

■調査・報告■

充腹式コンクリートアーチ橋の計画と設計

PLANNING OF BARREL TYPE CONCRETE ARCHES AND THEIR HISTORICAL DEVELOPMENT IN KYUSYU

小野正二*・丸山峯男**

By Masaji ONO and Mineo MARUYAMA

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物は、永久構造物として広く土木、建築の分野で使われてきた。戦後の復興期、高度経済成長期を経て建設産業の成長に伴い、コンクリート構造物の質量も飛躍的に伸びるとともに、良質な骨材の確保難、海砂の使用、環境問題に伴うセメント製法の変遷、ならびに管理対象となるコンクリート構造物の数が増えてきたこととあいまって、コンクリート構造物の劣化が各方面で問題とされるようになってきている。

土木分野におけるコンクリート劣化の事象としては鋼橋コンクリート床版の破損、海岸部における塩害による鋼材腐食等がある。前者は、圧縮に強く引張りに弱いコンクリートの材料特性からきたものであり、後者は環境に起因するものといえよう。

本文は、主として前者に代表されるコンクリートの劣化に対して、従前、材料面あるいは設計施工面での対策に終始していたものを、橋梁計画面から、コンクリートの特性に合った橋梁形式を検討してコンクリートの劣化を防止してその耐久性を上げようとするものである。

今回、検討を行った充腹式コンクリートアーチ橋とは、アーチリブの両側端に側壁を造り、中に土砂を詰めた構造のアーチ橋である。この形式のアーチ橋は、ヨーロッパの各地に数多く造られてきた。日本では九州に数橋が見受けられるが、橋梁の歴史の中では

忘れ去られた存在となっている。石造りアーチ橋からプレストレストコンクリート橋あるいは鋼橋のようないわゆる近代的な橋梁への過渡期に現われた橋梁形式である。不静定次数が高く解析が複雑になるが、死荷重載荷時に全断面圧縮部材となるためコンクリート構造物としては優れた構造形式である。

九州には多数の石橋がありその延長としての充腹式コンクリートアーチ橋も数例現存している。石橋から充腹式コンクリート橋への変遷を述べ、現存するアーチ橋のいくつかを紹介するとともに、多径間連続充腹式コンクリートアーチ橋の適用条件を検討して骨組構造理論および骨組相似法立体解析により設計を行ったのでここにその概要を紹介する。

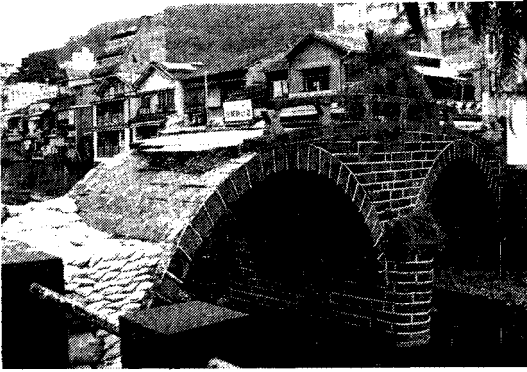
2. 九州の充腹式アーチ橋

充腹式アーチ橋の原型は石橋にある。日本最古の石橋は長崎市の中島川にある眼鏡橋で、今から350年前の1634年に唐僧如定によって架けられた。この眼鏡橋は、昭和57年の長崎大水害で、下からは浮力、横からは巨大な水圧を受けるという石造りアーチにとっては最も危険な状態になったにもかかわらず、土留石積の一部を流出しただけで、主体アーチ部は損傷を受けず、アーチの耐力の大きさを如実に示した(写真-1)。

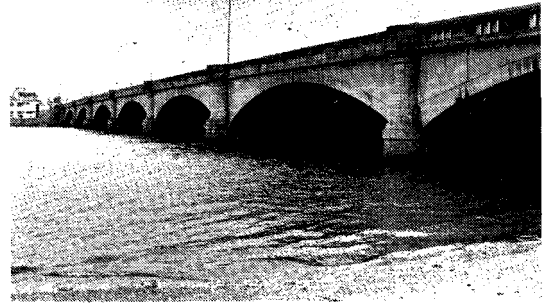
九州の石橋が最も数多く造られたのは1800年代の熊本県と鹿児島県である。1800年代に両県だけで200橋にのぼる石橋が造られ、その中には、1847年に完成した日本最大の石橋である全長90m、支間長28mの霊台橋、1854年に完成した支間長27.3mの潤通橋、また1845年から1849年にかけて名工岩永三五郎が甲突川に

