

コンクリートを充填した鋼アーチリブを用いたアーチ橋の構造特性に関する検討

A Study on Structural Characteristics of Arch Bridges using Concrete-Filled Steel Arch Ribs

佐々木 保隆*・大森 邦雄**・田中 忠夫***・中井 博****

By Yasutaka SASAKI, Kunio OMORI, Tadao TANAKA and Hiroshi NAKAI

It is well known that the ultimate strength of the concrete-filled rectangular steel tubes is higher than the summation of each of steel and concrete ultimate strength under the composite actions of axial compressive forces and bending moments. This method is already utilized to construct the concrete arch rib using steel tubes in which concrete is filled, so referred to as the CLCA Method. This method is also useful for steel arch rib. By using this concrete-filled steel arch rib, it can be possible to reduce the steel material because of high strength against axial compressive force compared with the steel arch. Based upon rise-span ratio and concrete-filled length, parametric analyses and designs are conducted, and the structural characteristics of the concrete-filled steel arch rib are investigated.

Keywords: concrete-filled steel arch rib, rise-span ratio, concrete-filled length, constructional method

1. まえがき

周知のとおり、鋼管にコンクリートを充填した合成柱は、鋼管とコンクリートのそれぞれの強度の和である累加強度以上の強度が期待できる^{1)・2)}。この種の合成柱の国内における設計基準としては、合成柱(充填方式)を有する鋼製橋脚の設計・施工指針(案)(阪神高速道路公団、昭和61年3月)³⁾がすでに発表されており、実構造の設計・施工が進められている。

そもそも合成柱とは、薄肉断面の鋼部材の内部にコンクリートを充填したものであり、鋼部材とコンクリートを一体化した構造にして、軸方向圧縮力、あるいは軸方向圧縮力と曲げモーメントとを同時に受ける部材に対し、より高い剛性と優れた耐荷特性が発揮できるようにしたものである。

この特性を有効に活用する構造物としては、軸方向圧縮力が卓越するアーチ橋への適用も考えられる。すでに、コンクリートアーチ橋においては、合成アーチ巻立て工法(いわゆるCLCA工法)が開発され、国内においては新潟県の城址橋^{4)・5)}を手始めとし、これまでに数橋の実施例^{6)・7)}がある。この工法は、従来のコンクリートアーチ橋における一般的な架設工法であるセントル工法やメラン工法に比べ、施工を簡単にするために薄肉角型鋼管をアーチ軸線に架け渡した後、鋼管内にコンクリートを充填、これを支保工として、ワーゲン車によってコンクリートを順次巻立ててゆくものである。構造的には、架設時の一時期に合成アーチとなるが、最終的に鋼とコンクリートとの合成効果を期待するものではなく、完成系においてはRCアーチとしての設計がなされている。

* (株)横河ブリッジ 本社・設計部技術開発課 (〒273 千葉県船橋市山野町27番地)

** (株)横河ブリッジ 本社・設計部長 (〒273 千葉県船橋市山野町27番地)

*** (株)東名設計 取締役設計部長 (〒101 東京都千代田区神田錦町3-9)

**** 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)

一方、鋼アーチ橋については、これまでに合成柱を採用した実施例が見当たらない。また、鋼アーチリブにコンクリートを充填した合成柱としての設計・施工方法¹⁰⁾についても、十分な検討が加えられていないのが現状である。したがって、合成柱を用いたアーチ橋の施工方法と、それに対応した設計方法について検討し、合成柱適用の有意性について基本的な検討を加えることは、重要な課題であると思われる。

本文では、合成柱を利用した鋼アーチ橋の設計・施工の適用の可能性について、アーチのライズ比とコンクリート充填範囲とをパラメータにして解析を行い、まず基本的な構造特性を把握する。さらに、架設工法を考慮したコンクリート充填鋼アーチ橋の試設計により、合成柱を用いることの得失、ならびに経済性を検討するものである。

2. コンクリート充填鋼アーチリブに適用する軸方向圧縮力と一軸曲げモーメントを受ける合成柱の基本式

中心軸圧縮力と一軸曲げモーメントとを同時に受ける合成柱は、以下の諸式⁹⁾を用いて照査する。

$$\nu \frac{M}{M_u} \leq \phi \quad \text{-----} \quad (1)$$

$$M = M_0 \frac{1}{\{1 - \nu (P/P_{cr})\}} \quad \text{-----} \quad (2)$$

$$\phi = 1.0 - \nu^2 (1 + \beta) (P/P_u)^2 + \nu \beta (P/P_u) \quad \text{-----} \quad (3)$$

ここで、係数 β は、次式で求められる。

$$\beta = 9.17 \gamma^2 - 13.75 \gamma + 4.63 \quad \text{-----} \quad (4)$$

そして、鋼材の荷重分担率 γ は、次式で与えられる。

$$\gamma = \frac{P_{su}}{P_{su} + P_{cs}} \quad \text{-----} \quad (5)$$

$$P_{su} = \sigma_{cu} A_s \quad \text{-----} \quad (6)$$

$$P_{cs} = 0.85 \sigma_{ck} A_c \quad \text{-----} \quad (7)$$

ここに、

ν : 安全率

P : 断面に作用する軸方向圧縮力 (kgf)

P_{cr} : 合成柱の弾性座屈荷重 (kgf) = $(\pi^2 E_s I_v / l^2)$

l : 合成柱の有効座屈長 (cm)

E_s : 鋼材の弾性係数 (kgf/cm²)

I_v : 合成柱の断面二次モーメント (cm⁴)

M : 軸方向圧縮力 P による付加曲げモーメントを考慮した断面の曲げモーメント (kgf・m)

M_0 : 断面に作用する曲げモーメント (kgf・m)

M_u : 合成柱の終局曲げモーメント (kgf・m)

P_{su} : 鋼部材の圧壊荷重 (kgf)

P_{cs} : コンクリートの圧壊荷重 (kgf)

σ_{cu} : 鋼材の降伏応力度 (kgf/cm²)

σ_{ck} : コンクリートの設計基準強度 (kgf/cm²)

- A_s : 鋼部材の断面積 (cm^2)
 A_c : 充填コンクリートの断面積 (cm^2)
 P_u : 合成柱の耐力 (kgf)

