

下路式ローゼ橋における上部プロポーシヨンの一考察

中央復建コンサルタンツ株式会社 ○ 渡 辺 秀 斗
中央復建コンサルタンツ株式会社 森 彩
中央復建コンサルタンツ株式会社 川 副 孝 行

論文要旨

本考察では、上下線が並列する下路式ローゼ橋のプロポーシヨンの検討を行った。構造の煩雑さの軽減を目的に、上横構を省略した形式(以降、ポニー形式と呼ぶ)を計画した。ポニー形式特有の上横構がないことによる構造上の懸念や面外座屈による影響、耐荷性及び耐震性について検討を行った。また、張出し歩道を有する対象橋梁が左右非対称構造で左右のアーチリブ断面力に違いがあることに着目し、ポニー形式の特徴を活かすことができるアーチライズを揃えないプロポーシヨンの可能性について検討を行った。

キーワード：ポニー形式、面外座屈、アーチライズ、非対称構造、プロポーシヨン

まえがき

近年、高度経済成長期に建設された橋梁の老朽化に伴い、更新事業が増加している。更新にあたっては、建設当時からインフラの整備が進んだことで、交差条件や桁高制限等、建設時より厳しい制約条件が強られる。また、交通量が多い幹線道路上の橋梁の場合、通行止めが困難なこと等、施工上の厳しい制約を受ける。

このような背景のもと、対象橋梁は、支間約40mの3径間の既設上路桁を運河内に橋脚を設置せずに、1径間の支間100m超の下路式ローゼ橋に架け替えるものである。都市部の橋梁のため、上下線の片側で現道交通を確保しながらの架け替えとなる関係で、上下線を分離構造で並列配置とする必要があった。ここで、既設上路桁から路面上の構成部材が多い下路桁かつ並列橋への変更は、景観の改変度合いが大きくなることから、景観への配慮を踏まえた下路式ローゼ橋のプロポーシヨンを計画することが課題となった。

上記課題に対して、従来形式で設けられる上横構を省略し、左右のアーチリブを独立させたポニー形式が煩雑さを軽減する構造になると考え、論文では、ポニー形式の構造検討とその構造を活かしたプロポーシヨン検討について報告する。

1. 対象橋梁

対象橋梁は橋長121.00mの鋼単純下路式ローゼ橋(支間長118.10m)である。上下線が分離断面となっており、車線数は片側3車線、有効幅員は車道部11.25m、歩道4.00m、片側総幅員は20.30m、平面線形は $R=\infty$ である。桁下を運河が横過するため(航路制限高AP+6.000)、桁高の制限を受ける。

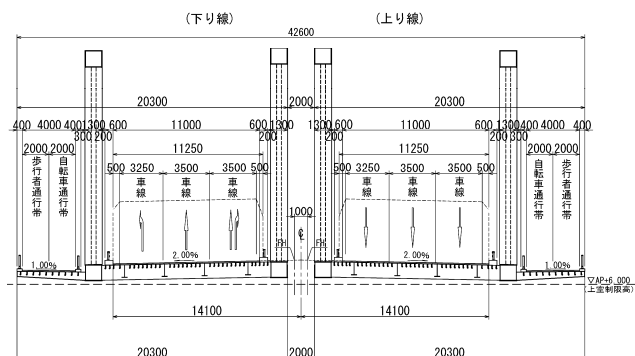


図-1 横断面

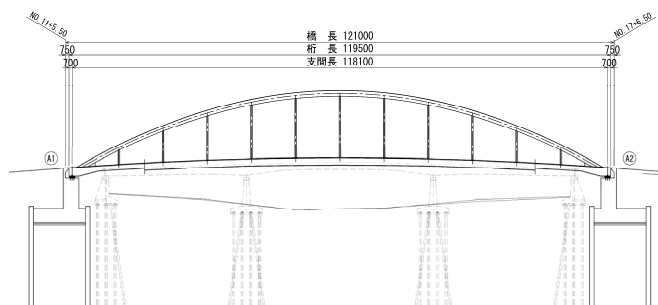


図-2 側面図(破線は既設橋)

