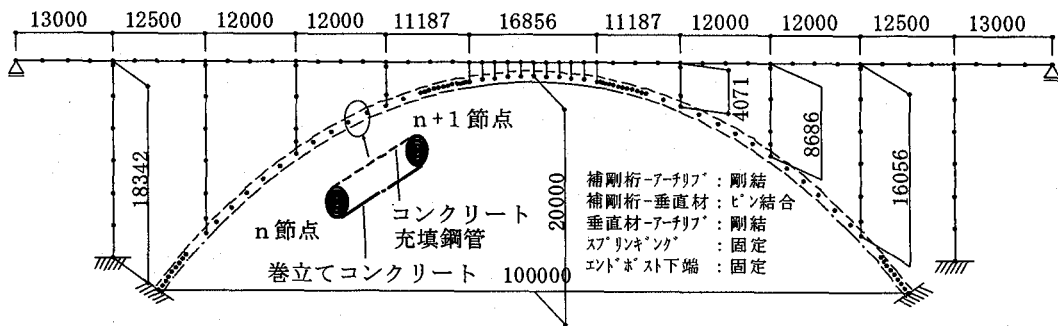


図-3 解析モデル図

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 N/m ²
鉄筋	SD345	77.0	2.0×10^5
鋼管	SS400		
充填コンクリート	$\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$	24.5	3.1×10^4
巻立てコンクリート		(20.0)	(1.5×10^4)
エンドポスト	$\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$	24.5	2.8×10^4
鉛直材			
補剛桁			

※ () 内数値は軽量コンクリートの値

2. 構造解析モデル

検討対象としたのは、図-1に示すアーチ支間100mの合成アーチ橋であり、アーチリブに高性能軽量コンクリートを適用したモデルと普通コンクリートを適用したモデルと2ケース設定し、比較検討を行った。補剛桁および垂直材は、普通コンクリートを用いたRC構造とした。

軽量コンクリートの単位重量は、無筋コンクリート部材で18kN/m³、鉄筋コンクリート部材で20kN/m³とし、ヤング係数は $1.50 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ と仮定した。

主要材料諸元および断面諸元は表-1、2のとおりである。また、図-2、3にそれぞれ主要断面の比較図および解析モデル図を示す。

アーチリブのモデル化では、鋼管、充填コンクリート、巻立てコンクリート間で材料特性が異なり、クリープおよび乾燥収縮によるひずみが拘束される。このため、コンクリートに対しては引張力、鉄筋および鋼管に対しては圧縮力が作用する。

アーチリブを1本のはり部材として解析した場合には、コンクリート・鋼材間での断面力の移行量を評価できないため、本研究ではコンクリート充填鋼管および

表-2 部材断面諸元

		普通コンクリート		軽量コンクリート	
		断面積 m ²	断面2次モーメント m ⁴	断面積 m ²	断面2次モーメント m ⁴
スプリング部	鋼管	0.1770	0.0787	0.0855	0.0252
	充填コンクリート	1.9698	0.4938	1.6017	0.2527
	巻立てコンクリート	5.4098	4.3721	5.0378	2.8532
クラウン部	鋼管	0.1400	0.0312	0.0675	0.0091
	充填コンクリート	1.3138	0.1464	1.0197	0.0652
	巻立てコンクリート	4.8368	2.1929	4.5378	1.3823
エンドポスト		7.0000	0.5833	7.0000	0.5833
鉛直材	t=0.8m	3.6800	0.1963	3.6800	0.1963
	t=0.6m	2.7600	0.0828	2.7600	0.0828
補剛桁		5.4618	0.3651	5.4618	0.3651