また、合成柱の終局曲げモーメント M_u は、角型鋼管の場合、図-1 に示す合成柱の基本断面と応力分布とを仮定して、次式により算出する。

$$M_u = \sigma_{cu0} \{ d_1 \cdot t_w (d_1 - d_N) + b \cdot t_f (d_1 + t_f) \} \quad \text{-----} \quad (8)$$

ここで、中立軸からコンクリート圧縮縁までの距離 d_N は、次式で与えられる。

$$d_N = \frac{2 d_1 \cdot t_w}{4 t_w + b_f (0.85 \sigma_{ck} / \sigma_{cu0})} \quad \text{-----} \quad (9)$$

ここに、 σ_{cu0} : 鋼板の局部座屈強度 σ_{cu1} から以下に示す応力度を差し引いた、合成柱の鋼管が負担する
 応力度 (kgf/cm^2) ($= \sigma_{cu1} - \sigma_{ec} - \sigma_e$)

σ_{ec} : 充填コンクリート打設時に側圧により鋼管に生ずる圧縮応力度 (kgf/cm^2)
 ($= 0.1 \sigma_{cu0}$)

σ_e : 充填コンクリート硬化前の応力度のうち、構造物の完成後まで鋼管に残留する
 応力度 (kgf/cm^2)

$b_1 = b - 2 t_w$ (cm)

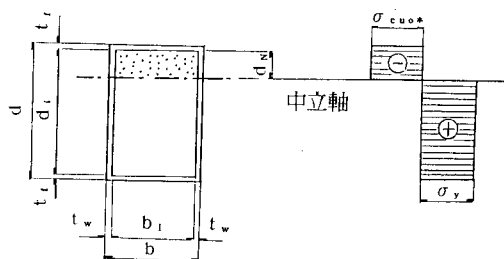
$d_1 = d - 2 t_f$ (cm)

b : 合成柱の幅 (cm)

d : 合成柱の高さ (cm)

t_w : 鋼管のウェブ厚 (cm)

t_f : 鋼管のフランジ厚 (cm)



(a) 合成柱の基本断面

(b) 応力分布

図-1 終局曲げモーメント M_u を求めるための合成柱基本断面と応力分布

3. コンクリートを充填した鋼アーチ橋の適用性に関する基本検討

3. 1 最適ライズ比に関する検討

コンクリートを充填した鋼アーチ橋に適するライズ比を検討するため、2 ヒンジアーチと固定アーチとについて、ライズ比 f/L (f : ライズ, L : スパン) をパラメータにとり、各種荷重状態について解析を行い、基本構造特性を把握する。さらに、スパン $L=100\text{m}$ の 2 ヒンジ鋼アーチ橋を対象として、ライズ比 f/L をパラメータにとり、コンクリートを充填した鋼アーチ橋としての試設計を行い、その影響について検討する。

3. 1. 1 基本構造特性の解析

(1) 解析ケース

ライズ比 f/L をパラメータとし、各荷重状態におけるアーチの基本構造特性を把握する。そのため、ライズ

比 $f/L=1/5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9, 1/10, 1/12$, および $1/15$ の合計8ケースについて、解析を行う。その際、アーチ軸線としては、2次の放物線とする。また、荷重の載荷状態は、断面力の特徴を把握するうえで基本となる集中荷重（ $L/2$ 点）、集中荷重（ $L/4$ 点）、等分布荷重満載、および等分布荷重半載とする。そして、対象とする構造系としては、鋼アーチ橋とし、一般的な2ヒンジアーチとコンクリートアーチに多い固定アーチとの2ケースを考える。また、両者の断面力を比較・検討する。

(2) 解析結果

a. 2ヒンジアーチ

図-2には、ライズ比の相違による端断面位置で発生する最大軸方向力の増加率を示す。ここで、比率は、ライズ比 $f/L=1/5$ における計算値で正規化した値を示している。この図より、載荷状態の相違による差異は認められず、ライズ比 f/L が小さくなるのに伴って軸方向力は漸増し、また軸方向力の増加率はライズ比 f/L に反比例している。

図-3には、ライズ比 f/L による最大曲げモーメント（発生位置は、荷重載荷状態により $L/2$ 点と $L/4$ 点）の増加率を示す。ここで、軸方向力と同様に、ライズ比 $f/L=1/5$ の計算値で正規化した値を示している。この図より、注目すべきことは、等分布荷重満載時のみ、他の3載荷状態と傾向を異にする点である。ちなみに、ライズ比を $f/L=1/10$ とした場合には、標準的なライズ比 $f/L=1/6$ の6倍、また極端に低ライズ化した $f/L=1/15$ の場合には14倍の曲げモーメントが発生する。したがって、アーチを低ライズ化した場合、等分布荷重満載時、すなわち死荷重載荷状態においては、鋼アーチリブの自重に比べ、充填コンクリートの自重が圧倒的に重くなるため、充填コンクリートの自重が断面力に大きく影響を及ぼす可能性があることを示唆している。

b. 固定アーチ

2ヒンジアーチと同様の整理方法で、固定アーチに対する解析を行った結果を図-4、および図-5に示す。これらの図より、端断面位置に発生する最大軸方向力の増加率は、2ヒンジアーチにおける解析結果に比べ、すべてのライズ比に対し、若干、低めの値を示している。しかし、傾向は類似している。また、ライズ比 f/L による最大曲げモーメント（荷重載荷状態により $L/2$ 点、 $L/4$ 点、および端断面で発生）の増加率は、すべての荷重状態において増加する傾向を示しており、とくに等分布荷重満載時の増加率が最も大きい値となる。

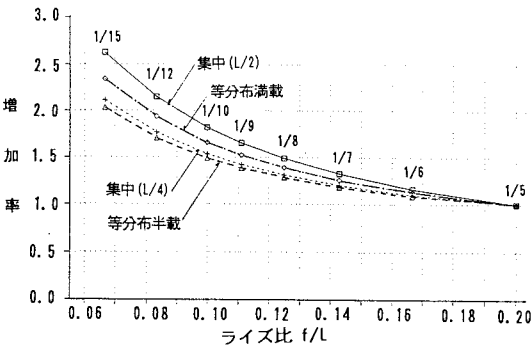


図-2 ライズ比による軸方向力の増加率
(2ヒンジアーチ)