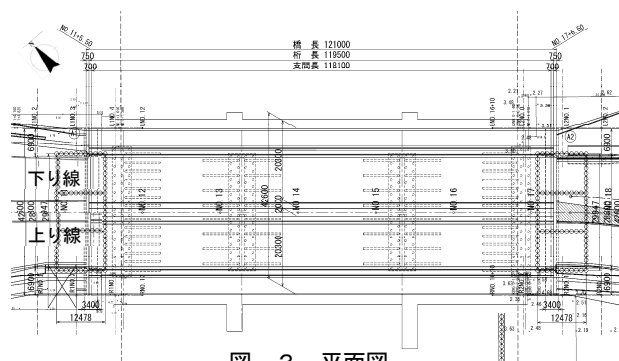


図-3 平面図

2. ポニー形式ローゼ橋の構造検討概要

(1) 検討方針

上横構を設けないポニー形式の場合、面外方向の座屈が生じやすいため、常時及び地震時の耐荷性能が低いことが想定される。そのため、面外座屈が構造に与える影響を確認するために、面外座屈の照査をする場合としない場合での断面力性状や必要断面を対比した。なお、以降の検討は、張出し歩道部の荷重を見込む作用荷重の大きい歩道あり側の補剛桁及びアーチリブを対象とする。

(2) 解析モデル

本橋は、左右2面のアーチで構成される直線橋である。常時の断面力の算出は、平面骨組モデルを用いて鉛直荷重(死荷重+活荷重)を1-0分配法により、各アーチ面に分配させる手法を用いた。

補剛桁の外形寸法は、航路制限高や製作性を考慮し、高さを1.1m、幅を1.2mとした。また、アーチリブの外形寸法は、箱内での製作性を考慮し、高さを1.2m、補剛桁との接合部における製作性を考慮し、幅を1.2mとした。

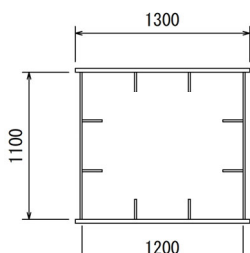


図-4 補剛桁断面

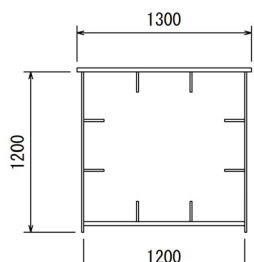


図-5 アーチリブ断面

(3) 面外座屈の照査をしない場合のアーチリブ断面

a) 断面力性状

歩道あり側のアーチリブの断面力性状を下図に示す。補剛桁及びアーチリブの曲げモーメントは1/4点付近が大きく、軸力はアーチリブで支点付近が最も大きいという性状を確認した。

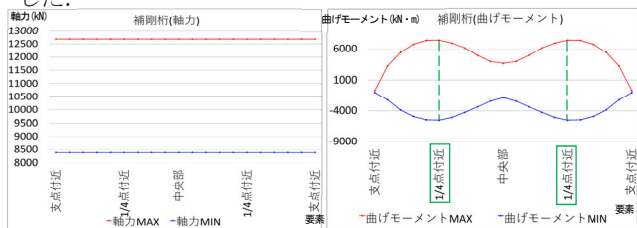


図-6 補剛桁 軸力分布図

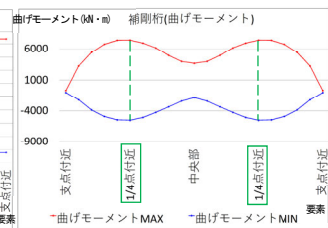


図-7 補剛桁 曲げモーメント分布図

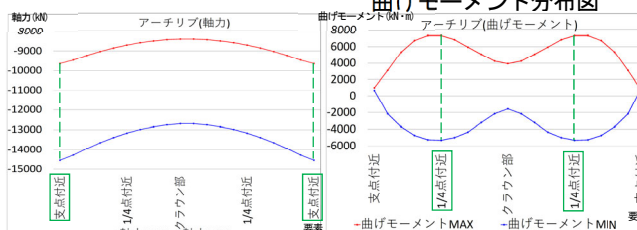


図-8 アーチリブ 軸力分布図

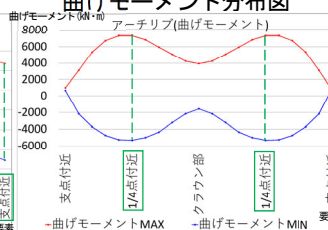


図-9 アーチリブ 曲げモーメント分布図

b) 必要断面

面外座屈の照査をしない場合のアーチリブの必要断面と応力状態を下表に示す。アーチリブは、死荷重と活荷重の鉛直荷重に対し、フランジで断面力に抵抗する断面(1/4点付近でフランジ厚 $t=46\text{mm}$)となった。

表-1 面外座屈の照査をしない場合の断面形状

部材	t (mm)			A (mm ²)	I _y (mm ⁴)
	U-Flg	Web	L-Flg		
支点付近	33	14	33	0.116	2.58×10^{10}
1/4点付近	46	12	46	0.144	2.86×10^{10}