* 正会員 日本道路公団構造技術課課長代理
(〒102 千代田区麴町5-7-2)

** 正会員 日本道路公団福岡建設局構造技術課課長代理
(〒810 福岡市中央区天神2-13-7)

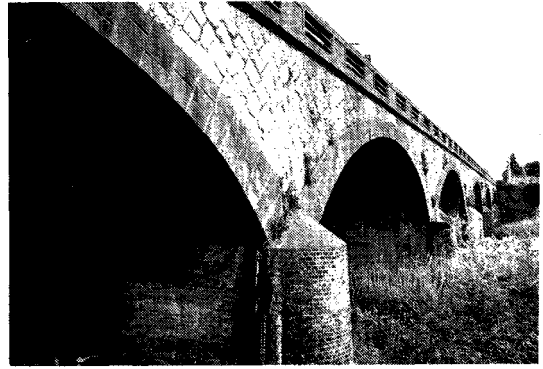


写真一 長崎眼鏡橋（昭和57年7月大水害直後）

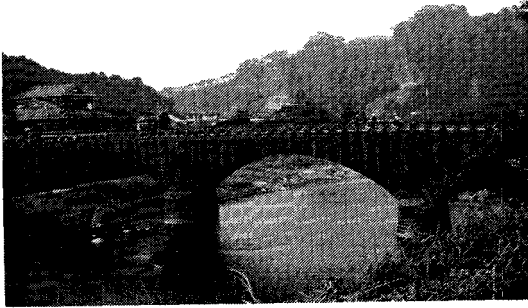


写真一四 名島橋

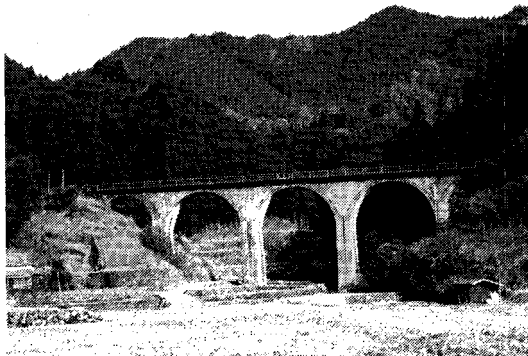
連続して架橋した鹿児島五大石橋などの名橋が含まれている。特に通潤橋は水路橋でサイホンを利用するなど世界にも類例のない日本独特の技術で設計施工されており九州の石橋の技術水準の高さを示している。明治以後も石橋の建設は九州各地で行われた。大分県の山国川に大正年間に連続して架けられた耶馬溪橋、らんじ橋、馬溪橋は、それぞれ8径間、3径間、5径間と径間数を異にする優美な石橋群である。最も支間の長いらんじ橋



写真一五 城井川橋



写真一三 らんじ橋



写真一三 日田彦山線アーチ橋

を写真一三に示す。

九州の充腹式コンクリートアーチ橋は鉄道橋に数多くみられる。日田彦山線鉄道橋群は開通後28年を経たもので同線に4橋が連続して架けられている。現地を目視調査を行ったがクラックも見当らず健全であった。写真一三に日田彦山線アーチ橋を示す。道路橋の例としては1933年（昭和8年）に完成した国道3号に架かる名島橋がある。本橋は1923年（大正12年）に完成した充腹式コンクリートアーチ橋である西鉄名島アーチ橋と並行する全長204m、支間長29mの7径間連続の充腹式アーチ橋である。写真一四に名島橋を示す。現地を目視調査を行ったが、右岸側の6径間はきわめて健全で補修の跡も見受けられなかったが、左岸側側径間は補修跡が見受けられた。右岸側6径間は井筒基礎であるが左岸橋台だけが木杭基礎であるため橋台が変位したためではないかと推測される。また、国道10号には、1943年（昭和18年）に完成した全長85.6m、支間長14.2mの6径間連続の城井川橋がある。アーチリブが無筋コンクリートで土留に石積を用いているのが特色である。城井川橋を写真一五に示す。第二次大戦末期に造られたため鉄筋もなくやむを得ず無筋コンクリートのアーチ橋としたものと推測