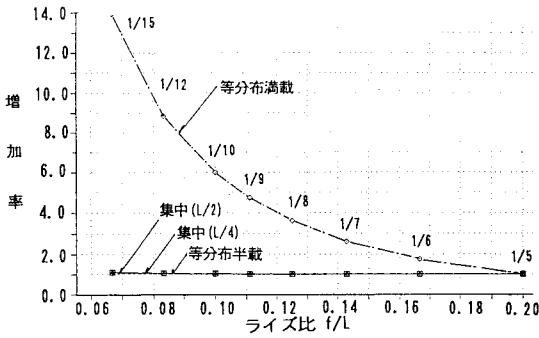


図-3 ライズ比による曲げモーメントの増加率
(2ヒンジアーチ)

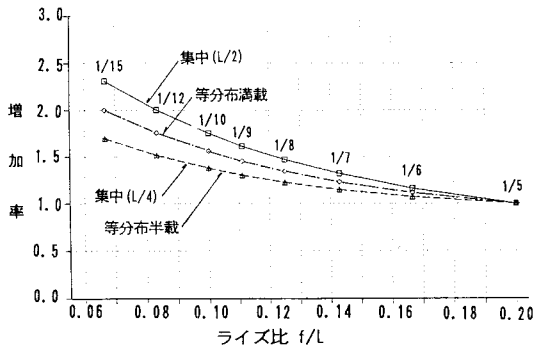


図-4 ライズ比による軸方向力の増加率
(固定アーチ)

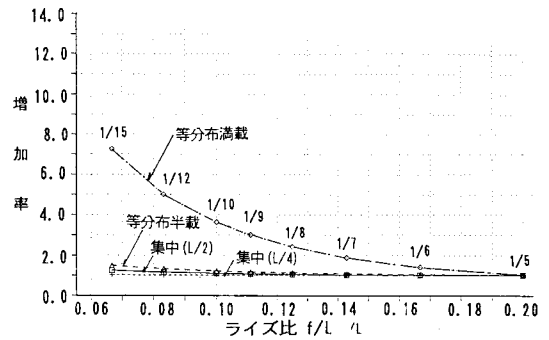


図-5 ライズ比による曲げモーメントの増加率
(固定アーチ)

3. 1. 2 ライズ比をパラメータとした2ヒンジで、コンクリートを充填した鋼アーチ橋の試設計

以上のアーチに関する基本解析結果から、アーチ橋の支点条件の相違にかかわらず、ライズ比 f/L が小さくなるほど、等分布荷重満載時の曲げモーメントが増加する傾向にあることがわかる。また極端に低ライズ化した場合、コンクリート充填時の死荷重には、設計のとき注意を要する。

(1) 設計条件

試設計する際の設計条件としては、下記のとおりとした。

- ① 橋 格：1等橋
- ② 形 式：2ヒンジ上路アーチ橋
- ③ アーチ支間：100.0 m
- ④ 幅 員：7.0 m
- ⑤ アーチ間隔：6.0 m
- ⑥ 床版厚：22.0 cm
- ⑦ 舗装厚：6.0 cm
- ⑧ ライズ比：1/6, 1/8, 1/10, 1/12, および1/15
- ⑨ 鋼 重：350kgf/m²
- ⑩ 使用鋼材：SM490
- ⑪ コンクリート設計基準強度： $\sigma_{ck}=240\text{kgf/cm}^2$
- ⑫ 適用示方書：道路橋示方書・同解説（平成2年2月），合成柱（充填方式）を有する鋼製橋脚の設計・施工指針（案），阪神高速道路公団（昭和61年3月）

(2) 設計概要

設計対象とする合成アーチ橋は、ライズ比 $f/L=1/6, 1/8, 1/10, 1/12$, および $1/15$ の合計5ケースである。比較設計における着目は、通常の鋼アーチ橋とアーチリブ内にコンクリートを充填した合成アーチ橋のライズ比の変動に伴う設計断面力の変化、ならびにアーチリブ鋼重の変動に集約される。これらの検討結果から、コンクリートを充填したアーチリブを用いた鋼アーチ橋の得失を判断してみる。具体的には、まず各ライズ比における通常の鋼アーチ橋の断面を現行の許容応力度設計法にて決定し、つぎにこの鋼アーチリブ内

にコンクリートを充填し、コンクリートの自重を考慮した断面力を算出する。さらに、合成柱（充填方式）を有する鋼製橋脚の設計・施工指針（案）³⁾に準拠して、合成柱としての耐荷力照査を行い、鋼部材の断面を決定する。なお、アーチリブの断面はスパン全長にわたって一定とする。また、ここではスパンライズ比による影響を確認することを主目的とするため、いわゆる死活荷重合成断面として計算した。そして、架設工法による影響は、後述の4章にて詳細に比較・検討する。

(3) 比較設計結果

a. コンクリートの充填前後における設計断面力

図-6は、通常の鋼アーチ橋とコンクリート充填アーチ橋におけるアーチスパン1/4点の設計断面力（軸方向力、および曲げモーメント）を相関図として示したものである。この図から低ライズ化に伴い断面力の増加が著しいことがわかる。ライズ比 $f/L=1/15$ と極端に低ライズ化した場合、 $f/L=1/6$ に比べ軸方向力は約5倍、また曲げモーメントは約2倍となっている。

b. 鋼アーチリブ断面決定

表-1には、通常の鋼アーチ橋とコンクリート充填アーチ橋とにおけるアーチリブの断面構成を各ライズ比ごとに示す。コンクリート充填前の鋼アーチリブの断面決定に当たっては、断面幅 b と断面高さ h との比 b/h をほぼ一定値に保ち、さらに発生応力が各スパンライズ比 f/L の値に対して同レベルとなるように留意している。コンクリートを充填した合成アーチリブの断面決定においては、通常の鋼アーチリブ断面の断面幅 b と断面高さ h とは同一とし、板厚を変化させることにより、式(5)の荷重分担率 γ を変え、極力、満足すべき耐荷力に近い断面構成を繰返し計算によって求めた。断面幅 b と断面高さ h とを同一とした理由は、充填するコンクリート自重を不変とし、設計断面力が大幅に変更することを避けたためである。なお、アーチリブの有効座屈長は、支材間隔とした。この設計仮定における問題点としては、板厚変化による断面力の変動が考慮されていないことがある。しかし、充填コンクリートの自重と比較して板厚変化による鋼自重の変化が小さいと判断できるため、ライズ比に着目した比較設計としては、影響が