(4) 面外座屈の照査をする場合のアーチリブ断面

a) 照査方針

上横構がないポニー形式の座屈固有値 λ_{out} を算出するために、固有値解析を行った。そこから求めた有効座屈長 L_{ei} をもとに面外座屈の照査を行った。

- 有効座屈長算出式

$$L_{ei} = \pi \sqrt{\frac{EI_i}{\lambda_{OUT} N_i}} \quad (\text{道示II 式 14.4.4})^{1)}$$

- 応力度照査式

$$N_i/A_i \leq 0.85 \sigma_{ca} \quad (\text{道示II 式 14.4.5})^{1)}$$

ここに、

λ_{out} : 座屈固有値

L_{ei} : 断面 i の有効座屈長 (m)

E : ヤング率 (kN/m²)

I_i : 断面 i の鉛直軸周り断面二次モーメント (m⁴)

N_i : 断面 i の作用軸力 (kN)

A_i : 断面 i の断面積 (m²)

σ_{ca} : 許容軸方向圧縮応力度 (kN/m²)

b) 固有値解析

有効座屈長 L_{ei} を左右それぞれのアーチの座屈固有値 λ_{out} から求めるために、三次元立体モデルを用いて固有値解析を行った。解析に考慮する荷重は、死荷重とアーチリブに最大軸力が発生する下図の活荷重載荷とした。

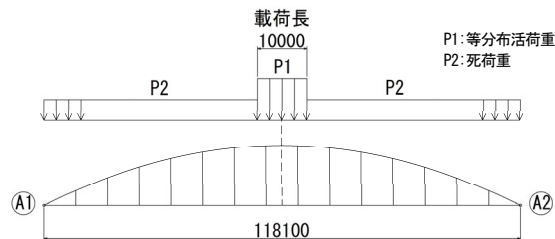
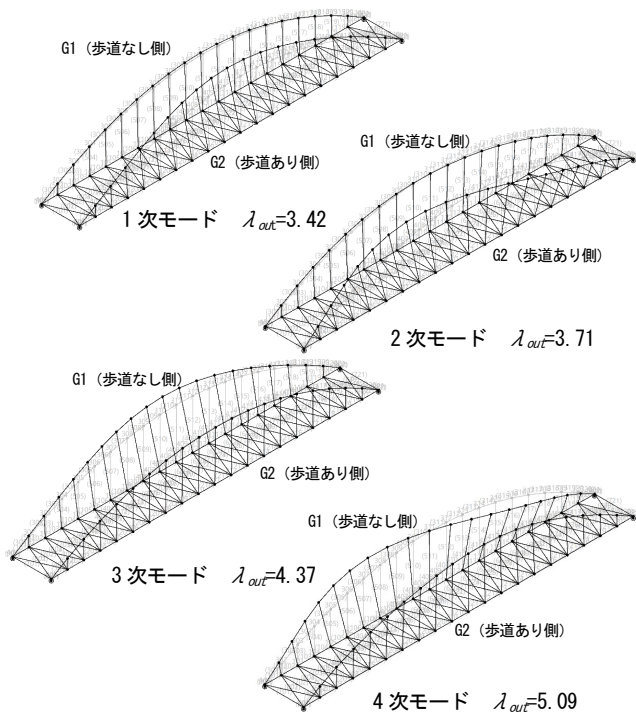


図-10 載荷状態

解析の結果、歩道あり側と歩道なし側のアーチリブが面外座屈するモードは低次のものをそれぞれ選択すると、歩道あり側のアーチリブが1次モード ($\lambda_{out}=3.42$)、歩道なし側が3次モード ($\lambda_{out}=4.37$) となった。



図一 1 1 座屈モード図

c) 面外座屈の照査

面外座屈の照査結果を下表に示す。1/4 点付近の有効座屈長 L_{ei} は歩道あり側で 48.7m, 歩道なし側で 48.4m と同程度となった。これは、座屈固有値 λ_{out} は歩道あり側のほうが小さいが、軸力は歩道あり側のほうが大きいことが起因している。面外座屈に対する照査は、許容軸方向圧縮応力度 σ_{ca} が歩道あり側で 66.7 N/mm², 歩道なし側で 67.0N/mm² となり、歩道あり側の方が軸力が大きいため、面外座屈に対する照査が厳しい結果となった。また、軸方向圧縮力を許容値に収めるためには、面外座屈の照査なしの場合に対して断面積を支点付近で約 1.8 倍、1/4 点付近で約 1.6 倍に増加させる必要がある。以上より、ポニー形式の断面を決定する際は、面外座屈が支配的となることを確認した。