巻立てコンクリートをそれぞれ評価した2部材モデルを用いて、解析を行った。また、鋼管内の充填コンクリートのクリープ・乾燥収縮は無視した。

なお、これら各々の各部材は、同一節点を共有するはりモデルとした。

3. クリープ・乾燥収縮の影響

3.1 クリープ解析の概要および解析条件

合成アーチ橋では鋼部材とコンクリート部材との材料特性の違いからクリープ・乾燥収縮により発生する変形が鋼管および鉄筋によって拘束されるため、巻立てコンクリート、鋼管および充填コンクリート間での断面力の移行が生じる。また、コンクリート部材間でも軽量コンクリートと普通コンクリートのクリープ性状が異なるため、クリープ変形を拘束することによる不静定力が発生する。

この影響を定量的に調べるため、アーチリブを2部材にモデル化した解析モデルを用いて施工順序を考慮したクリープ解析を行った。解析では、充填コンクリートは鋼管により密閉された状態にあるため乾燥収縮が無視できると仮定し、非乾燥部材として取り扱っている¹⁾。

以下に、その他の条件を示す。

- ・ 鋼管アーチ：非クリープ・非乾燥収縮部材
 - ・ 充填コンクリート：非乾燥収縮部材
 - ・ その他のコンクリート部材：クリープ・乾燥収縮部材
- 相対湿度：70%
 基本流動係数： $\phi_b = 2.0$
 基本乾燥収縮度： $\varepsilon = -25 \times 10^{-5}$
 有効部材厚： $d_w = k_w \times 2F/U$

ここに、

- k_w ：環境条件に関する係数
 F ：部材断面積
 U ：空気と接触する部材の周長

鋼管とコンクリートの間に十分な付着を有し、平面保持が成立するものと仮定し、クリープ構成則としては Trost-Bazant の理論を用いた²⁾。

また、軽量コンクリートのクリープ性状に関しては、クリープひずみは普通コンクリートと同程度あるいはやや大きいと報告されているが、弾性係数が普通コンクリートに比べて小さいためクリープ係数としては小さくなる傾向にあり、普通コンクリートの60～85%程度の範囲にあることが認められている。さらに、コンクリート標準示方書[構造性能照査編]³⁾では、軽量骨材コンクリートのクリープ係数を普通コンクリートの75%として良いとしている。このことから、本研究ではクリープ係数が普通コンクリートの75%となるように補正して解析を行った。

3.2 解析結果

クリープ解析の結果を図-4～10に示す。

図中、左側がクリープ・乾燥収縮を考慮していない全死荷重時断面力であり、右側がクリープ・乾燥収縮を考慮した全死荷重時

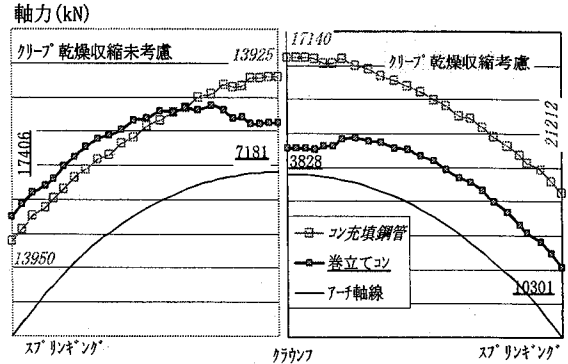


図-4 軸力の変化 (普通コンクリート)

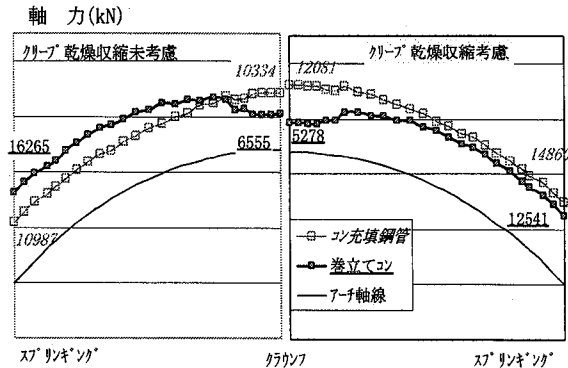


図-5 軸力の変化 (軽量コンクリート)