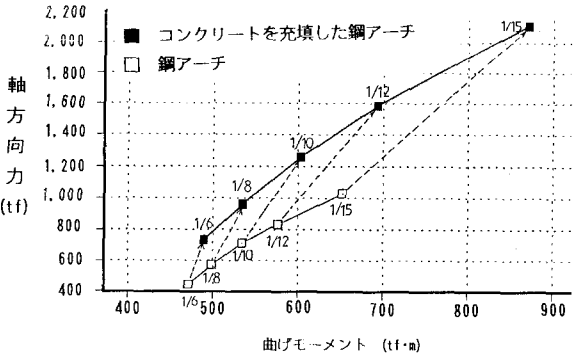


図-6 ライズ比の相違による鋼アーチとコンクリートを充填した鋼アーチの設計断面力の変化（2ヒンジアーチ）

表-1 鋼アーチとコンクリートを充填した鋼アーチの設計結果の比較（2ヒンジアーチ）

ライズ比 f/L	① 鋼アーチ		② コンクリート充填アーチ	
	設計断面力	断面構成	設計断面力	断面構成
1/6	$M=472\text{tf}\cdot\text{m}$	2-Flg PL 1000 x 22 2-Web PL 1500 x 14 断面積 $A_s = 886\text{cm}^2$ $b/h = 0.667$	$M=439\text{tf}\cdot\text{m}$	2-Flg PL 1000 x 15 2-Web PL 1500 x 9 断面積 $A_s = 570\text{cm}^2$ $b/h = 0.667$
	$N=-445\text{tf}$	$\sigma_u = -1611\text{kgf/cm}^2$ $\sigma_t = 578\text{kgf/cm}^2$ $\sigma_{ts} = 1980\text{kgf/cm}^2$ $\sigma_{cs} = -1951\text{kgf/cm}^2$ 有効座屈長=1054.9cm	$N=-731\text{tf}$	(合成柱としての照査) (1) $1.7(M/M_u) = 1.006$ (2) $\psi = 1.064$ (1)/(2) = 0.945
1/8	$M=495\text{tf}\cdot\text{m}$	2-Flg PL 1000 x 24 2-Web PL 1550 x 15 断面積 $A_s = 945\text{cm}^2$ $b/h = 0.645$ 有効座屈長=1031.1cm	$M=535\text{tf}\cdot\text{m}$	2-Flg PL 1000 x 16 2-Web PL 1550 x 9 断面積 $A_s = 595\text{cm}^2$ $b/h = 0.645$
	$N=-575\text{tf}$	$\sigma_u = -1630\text{kgf/cm}^2$ $\sigma_t = 414\text{kgf/cm}^2$ $\sigma_{ts} = 1800\text{kgf/cm}^2$ $\sigma_{cs} = -1660\text{kgf/cm}^2$	$N=-993\text{tf}$	(合成柱としての照査) (1) $1.7(M/M_u) = 1.004$ (2) $\psi = 1.018$ (1)/(2) = 0.985
1/10	$M=534\text{tf}\cdot\text{m}$	2-Flg PL 1100 x 24 2-Web PL 1650 x 15 断面積 $A_s = 1023\text{cm}^2$ $b/h = 0.667$ 有効座屈長=1020.0cm	$M=503\text{tf}\cdot\text{m}$	2-Flg PL 1100 x 16 2-Web PL 1650 x 9 断面積 $A_s = 643\text{cm}^2$ $b/h = 0.667$
	$N=-705\text{tf}$	$\sigma_u = -1631\text{kgf/cm}^2$ $\sigma_t = 251\text{kgf/cm}^2$ $\sigma_{ts} = 1900\text{kgf/cm}^2$ $\sigma_{cs} = -1699\text{kgf/cm}^2$	$N=-1258\text{tf}$	(合成柱としての照査) (1) $1.7(M/M_u) = 1.004$ (2) $\psi = 1.018$ (1)/(2) = 0.985
1/12	$M=576\text{tf}\cdot\text{m}$	2-Flg PL 1200 x 24 2-Web PL 1750 x 15 断面積 $A_s = 945\text{cm}^2$ $b/h = 0.645$ 有効座屈長=1031.1cm	$M=594\text{tf}\cdot\text{m}$	2-Flg PL 1200 x 16 2-Web PL 1750 x 12 断面積 $A_s = 804\text{cm}^2$ $b/h = 0.686$
	$N=-834\text{tf}$	$\sigma_u = -1630\text{kgf/cm}^2$ $\sigma_t = 414\text{kgf/cm}^2$ $\sigma_{ts} = 1800\text{kgf/cm}^2$ $\sigma_{cs} = -1660\text{kgf/cm}^2$	$N=-1592\text{tf}$	(合成柱としての照査) (1) $1.7(M/M_u) = 0.950$ (2) $\psi = 0.962$ (1)/(2) = 0.987
1/15	$M=651\text{tf}\cdot\text{m}$	2-Flg PL 1300 x 25 2-Web PL 1800 x 15 断面積 $A_s = 945\text{cm}^2$ $b/h = 0.645$ 有効座屈長=1008.9cm	$M=571\text{tf}\cdot\text{m}$	2-Flg PL 1300 x 19 2-Web PL 1900 x 12 断面積 $A_s = 930\text{cm}^2$ $b/h = 0.684$
	$N=-1022\text{tf}$	$\sigma_u = -1622\text{kgf/cm}^2$ $\sigma_t = -23\text{kgf/cm}^2$ $\sigma_{ts} = 1900\text{kgf/cm}^2$ $\sigma_{cs} = -1757\text{kgf/cm}^2$	$N=-2116\text{tf}$	(合成柱としての照査) (1) $1.7(M/M_u) = 0.866$ (2) $\psi = 0.905$ (1)/(2) = 0.959