表一 2 面外座屈の照査結果

箇所	E (kN/m ²)	I _y (m ⁴)	A (m ²)	r _y (m)	λ_{out}	
歩道あり側	支点付近	2.0E+08	0.0514	0.2010	0.506	3.42
	1/4点付近	2.0E+08	0.0507	0.2180	0.482	3.42
歩道なし側	支点付近	2.0E+08	0.0514	0.2010	0.506	4.37
	1/4点付近	2.0E+08	0.0507	0.2180	0.482	4.37
箇所	N (kN)	L _{ei} (m)	I/r	b (mm)	t (mm)	
歩道あり側	支点付近	13200.9	47.424	93.7	400.0	30.0
	1/4点付近	12369.8	48.616	100.9	400.0	36.0
歩道なし側	支点付近	9806.2	47.230	93.4	400.0	30.0
	1/4点付近	9194.7	48.386	100.4	400.0	36.0
箇所	σ_{ca} (N/mm ²)	σ_c (N/mm ²)	0.85 σ_{ca} (N/mm ²)	比率	判定	
歩道あり側	支点付近	84.5	65.7	< 71.8	0.91	OK
	1/4点付近	78.5	56.7	< 66.7	0.85	OK
歩道なし側	支点付近	85.1	51.8	< 72.3	0.72	OK
	1/4点付近	78.9	44.8	< 67.0	0.67	OK

ここに、

- I_y : 面外剛度 (m⁴)
- A: 断面積 (m²)
- r_y : 断面二次半径 (m)
- b: 板の固定縁間距離 (mm)
- t: ウェブの板厚 (mm)
- σ_c : 軸方向圧縮力 (N/mm²)

表一 3 面外座屈の照査をしない場合及びポニー形式の断面形状

部材	t (mm)			A (mm ²)	I _y (mm ⁴)	
	U-Flg	Web	L-Flg			
面外座屈の照査なし	支点付近	33	14	33	0.116	2.58 × 10 ¹⁰
	1/4点付近	46	12	46	0.144	2.86 × 10 ¹⁰
ポニー形式	支点付近	36	30	36	0.201	5.14 × 10 ¹⁰
	1/4点付近	33	36	33	0.218	5.07 × 10 ¹⁰

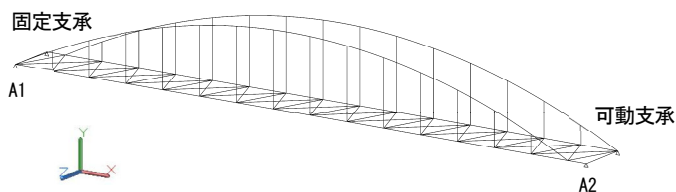
(5) 動的解析による耐震照査

a) 照査方針

ポニー形式の地震時の動的特性を確認するために、レベル 2 地震動に対する橋梁全体での動的解析(時刻歴応答解析)を実施した。入力地震動は、道路橋示方書・同解説 V 耐震補強編の「Ⅲ種地盤の標準波形(タイプ I, タイプ II)」²⁾ を使用した。また、振動特性を確認するために、固有値解析を実施した。減衰モデルは、非線形動的解析での使用実績が多いレイリー減衰を用いた。部材要素ごとの減衰定数は、上部構造は 0.02, 橋台は 0.05, 地盤ばねは 0.20 と仮定した。

b) 解析モデル

動的解析に用いる三次元立体骨組モデルを以下に示す。上部構造は、各部材を線形はり要素でモデル化した。補剛桁の支承点は、橋軸方向について A1 橋台側は固定、A2 橋台側は可動、橋軸直角方向はともに固定である。支承はバネ要素、基礎は集約バネ支持としてモデル化した。



図一 2 解析モデル

c) 固有値解析

固有値解析の結果より、直角方向のアーチリブが振動するモードは、低次の 2 次モードに現れることを確認した。また、刺激係数が大きいモードの中から減衰が小さくなる 8 次と 25 次に基づいてレイリー減衰を設定した。