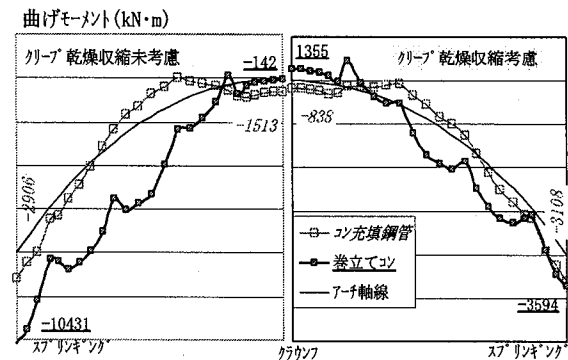


図-6 曲げモーメントの変化 (普通コンクリート)

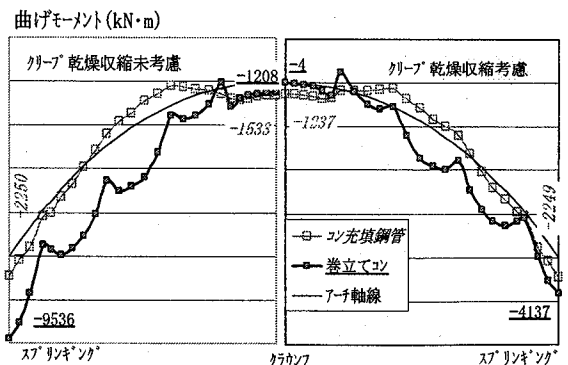


図-7 曲げモーメントの変化 (軽量コンクリート)

断面力である。アーチ軸線を基準とし、巻立てコンクリートとコンクリート充填鋼管それぞれの値をプロットしたものである。

(1) 軸力

軸力の変化を図-4, 5に示す。図-4 (普通コンクリート) では、クリープ・乾燥収縮を考慮した場合には、コンクリート充填鋼管のクラウン部で3215kN, スプリング部で7262kNの軸力増加, 巻立てコンクリートのクラウンで3353kN, スプリング部で7105kNの軸力減少が生じた。

同様に、軽量コンクリートを用いたケース (図-5) では、コンクリート充填鋼管のクラウン部で1747kN, スプリング部で3873kNの軸力増加, 巻立てコンクリートのクラウンで1277kN, スプリング部で3724kNの軸力減少が生じた。

各部材の軸力負担率は、普通コンクリートのクリープ終了時でコンクリート充填鋼管と巻立てコンクリートの比がアーチクラウン部を除き、概ね2:1であるのに対して軽量コンクリートでは1.2:1となる。

これは、軽量コンクリートを用いたアーチリブでは普通コンクリートのものよりも鋼材の占める剛性比が大きく、クリープ・乾燥収縮による変形を拘束する効果があるからと考えられる。

また、軽量コンクリートはヤング係数とともにクリープ係数も普通コンクリートに対して低くなっており、断面力の移行に関してはクリープ係数の大きさが支配的となるため、普通コンクリートの場合に比べてクリープ・乾燥収縮の影響を受けにくいと考えられる。

(2) 曲げモーメント

図-6に示すように、普通コンクリートのケースでは、コンクリート充填鋼管のクラウン部で675kN・m, スプリング部で-202kN・mの曲げモーメントの変動, 巻立てコンクリートのクラウンで1497kN・m, スプリング部で6837kN・mの曲げモーメントの変動が生じている。軽量コンクリートを用いたケース (図-7) では、コンクリート充填鋼管のクラウン部で296kN・mの曲げモーメントの変動, スプリング部で曲げモーメントの変動はほとんど発生していない。巻立てコンクリートでは、クラウン部で1204kN・m, スプリング部で5399kN・mの曲げモーメントの変動が生じている。

このことから、曲げモーメントは、クリープ・乾燥収縮の影響により巻立てコンクリートの方が大きく変動している。また、軸力と同様、軽量コンクリートを用いたケースの方がクリープによる断面力の移行量が小さくなる傾向が認められる。