小さく、有効であると思われる。また、断面幅 b と断面高さ h とを同一として決めた断面が、合成柱として最適断面であるか否か疑問が残る。しかし、本比較設計の主旨に照らし、必ずしも最適断面である必要はなく、全体的な傾向が考察できればその目的は果たせるものとする。

図-7 (a) ~ (e) には、ライズ比 $f/L = 1/6, 1/8, 1/10, 1/12, \text{および} 1/15$ における曲げモーメントと軸方向力の相関曲線を示す。図中の○印は、鋼アーチリブの板厚を変えて、荷重分担率を変化させた場合の耐力力曲線に対する位置関係を示している。また、●印は、対応する耐力力を超過していることを示している。

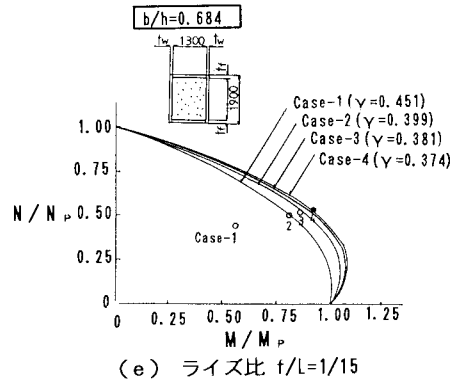
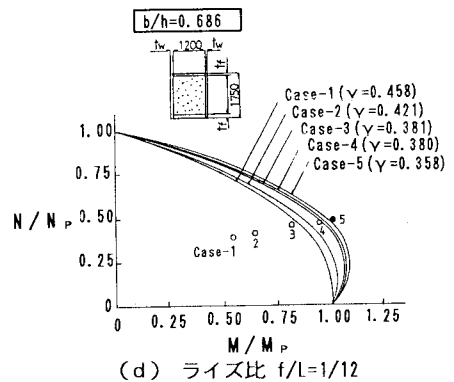
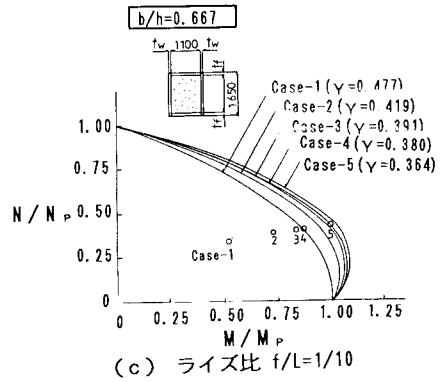
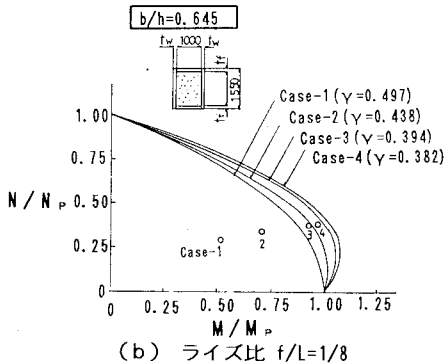
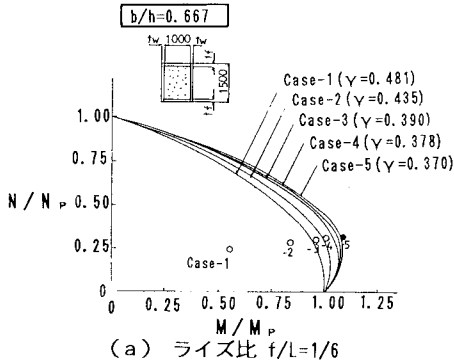


図-7 各ライズ比における曲げモーメント-軸方向力の相関曲線

図-8 は、全ケースの相関曲線をまとめて示したものである。この図によると、ライズ比による効果が明確に現れており、相関曲線の膨らみ部（曲げモーメント極大部）に位置するのは、ライズ比 $f/L=1/6$ が相当する。低ライズ化するに伴って、この位置から遠ざかる傾向を示す。

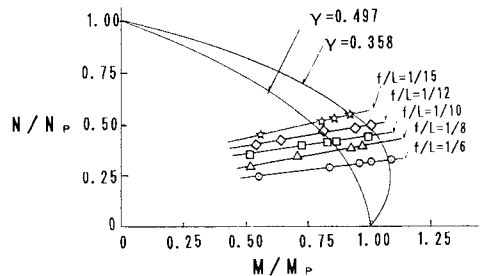


図-8 ライズ比による変動傾向

c. アーチリブの鋼重の変動

図-9には、通常の鋼アーチ橋とコンクリートを充填したアーチ橋における鋼アーチリブの必要断面積（鋼重）を示す。この図より、断面積の減少量は、ライズ比 $f/L=1/6, 1/8$, および $1/10$ に比べ低ライズ化した $f/L=1/12$, および $1/15$ では、少なくなることがわかる。通常の鋼アーチ橋に比べコンクリートを充填したアーチ橋のアーチリブの鋼重減少率はライズ比 $f/L=1/6, 1/8, 1/10$ において約35%になる。これに対し、低ライズ化した $f/L=1/12$ および $1/15$ では、約25%と減少率が10%程度小さい値を示す。

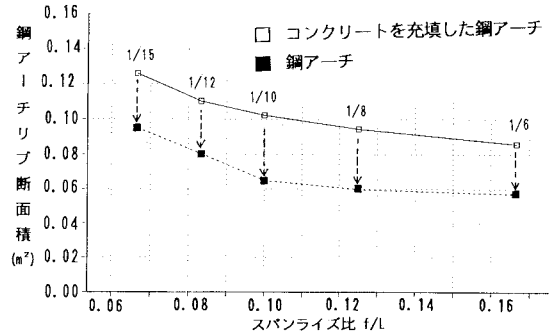


図-9 鋼アーチとコンクリートを充填した鋼アーチの必要断面積の変動（2ヒンジアーチ）

3. 2 コンクリートの充填範囲に対する検討

コンクリートの充填範囲をパラメータにとり、標準的なライズ比 $1/6$ の2ヒンジアーチと固定アーチとについて、コンクリート充填に伴う断面力の推移を把握し、各アーチにおける最適なコンクリート充填範囲について検討する。