されるが、交通量の多い国道に41年を経た現在でも有害なひびわれもみられず良好な状態であった。城井川橋は充腹式アーチ橋の耐久性を示す好例といえよう。

3. 多径間連続充腹式アーチ橋の計画と設計

(1) 適用条件

九州の実例にみるように充腹式アーチ橋は耐久性に優れた構造形式といえる。この耐久性の一因は中詰土砂にある。アーチリブ上に土砂を入れることにより、

- ① 死・活荷重が直接アーチリブ上に載り、死荷重時では全断面圧縮応力状態となること
- ② 中詰土砂により、活荷重の衝撃が緩和されるとともに、荷重が分散されること
- ③ 支承、伸縮継手等の維持管理上の弱点となりやすい橋梁付属物が不要となること

等が長所になる。鉄筋コンクリート床版の損傷原因は、従来、重車両の繰返し載荷による曲げひびわれが発達して生じる疲労破損と考えられてきたが、最近になって、乾燥収縮等により床版の上下面に初期ひびわれが入り、舗装から浸透した水と移動集中荷重の繰返し載荷によりひびわれが擦り減り磨耗して拡大し、鉄筋の発錆膨張によるコンクリートのはく落、最終的には押し抜きせん断あるいは鉄筋の疲労破断へと劣化が進んでいくのでは

ないかという見方が強まっている。充腹式アーチ橋は、アーチアクションによりモデレートプレストレスを導入したのと同様の効果を得て乾燥収縮による初期ひびわれの防止ができることも耐久性のあることの一因と思われる。また、温度変化によるアーチリブの伸縮が各アーチ間で拘束されるため上下の変位になり、理論上無限に連続することも可能である。一方、死荷重が卓越しているため支間長が制限されること、側壁、アーチリブ、下部工が一体のため解析、計算が複雑なことが短所となろう。

他の橋梁形式との経済性、施工性を比較検討して、充腹式アーチ橋の適用条件を以下のようにした。

- ① 橋面高30m前後で、支間長20~30mの範囲が経済的である。
- ② 地震時水平力を支えるため、両端が強固な山腹に支持されていることが必要である(橋台高は15mまでとする)。
- ③ 支保工施工が前提であり、交通量の多い道路、あるいは鉄道と交差する場合は不適當である。

(2) 骨組構造理論による設計

適用条件を考慮して、10径間連続のアーチ橋を計画し、骨組構造理論により設計した。側面図を図-1に、断面図を図-2に示す。また、完成時のフォトモンタージュを写真-6に示す。断面図に示すようにアーチリブの両側端に側壁を立て、土砂を詰め、舗装を施す。排水は、現場打円形水路でとり、橋梁前後の土工区間で排水す