(3) セン断力

図-8, 9にせん断力の変化を示す。せん断力の変化は、普通コンクリートと軽量コンクリートで有意差は見られず、いずれの部位でもほとんどみられない。

これは、構造系全体の質量分布自体が構造系完成直後とクリープ終了時とで変化がないためと考えられる。

(5) たわみ

アーチリブのたわみを図-10に示す。最大弾性たわみは、普通コンクリートで28mm, 軽量コンクリートで57mmと約2倍の

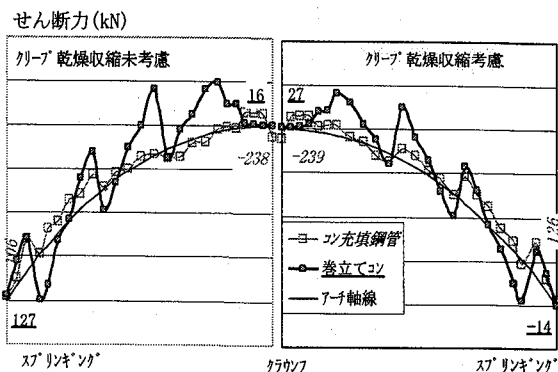


図-8 セン断力の変化 (普通コンクリート)

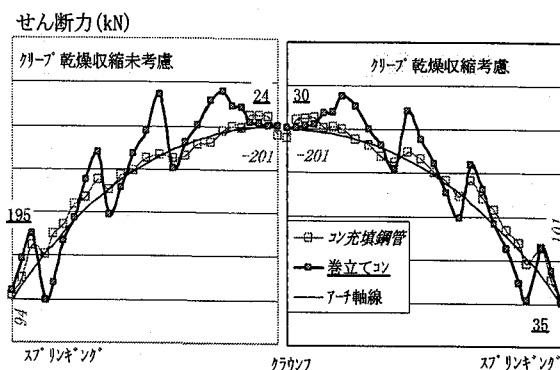


図-9 セン断力の変化 (軽量コンクリート)

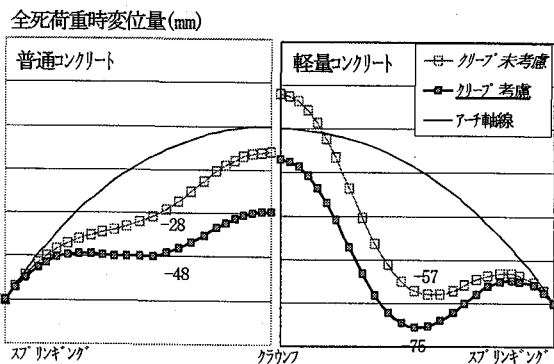


図-10 アーチリブのたわみ

値となっている。これは、軽量コンクリートのヤング係数が普通コンクリートの約50%であることが大きく影響している。たわみ変形に及ぼす要因としては、①アーチリブコンクリートの単位重量、②コンクリートの弾性係数、③部材断面でリブ高さを小さくしていることが考えられる。これらの影響を個々に、評価するため普通コンクリートアーチ橋モデルをベースに上記①～③を単独にパラメタとして弾性たわみ量を求めた。その結果、最大たわみは①をパラメタとした場合で24mm, ②をパラメタとした場合で37mm, ③をパラメタとした場合で48mmとの結果を得た。以上から、アーチリブ形状をスレンダーな構造とした影響が弾性係数の影響よりも大きく、②および③の影響が①による自重軽減効果を上回っていることが分かった。

また、最大たわみを示している箇所のクリープたわみは、普通コンクリートで20mm, 軽量コンクリートで18mmとむしろ小さ

な値となっている。これは、鋼材によるクリープたわみの抑制効果によるものと考えられる。なお、普通コンクリートの場合、鋼管アーチの有無で20mm程度アーチクラウンの変位量が異なるという結果を得ており、鋼管アーチがクリープ・乾燥収縮による変形に及ぼす影響が無視できないことを示すものと考えられる。