3. 2. 1 2ヒンジアーチとして最適なコンクリート充填範囲の検討

2ヒンジアーチにおいては、断面設計上厳しくなるスパン $1/4$ 点の断面に着目したコンクリートの充填が考えられる。

図-10には、スパン $1/4$ 点から対称にコンクリート充填した場合の $1/4$ 点と $1/2$ 点における軸方向力、および曲げモーメントを示す。コンクリート充填にともない曲げモーメント、および軸方向力とも増大し、コンクリートの充填範囲 $l_c=25$ m（充填率50%）のときに曲げモーメントは最大となる。その後、さらにコンクリートの充填範囲を広くするのに伴い、軸方向力は増大するが、曲げモーメントは、減少し、 $1/4$ 点で $20\text{tf}\cdot\text{m}$ 、また $1/2$ 点で $26\text{tf}\cdot\text{m}$ となる。

図-11には、2ヒンジアーチ両支点から中央に向かって対称にコンクリート充填した場合の $1/4$ 点と $1/2$ 点における軸方向力、および曲げモーメントを示す。端部からの充填距離 $l_c=35$ m時のときに曲げモーメントは、最大となり、 $1/4$ 点から

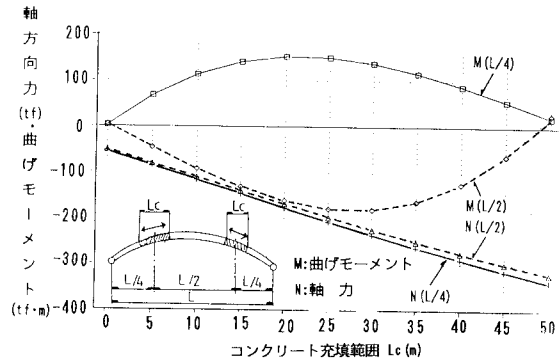


図-10 コンクリート充填範囲と断面力との関係（ $1/4$ 点から対称に充填した場合）

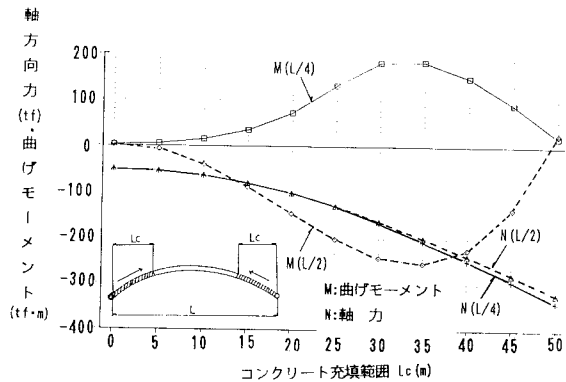


図-11 コンクリートの充填範囲と断面力との関係（支点部から対称に充填した場合）

対称に充填した場合と同様に、さらに充填範囲を広くするほど減少する。

以上のコンクリートの充填に伴う断面力の推移から判断すると、2 ヒンジアーチにおけるコンクリート充填範囲は、局部的に充填するよりも全長にわたって充填する方が、コンクリートを充填する鋼アーチとして有利な構造となる。

3. 2. 2 固定アーチにおける最適コンクリート充填範囲の検討

2 ヒンジアーチと固定アーチとについて、単位等分布荷重半載時の曲げモーメントと単位等分布荷重満載時との軸方向力を図-1 2 に示す。この図より、固定アーチの端部に発生する曲げモーメントは、固定アーチL/4点に発生する曲げモーメントに比べ、約2 倍の値を示すことがわかる。一方、2 ヒンジアーチにおいては、L/4点における曲げモーメントが固定アーチのL/4点における曲げモーメントの約 1.5 倍となる。一般に、両端部（図中、斜線で示した領域）を除いて、固定アーチの曲げモーメントは、2 ヒンジアーチに比べ小さい。また、固定アーチの軸方向力は、2 ヒンジアーチに比べ約 3% ほど小さい値を示す。以上の結果より、固定アーチにおいては、端部に発生する曲げモーメントは設計上厳しくなる。しかし、その他の位置における断面力は2 ヒンジアーチに比べ小さいことから、アーチリブ端部への部分的なコンクリート充填が、有利と思われる。

図-1 3 には、コンクリート充填に伴うスパン100m、ライズ比1/6の固定アーチ橋におけるスプリング部の設計曲げモーメント、軸方向力の推移を示す。図中の①～⑩は、コンクリート充填範囲Lcに対応するスパン方向の位置を示している。この図より、曲げモーメントは、充填範囲⑥Lc=30m（全長の60%充填）まで増加し、それ以降減少する。一方、軸方向力は充填範囲に比例して増加する。

図-1 4 には、通常の鋼アーチ橋として設計したスプリング部の断面にコンクリートを充填した断面の相関曲線（荷重分担率 $\gamma = 50\%$ ）を示す。図中の●印は、コンクリート充填範囲Lcをパラメータとした断面力を示す。すなわち、相関曲