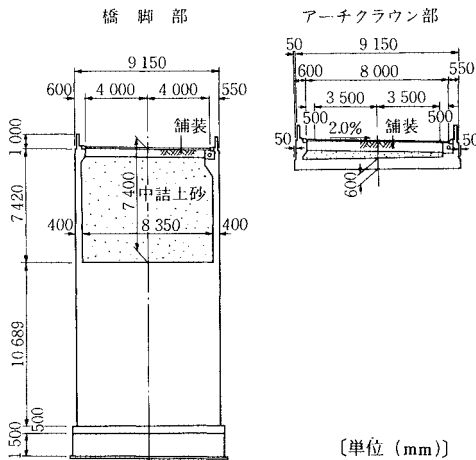


図-2 断面図

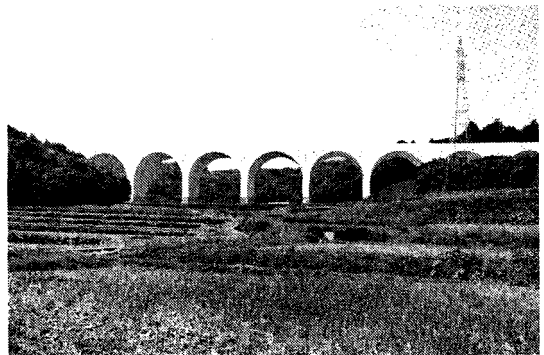


写真-6 多径間連続充腹アーチ橋
(フォトモンタージュ)

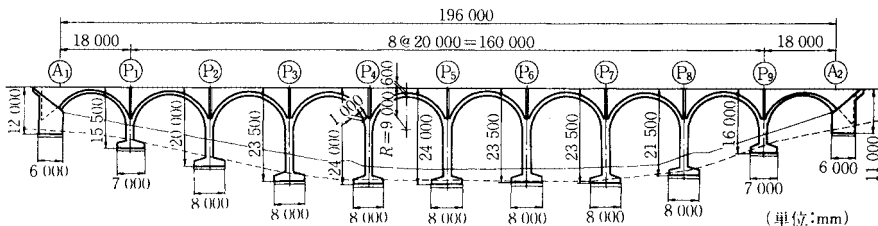


図-1 側面図

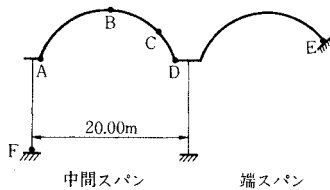
表一 設計条件

橋長	196 m 000	桁長	196 m 000
道路規格	3種1級		
荷重	TL-20		
支間	18 m 000+8 @ 20 m 000+18 m 000		
有効幅員	8 m 000	斜角	90°
地震係数	$K_a=0.13$	$K_{am}=0.16$	
土圧	アーチ：静止土圧，側壁：クローン土圧		
コンクリート	$\sigma_{ck}=240 \text{ kg/cm}^2$ (23.52 MPa)		
鉄筋	SD-30, $\sigma_{sk}=1800 \text{ kg/cm}^2$ (176.4 MPa)		
温度変化	$\pm 15^\circ\text{C}$ ，乾燥収縮 15×10^{-5}		

表二 断面決定結果一覧表

[単位：t・m (KN・m)]

格点記号	荷重の組合せ	曲げモーメント (常時換算値)	断面形状
			鉄筋量
A	地震時+温度下降+乾燥収縮	596t・m (5840.8kN・m)	9.20m×1.00m D25@150 1段
B	常時+温度下降+乾燥収縮	158t・m (1548.4kN・m)	9.20m×0.60m D19@150 1段
C	地震時+温度下降+乾燥収縮	392t・m (3841.6kN・m)	9.20m×0.89m D25@150 1段
D	地震時+温度下降+乾燥収縮	721t・m (7065.8kN・m)	9.20m×1.00m D25@150 1.5段
E	地震時+温度下降+乾燥収縮	468t・m (4586.4kN・m)	9.20m×0.87m D25@150 1段
F	地震時	2515t・m (24647kN・m)	9.20m×2.00m D32@150 1段



に落とすため、橋梁区間では橋脚に沿って外に落とす排水管を設けていない。

設計条件を表一に示す。全体を約200の節点に分割し、骨組構造により解析した。活荷重はTL-20を影響線載荷したが、中詰土砂による荷重分散は考慮せず、活荷重を直接アーチリブに載荷して計算した。側壁は、アーチリブの各節点に荷重として考慮し、アーチリブの断面剛性に考慮しなかった。各断面を決定した荷重の組合せと断面力、断面形状、鉄筋量を表二に示す。また配筋図の一例を図一三に示す。

計算結果を要約すると、

① アーチクラウンは、常時死活荷重載荷時に乾燥収縮と温度変化を考慮した荷重状態で決定され、アーチスプリングは、地震時に乾燥収縮と温度変化を考慮した荷重状態で決定された。