4. 耐震性能

4. 1 概要

合成アーチ橋に軽量コンクリートを用いた場合には、コンクリートのヤング係数や部材断面が小さくなるため普通コンクリートのものと振動特性が異なる挙動を示すものと考えられる。

本研究では、振動特性、レベル1,2地震に関して検討を行った。

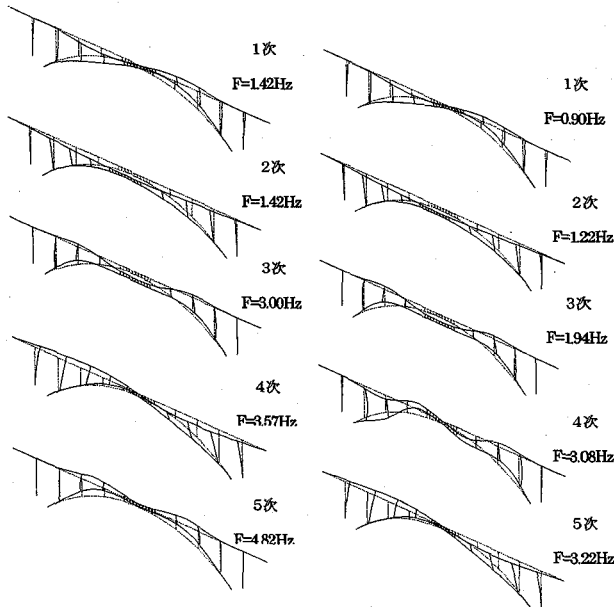


図-1 1 振動モード図
(普通コンクリート)

図-1 2 振動モード図
(軽量コンクリート)

表-3 固有値解析結果(普通コンクリート)

振動 次数	固有周期 (sec)	累積有効質量比(%)			ひずみエネルギー 比例型減衰定数
		橋軸方向	直角方向	鉛直方向	
1	0.706	31	0	0	0.048
2	0.704	31	67	0	0.045
3	0.333	31	67	2	0.047
4	0.280	31	67	2	0.041
5	0.207	31	67	52	0.049
6	0.207	45	67	52	0.048
7	0.162	45	77	52	0.037
8	0.150	71	77	52	0.047
9	0.148	71	77	53	0.048
10	0.143	71	77	54	0.049

表-4 固有値解析結果(軽量コンクリート)

振動 次数	固有周期 (sec)	累積有効質量比(%)			ひずみエネルギー 比例型減衰定数
		橋軸方向	直角方向	鉛直方向	
1	1.111	31	0	0	0.046
2	0.820	31	68	0	0.044
3	0.515	31	68	1	0.046
4	0.325	42	68	1	0.046
5	0.311	42	68	1	0.039
6	0.299	42	68	49	0.049
7	0.194	42	68	64	0.046
8	0.186	84	68	64	0.047
9	0.177	84	72	64	0.039
10	0.161	88	72	64	0.047

4. 2 振動特性

固有値解析の結果を図-1 1および図-1 2に示す。

高性能軽量コンクリートを用いた場合、1次固有周期で0.41sec程度長周期化し、ひずみエネルギー比例型減衰定数はほとんど差がないことが分かった。

なお、ひずみエネルギー比例型減衰定数の算出における各構造要素の等価減衰定数は、道路橋示方書V⁹を参考に補剛桁で0.03、垂材およびアーチリブで0.05とした。

表-5 レベル1地震時応答断面力(普通コンクリート)

	断面力	単位	充填鋼管コン クリート	巻立てコン クリート	合 計
全死荷重時 (クリップ終了)	M	kN・m	-3108	-3594	-6702
	N	kN	21212	10301	31513
橋軸方向地震 (レベル1地震)	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-6 レベル1地震時応答断面力(軽量コンクリート)