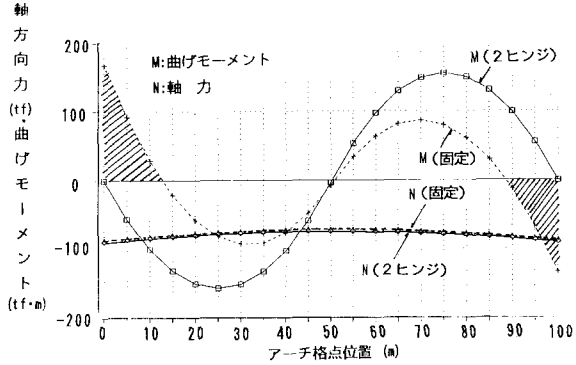


図-1 2 2 ヒンジアーチと固定アーチの断面力

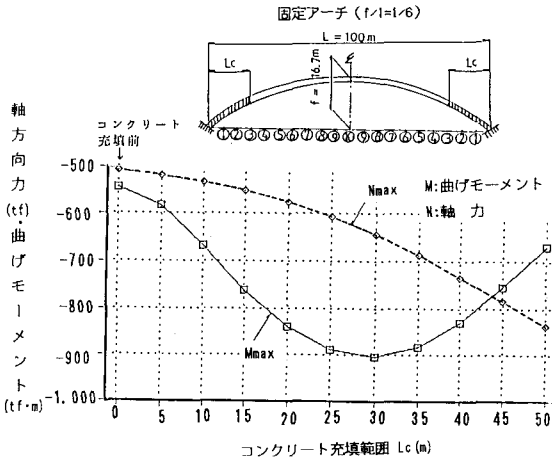


図-1 3 コンクリートの充填範囲と設計断面力の関係（固定アーチ）

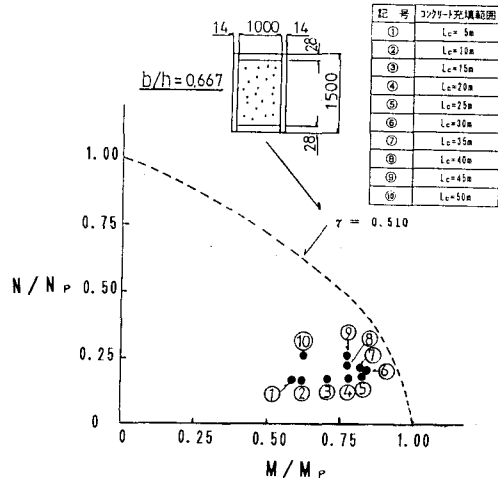


図-1 4 コンクリートの充填範囲と余剰耐荷力との関係（固定アーチ）

線からの距離が、通常の鋼アーチ断面に対する余剰耐荷力を示す。断面決定は、前述の2ヒンジアーチにおける試設計同様に、通常の鋼アーチ橋における断面と断面幅 b と断面高さ h とは同一とし、 b/h を変えずに板厚を変化させることにより、荷重分担率 γ を変えて、極力、満足すべき耐荷力に近い断面構成を繰返し計算によって求めている。この図より、端部から5m、または10mまで充填した場合と全長にわたって充填した場合は、通常の鋼アーチ断面に対し十分余裕があり、スプリング部における断面を減少できる可能性がある。一方、充填範囲 $l_c=25, 30$, および35mとした場合は、余裕があまりないことがわかる。

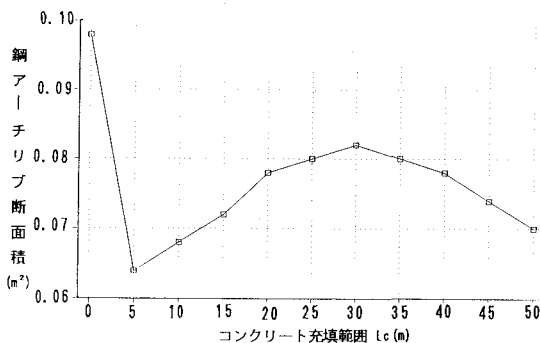


図-15には、コンクリート充填に伴うスプリング部の鋼アーチリブの必要断面積の変動を示す。

図-15 コンクリートの充填範囲とスプリング部鋼アーチリブ必要断面積（固定アーチ）

この図より、充填範囲5m（充填率10％）で 35％、

10m（充填率20％）で 30％、また全範囲充填（充填

率 100％）で 28％程度断面の減少が可能である。その他の充填範囲においては、これらの値に比べ減少率は小さく、充填範囲30m（充填率60％）のときに曲げモーメントが最大となり、効果が最も小さい。したがって、固定アーチにコンクリート充填する場合は、端モーメントが発生する部分、またはアーチリブ全長に充填するのが有利となる。

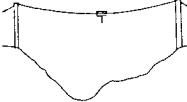
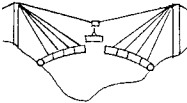
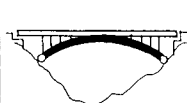
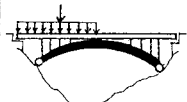
4. コンクリートを充填した鋼アーチ橋の架設工法に対する検討

ここでは、コンクリートを充填した鋼アーチ橋の架設工法について検討する。一般的には、表-2に示すように、鋼アーチリブを斜吊り工法等により架け渡した後、コンクリートを順次充填していく架設工法が考えられる。この工法を用いた場合、充填されるコンクリートの自重により鋼アーチリブには、コンクリート硬化後に残留応力が生じる。すなわち、合成柱の設計は、いわゆる活荷重合成の仮定となる。この残留する圧縮応力は、合成柱としてのアーチリブの設計においては不利となる。

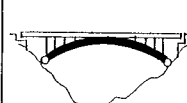
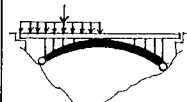
この残留応力を生じさせない架設方法を、表-3に示す。すなわち、アーチリブの直立時にコンクリートを充填し、コンクリート硬化後にロアリング工法により閉合する架設方法である。本架設工法を用いると、コンクリート自重による曲げモーメントの発生が極力小さく抑えられ、コンクリート硬化後、合成柱としての状態でアーチリブを閉合するために、合成効果を有効に活用できる。換言すると、この工法は、死活荷重合成柱と見なすことができる。そして、最大のメリットは、従来のコンクリートアーチ橋の架設工法として一般的であったセントル工法（オールステージング工法）を採用せずに、鋼アーチリブに生ずるコンクリートの自重の影響を著しく低減できることにある。

表-4には、架設工法の相違による2ヒンジでコンクリート充填した鋼アーチ橋の断面を比較した結果を示す。死活荷重合成した場合、従来の鋼アーチ橋に比べ、34％の鋼重低減が図れる。一方、活荷重合成とした場合は、鋼アーチリブに残留する圧縮応力のために合成効果がやや下がり、26％の鋼重低減となる。従来の鋼アーチ橋に比べ現場においてコンクリート打設作業が、新たに必要となる。しかし、総合的に経済性を評価した場合、コンクリートを充填した鋼アーチ橋の優位性が、この表からも見出せる。

表－２ 活荷重合成柱とした架設工法

架設ステップ	架 設 状 況	作業内容
STEP-1		ケーブルクレーン・斜吊りタワーの組立
STEP-2		斜吊り工法による鋼アーチリブの閉合
STEP-3		充填コンクリートの打設・養生 ↓ (合成柱)
STEP-4		支材、床組、床版の架設
STEP-5		活荷重載荷