② 不静定構造のため2cmの支点不等沈下を考慮したが、断面決定の要因とはならなかった。

③ 常時状態の曲げモーメントと軸力に対する活荷重の分担率は、

(a) 曲げモーメント

スプリング： $M_i/M_b+L=53\%$

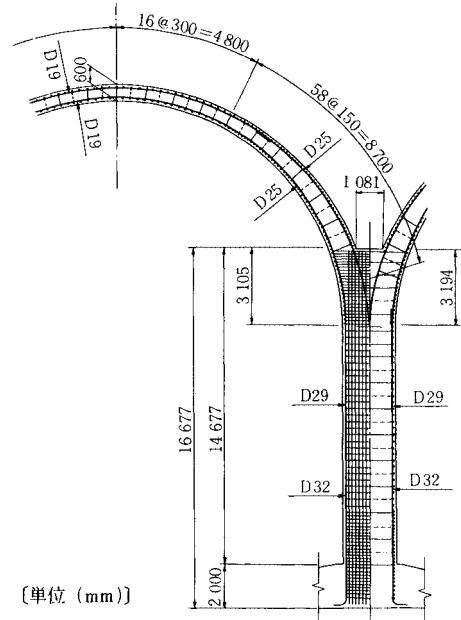
クラウン： $M_i/M_b+L=79\%$

(b) 軸力

スプリング： $N_i/N_b+L=9\%$

クラウン： $N_i/N_b+L=13\%$

となっている。



図一三 概略配筋図

(3) 骨組相似法による立体解析

充腹式アーチ橋は、側壁とアーチリブが剛結された構造となっており、側壁のアーチ・スプリング部分には伸縮目地が設けてある。また、幅員も広いので、これを立体構造として考えると、目地と上縁に自由辺をもつ変断面異型壁と主版である変断面シェルが剛結した構造とみなされ、設計上、