	断面力	単位	充填鋼管コン クリート	巻立てコン クリート	合 計
全死荷重時 (クリップ終了)	M	kN・m	-2249	-4137	-6386
	N	kN	14860	12541	27401
橋軸方向地震 (レベル1地震)	M	kN・m	-3645	-17877	-21522
	N	kN	-1370	-2539	-3909
設計断面力	M	kN・m	-5894	-22014	-27908
	N	kN	13490	10002	23492

表-7 応力計算結果(普通コンクリート)

		鉄筋量(cm ²)		鉄筋応力 σ_s (N/mm ²)	コンクリート応力 σ_c (N/mm ²)
i)	全断面	D16@150	158.88	287.5	13.9
		D16@150			
ii)	巻立て	D25@150	357.52	259.9	8.1
		D22@150			
	充填 鋼管	鋼管フランジ	-	9.3	-1.4
		鋼管フランジ	-	-96.3	14.9

表-8 応力計算結果(軽量コンクリート)

		鉄筋量(cm ²)		鉄筋応力 σ_s (N/mm ²)	コンクリート応力 σ_c (N/mm ²)
i)	全断面	D16@150	158.88	271.8	14.8
		D16@150			
ii)	巻立て	D25@150	357.52	271.4	9.6
		D22@150			
	充填 鋼管	鋼管フランジ	-	23.7	-3.7
		鋼管フランジ	-	-104.5	16.2

4. 3 レベル1地震時の検討

レベル1地震時におけるスプリング部の応答断面力および応力計算結果は、表-5~8の様になり、耐震性も普通コンクリートを用いた場合と同等以上であると言える。

4. 4 レベル2地震時の検討

表-9に、レベル2地震橋軸方向加震時の検討結果の概要を示

す。解析条件等は、道路橋示方書V（平成8年12月）を参考に定めた。

【解析条件】

- ・入力地震波 神戸海洋気象台記録N-S成分
- ・地域区分 A地域
- ・地盤種別 I種地盤
- ・部材要素 アーチリブ、鉛直材：非線形梁要素
補剛桁：降伏剛性線形梁要素
- ・復元力特性 デイグレーション・トリニ型 修正武田モデル
- ・減衰の評価 レー減衰（1次および8次）
- ・数値積分法 ニュマークβ法 $\beta=0.25$ $\Delta t=0.01(\text{sec})$
- ・解析時間 40(sec)
- ・使用プログラム TDAPIII

表-9のM-φ履歴曲線より、普通コンクリートでは曲げ降伏を少し越えた程度の応答であるのに対して、軽量コンクリートではリブ高を絞ったため剛性が低くなり、曲率で約4φyまで応答している（φy：降伏曲率）。応答変位も約1.5倍と、耐震性に関しては注意が必要である。しかし、直角方向に関しては、リブ幅が等しいこともあり、普通・軽量ともほぼ同様な挙動が見られた。