表－３ 死活荷重合成柱とした架設工法

架設ステップ	架 設 状 況	作業内容
STEP-1		鋼アーチリブの搬入・組立
STEP-2		直立状態での充填コンクリートの打設・養生 ↓ (合成柱)
STEP-3		ローリング工法によるコンクリート充填鋼アーチリブの閉合
STEP-4		支材、床組、床版の架設
STEP-5		活荷重載荷

表－４ 架設工法の違いによるアーチリブ断面の比較

構造形式	鋼アーチ (現行)	死活荷重合成 コンクリート充填鋼アーチ	活荷重合成 コンクリート充填鋼アーチ
鋼アーチリブ 断面構成	2-Flg PL 1000×22 2-Web PL 1500×15	2-Flg PL 1000×15 2-Web PL 1500×9	2-Flg PL 1000×17 2-Web PL 1500×10
鋼アーチ断面積 (cm ²)	860	540	640
充填コンクリート 体積 (m ³ /本)	—	155	155
アーチリブ鋼重 (t/本)	69.5	43.7	51.7
アーチリブ断面比率 (減少率 (%))	1.00 (—)	0.66 (~34%)	0.74 (~26%)
鋼重減少 (t/本)	—	25.8	17.8

5. まとめ

コンクリートを充填した鋼アーチ橋の基本構造特性を調べ、試設計を通じ、以下の結果が得られた。

- (1) 2 ヒンジアーチでは、低ライズ化に伴い軸方向力は、ライズ比にほぼ反比例して増大する。曲げモーメントは、集中荷重載荷時、および等分布荷重半載時においては、ライズ比の影響がほとんど現れない。しかし、等分布荷重満載時においては、ライズ比が低くなるのに伴って増大する。
- (2) 固定アーチの断面力も、低ライズ化に伴い断面力は増大する。しかし、2 ヒンジアーチ橋に比べ、若干低めの増加率を示す。
- (3) スパン100mの2 ヒンジアーチ橋の試設計結果より、ライズ比の影響として充填コンクリートの自重が設計断面力に対し支配的になる。極端に低ライズ化した場合、とくにこの影響が顕著である。
- (4) コンクリートを充填した合成柱とし、アーチリブの耐荷力照査を行った結果、相関曲線の膨らみ部に位置するのは、ライズ比 $f/1=1/6$ 程度が適しい。そして、ライズ比が小さくなるのに伴って、この位置から離れる。

- (5) コンクリートを充填した鋼アーチにおけるアーチリブの鋼重減少率は、ライズ比が一般的な従来の $f/l=1/6 \sim 1/10$ に比べ、極端に低ライズ化した $f/l=1/12 \sim 1/15$ の方が小さい。したがって、低ライズ化したアーチでは、コンクリートを充填することの有意性が認められない。
- (6) 2 ヒンジアーチにおけるコンクリート充填範囲は、部分的に充填するよりも全長にわたって充填する方が曲げモーメントが減少し、有利となる。
- (7) 固定アーチは、2 ヒンジアーチに比べ大きな端モーメントが発生する。しかし、中間部の曲げモーメントは小さく、また軸方向力も若干小さくなる。このことから、アーチ全体への断面力に影響を及ぼさないアーチリブ端部にコンクリートの充填を行ない、合成アーチとすることにより、従来より鋼橋に多い2 ヒンジアーチに比べ、固定アーチを経済的に設計することが可能となる。
- (8) スパン100mの固定アーチ橋の試設計結果より、充填コンクリートの範囲が、設計断面力に対し支配的となる。そして、コンクリート充填によるスプリング部の鋼アーチリブの断面減少率は、充填範囲5m (充填率10%) で35%、10m (充填率20%) で30%、また全範囲充填 (充填率100%) で28%程度も期待できる。その他の充填範囲においては、これらの値に比べ減少率は小さく、充填範囲30m (充填範囲60%) のときに最も効果が小さい。
- (9) コンクリートを充填した2 ヒンジ鋼アーチ橋の架設においては、架設工法を工夫することにより、コンクリート充填に伴って鋼アーチリブに生ずる残留応力を小さく抑えることが可能である。すなわち死活荷重合成柱としての設計が十分に可能となり、現行の鋼アーチリブに比べ34%の鋼重低減が期待できる。

本報告は、新しい鋼・コンクリート合成橋梁の研究・開発を目的としたNCB研究会 (中井 博代表) の合成アーチワーキンググループによる検討結果をとりまとめたものである。御協力いただいた研究会関係各位に、深謝の意を表する。

参考文献

- 1) 中井 博・北田 俊行・吉川 紀：コンクリートを充填した鋼製角形柱の鋼板要素の一設計法，土木学会論文集 第356号/1-3，pp. 447～456，1985年4月
- 2) 中井 博・吉川 紀・古田 秀博：軸方向圧縮力と曲げを受ける長方形断面合成柱の一耐荷力解析，土木学会論文集 第374号/1-6，pp. 447～456，1986年10月
- 3) 阪神高速道路公団：合成柱 (充填方式) を有する鋼製橋脚の設計・施工指針 (案)，昭和61年3月
- 4) 井上・佐藤・登石：合成アーチ巻立て工法による城址橋の計画，橋梁と基礎，Vol. 22, No. 2, pp. 27～34，1988年2月
- 5) 山本・小林・佐川・遠山：合成アーチ巻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, pp. 2～10，1989年11月
- 6) 佐藤・佐川・小林：合成アーチ巻立て工法によるコンクリートアーチ橋の施工—城址橋—，コンクリート工学，Vol. 27, No. 6, pp. 16～27，1989年6月
- 7) 大浦・加藤・佐藤：鋼管コンクリート構造を架設用支保工に適用したコンクリートアーチ橋の施工と施工時実橋試験—合成アーチ巻立て工法—，構造工学論文集，Vol. 36A, pp. 1211～1222，1990年3月
- 8) 江花・斉藤・関根：旭橋の設計，施工—合成アーチ巻立て工法—，橋梁，Vol. 24, No. 7, pp. 8～19，1988年7月
- 9) 花田・登石・佐藤・酒井：奥名免橋の計画と設計，橋梁と基礎，Vol. 27, No. 5, pp. 15～21，1993年5月
- 10) 中井 博・吉川 紀・田中忠夫：コンクリート充填鋼ローゼ桁の特性，第17回日本道路会議論文集，pp. 792～793，昭和62年12月

(1993年9月16日受付)