① 側壁の面内拳動が主版の曲げと軸力をどのように拘束するか。また、その有効な範囲はどこまでか。

② 側壁による鉛直力、ならびに土圧によって伝達されるモーメントが主版に及ぼす影響の範囲はどこまでか。

などの問題点を生ずる。

そこで、以上の観点から立体解析を行うことにし、解析の対象として橋脚上に固定条件を想定した1径間を抽出し、外力として次のものを考慮した。

①死荷重+活荷重，②主版に作用する水平方向土圧，

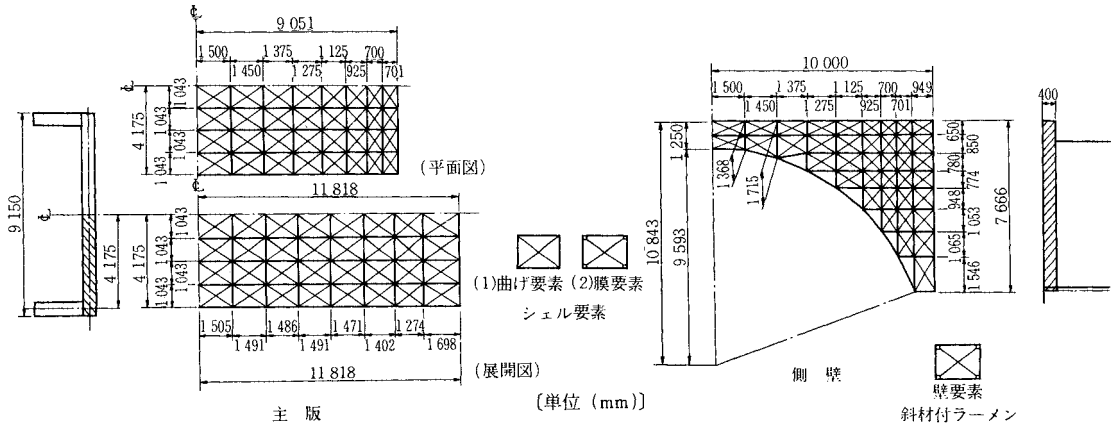


図-4 骨組相似モデル

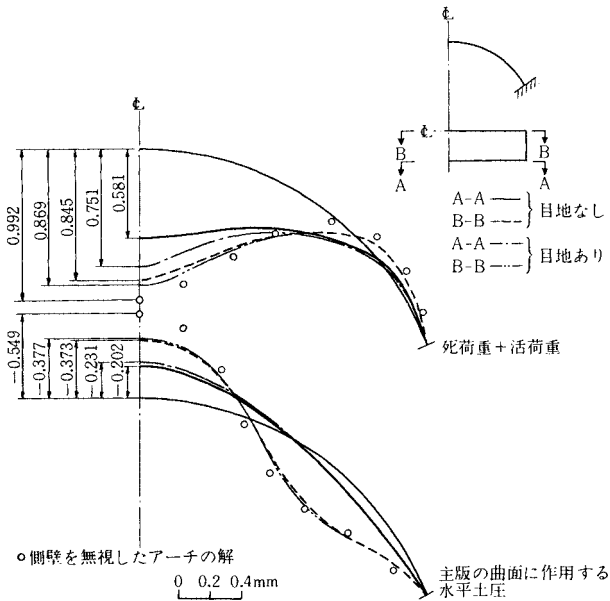


図-5 主版の変形

③側壁の土圧により主版に作用するモーメント。

なお、側壁中央の目地の有無も比較検討の対象としたので、解析は6ケースである。

解析の方法としては、前述の骨組理論によるアーチの基本的設計法との対応を考慮し、骨組相似法を採用した。この方法は元来、Alan L. Yettram らによって開発された原理を応用したもので、本解析の場合、離散化された板要素として、側壁はラーメンとトラス斜材、主版はさらに、ラーメンに面外曲げねじり剛性、斜材に曲げ剛性を付加したものに置換される。図-4に本解析の相似モデルを示す。

図-5に主版の変形、図-6に死活荷重による主版の軸方向曲げモーメントの分布、図-7に同じく軸方向力

の分布、図-8に静止土圧を受ける場合の主版の軸方向曲げモーメントの分布、図-9に側壁の土圧によって伝達されるモーメントによる主版の幅員方向の曲げモーメントの分布をそれぞれ示した。

前述の6ケースの立体解析のデータと、側壁を考慮しないアーチの解(以下、基本値という)を比較検討し次の結果を得た。

① 主版の変形は、基本値に比べて減少し、その減少の度合は、幅員の中央よりも側壁との結合部分の方が大きい。

② 主版の軸方向力は、基準値よりも小さいかほぼ等しく、側壁との結合部分(幅員の約1/8区間)では特に側壁に向かうにつれ、その補剛効果が現われ、断面力の急激な減少をみる。また側壁の中央に目地を設けた場合は、近傍部分のみ補剛効果が失われ、断面力の減少が緩やかになる。

③ 主版の軸方向曲げモーメントは、主要点においてはほぼ基準値に等しく、側壁中央の目地の有無はあまり影響しない。ただし静止土圧を受ける場合の橋脚上に想定した固定辺でのみ若干基準値より増大する。

④ 側壁に作用する土圧によって主版の側辺に伝達されるモーメントの影響は、主版の幅員中央に向かって緩やかに減少する。

以上の検討結果に基づき、本橋の設計方針を以下のように立案した。

① 主版の主要な断面力である橋軸方向軸力、曲げモーメントは、側壁を無視した骨組理論による多径間アーチの設計値を用いれば安全側である。ただし、静止土圧を受ける場合の固定辺の幅員中央部分約1/3区間の曲げモーメントを20%増しとして設計するのが望まし