表-9 L2地震検討概要（橋軸方向）

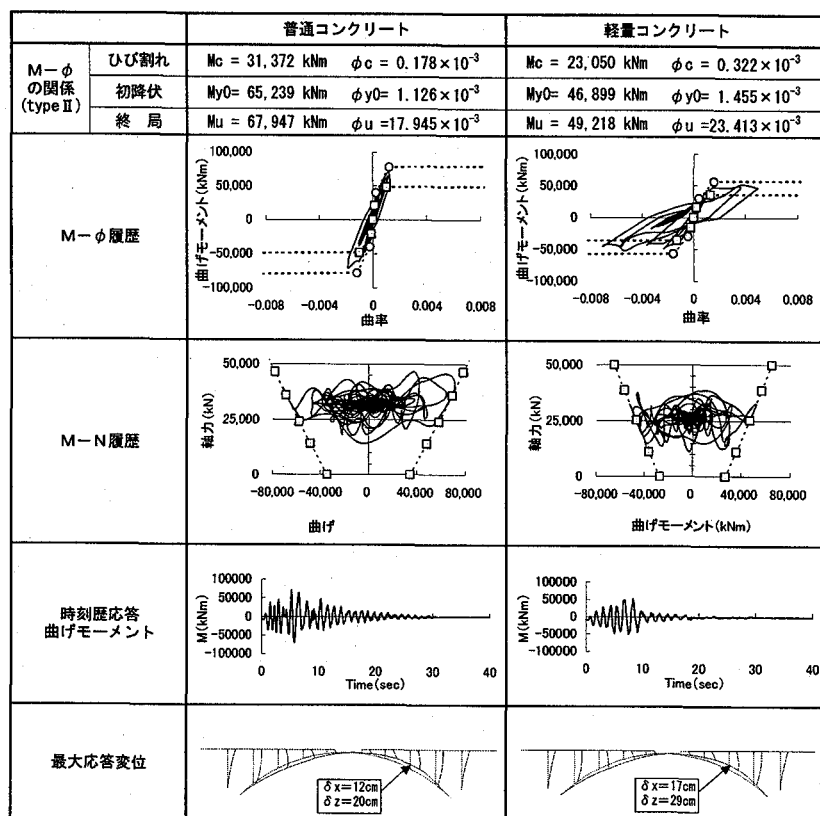


表-10 概算数量比較表

（アーチリブ部材）

		普通コンクリート	軽量コンクリート	比率 %
コンクリート	m ³	850	650	76
型枠	m ²	2328	2120	91
鋼管重量	kN	950	550	58
鉄筋	t	187	163	87

5. 概算数量比較

普通コンクリートをアーチリブに用いた場合と軽量コンクリートをアーチリブに用いた場合の概算数量比較を表-10に示す。数量は大幅に削減されることが分かる。アーチアバットも小型化が図れるため数量減となり、コストダウンにつながる可能性を有しているものと思われる。

6. まとめ

高性能軽量骨材コンクリートの鋼・コンクリート合成アーチ橋への適用性に関してここでは主としてクリープ、乾燥収縮の影響および耐震性に関して普通コンクリートを適用したケースとの比較により考察した。

以下に、本研究を通して得られた知見を示す。

（1）クリープ・乾燥収縮の影響

- ① 軸力の変動に関して、普通コンクリートを用いたケースの方が軽量コンクリートを用いたケースよりも変動量が大きく、軸力が巻立てコンクリートからコンクリート充填鋼管に軸力が大きく移行する。

- ② 軸力の変動が軽量コンクリートで少ないのは、普通コンクリートを適用した場合よりも鋼材断の占める剛性比が高く、クリープ・乾燥収縮による変形を拘束する効果があることおよび、軽量コンクリートは普通コンクリートに比べクリープ係数が低いことが要因に挙げられる。

- ③ 曲げモーメントに関しても、軸力同様、クリープによる断面力の移行量が小さくなる傾向を示している。

- ④ せん断力は、普通コンクリート・軽量コンクリートを問わず、いずれの部位でもほとんど変動はない。

- ⑤ 軽量コンクリートを適用した場合の弾性たわみは、普通コンクリートに比べ約2倍の値となったが、クリープたわみは、普通コンクリートよりも若干小さな値を示した。これも、鋼材によるクリープたわみの抑制効果によるものと考えられる。

（2）耐震性能

- ① 振動特性は、軽量コンクリートを適用した場合には長周期化する傾向が見られたがひずみエネルギー比例型減衰定数はほぼ同一の値と

なった。

- ② レベル1地震動に対する耐震性は普通コンクリートの場合と同等のものである。
- ③ レベル2地震動に対しては、リブ高さを小さくしたことも影響し、応答変位が大きくなったが十分対応が可能なものと考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼・コンクリート複合構造の理論と設計(1)基礎編：理論編，1999.4
- 2) H.リッツェ, D.ユングビルト(百島祐信訳)：コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮，鹿島出版，1990
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，pp.30-37, 2002.3
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，pp.111-115, 2002.3
- 5) 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
- 6) 谷野，大塚，山花：軽量コンクリートを用いた合成アーチ橋の耐震性について(その2)，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
- 7) 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)