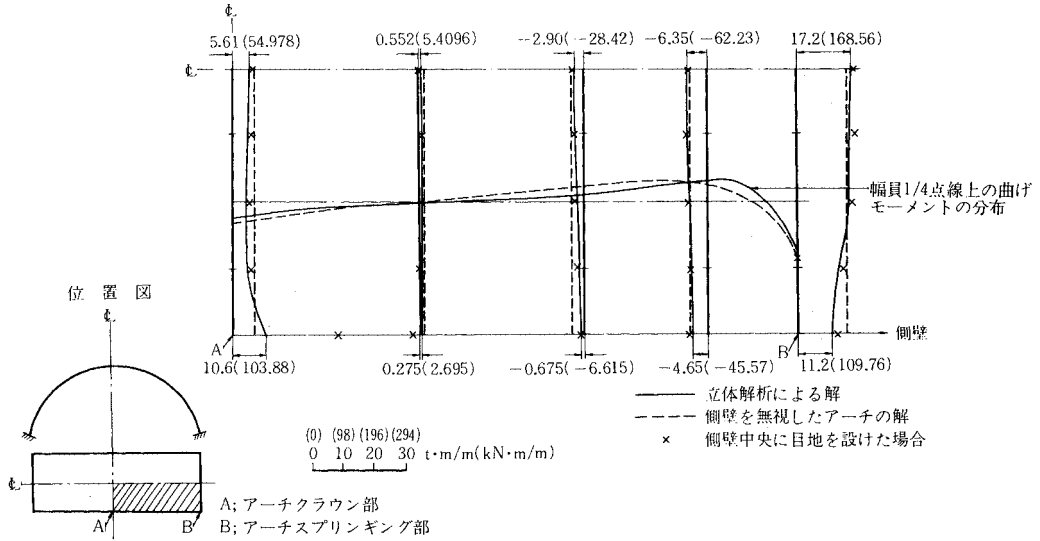


図-6 死荷重+活荷重による主版の軸方向曲げモーメントの分布

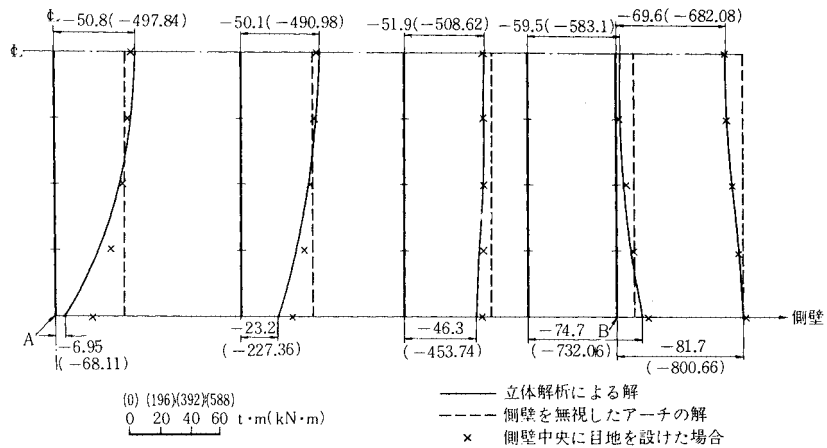


図-7 死荷重+活荷重による主版の軸方向力の分布

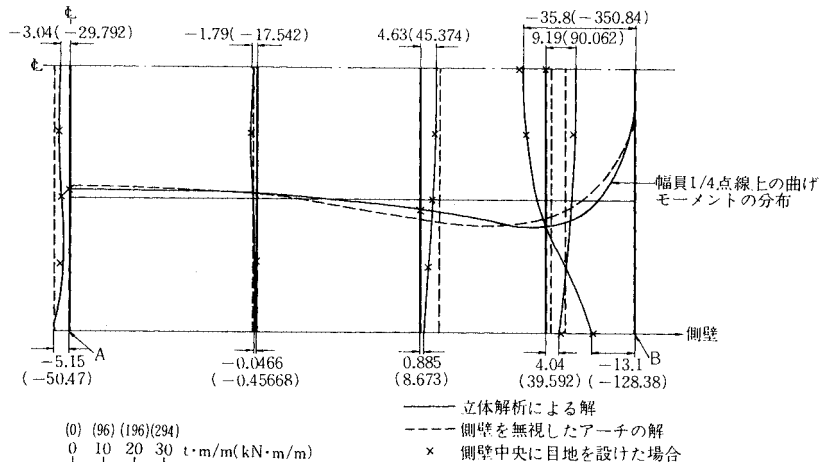
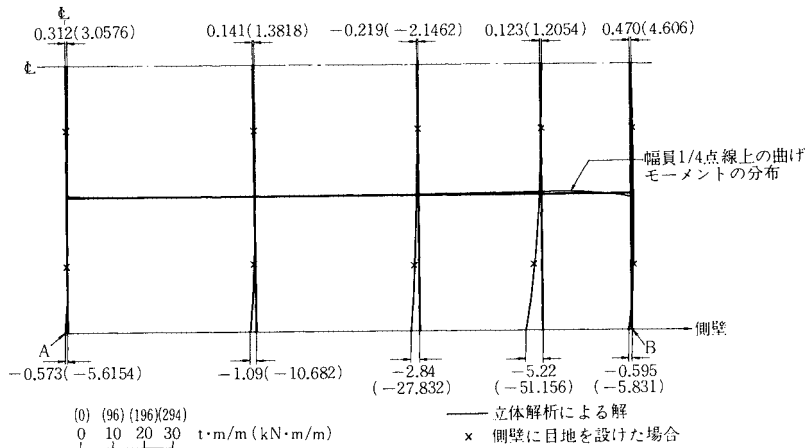


図-8 主版の曲面に作用する水平土圧による主版の軸方向曲げモーメントの分布



図—9 側壁の土圧による主版の幅員方向曲げモーメントの分布

い。

② 主版の幅員方向の曲げモーメントについては、配筋で十分負担できると思われる。

③ 側壁の断面力、主応力は、アーチの法線方向に計算して配筋できる。

4. おわりに

長崎の眼鏡橋から始まった九州の石橋の歴史は、大正に入って耶馬溪橋へ、昭和に入ってコンクリートアーチになり、名島橋、城井川橋、日田彦山線橋群へと発展してきた。その後、鉄筋コンクリート床版橋やプレストレストコンクリート橋が普及し始めると橋梁史から姿を消した。コンクリート構造物の耐久性や橋梁の維持補修が話題になる昨今、新たに耐久性やメンテナンスフリーの観点から充腹式アーチ橋を見直して計画し設計を行ってみた。現代のプロメテウスの火であるコンピューターの著しい発展普及がこの古い形式の橋をよみがえらせたといえよう。骨組相似法による立体解析で検討したように、充腹式アーチ橋は、骨組構造理論で設計すれば十分安全であり、適用条件は限られるが、道路が山腹を横過するような場合には、いくつかの適地が見つかるのではないと思われる。

本文の執筆は、九州の石橋およびコンクリートアーチ

橋に土木史的価値と構造物としての合理性を見出していたいただいた東京大学生産技術研究所の小林一輔教授の数々の有益なご助言と温い励ましを頂いて初めて行えたものである。骨組相似法による立体解析は、大阪工業大学土木工学科の岡村宏一教授から有益なご助言を頂き、大和設計(株)寺村務氏の協力により行った。充腹式アーチ橋の計画および設計は、日本道路公団谷和原管理事務所長(前・技術部構造技術課長)御子柴光春氏のご指導による。また、日本道路公団福岡建設局の今村浩三局長からも適切なお助言を頂いた。ここに記して深謝する。

参考文献

- 1) 後藤祐司：鋼橋 RC 床版の破損機構に関する一考察，橋梁と基礎，Vol. 7, No. 8, 1983.
- 2) 太田静六編：九州のかたち—眼鏡橋，西洋建築，西日本新聞社。
- 3) 山口祐造：石橋物語(上・中・下)，土木施工管理技術研究会。
- 4) Yettram, A. L. and Husain, H. M. : Grid-Framework Method. for Plates in Flexure, Proc. ASCE, Vol. 91, NO. EM 3, pp. 53~64, 1965.
- 5) Yettram, A. L. and Husain, H. M. : Plane-Framework Method. for Plates in Extension, Proc. ASCE, Vol. 92, NO. EM 1, pp. 157~168, 1966.

(1984. 5. 10・受付)