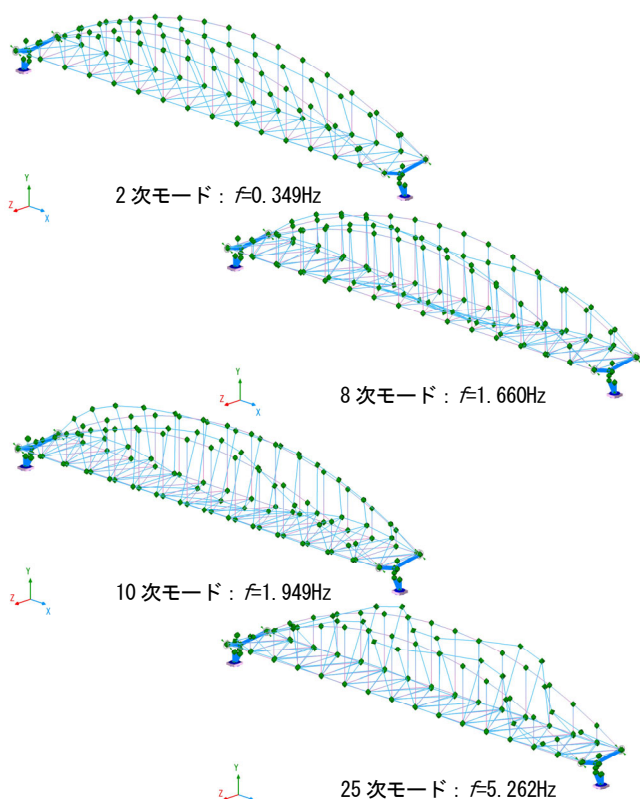


図-1-3 モード図

d) 動的解析

動的解析による発生断面力を以下に示す。アーチリブに着目すると、支点部に近くなるにつれて軸力が大きく、支間中央部及び支点部に近づくにつれて曲げモーメントが大きい傾向にあることを確認した。

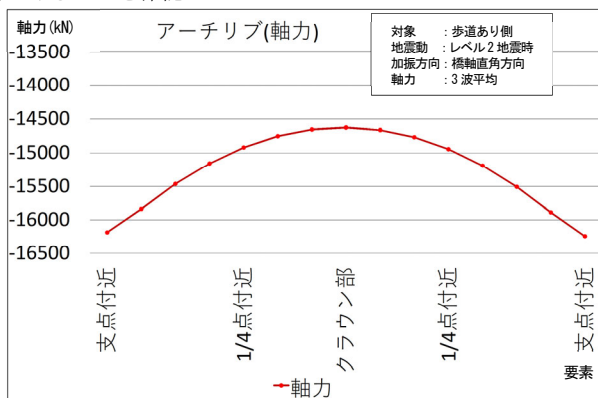


図-1-4 アーチリブ 軸力分布図

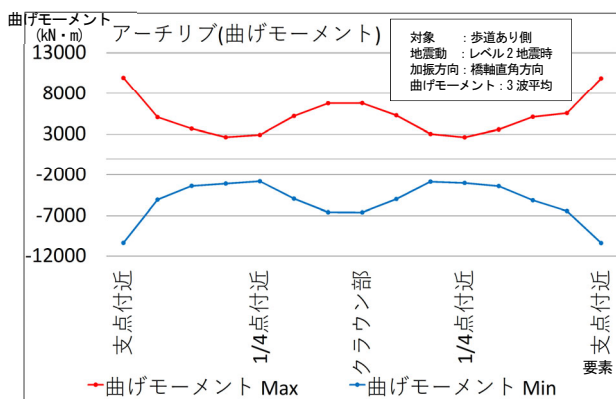


図-1-5 アーチリブ 曲げモーメント分布図

e) 作用応力度の比較

アーチリブの支点付近を代表として、死+活荷重時とレベル2地震時の作用応力度を常時換算により比較した。死+活荷重時のほうがレベル2地震時よりも作用応力度が大きく、レベル2地震時で断面は決まらないことを確認した。

表-4 作用応力度の比較

部材	照査項目	照査位置	作用応力度 (N/mm ²)		備考	
			死+活荷重時	L2地震時 (常時換算)		
アーチリブ	軸方向圧縮応力	U-Flg	-63	> -54	道示Ⅱ編表3.2.1	
		U-Web	-63	> -54		
		L-Web	-63	> -54		
		L-Flg	-63	> -54		
アーチリブ 支点付近	曲げ圧縮及び引張応力	U-Flg	-82	> 52	道示Ⅱ編表3.2.1	
		U-Web	-79	> 51		
		L-Web	84	> -52		道示Ⅱ編表3.2.3(a)
		L-Flg	80	> -48		

3. ポニー形式ローゼ橋のプロポーション考察

(1) 検討方針

本橋は、片側歩道を有する左右非対称な橋梁で、かつ上横構を省略したポニー形式であるため、左右のアーチライズを揃える必要はない。当該箇所でもニー形式を採用した理由は、煩雑に見える部材を可能な限り削減し、開放的な空間を道路上に生み出すためである。本節では、上横構がなく左右のアーチリブの高さを揃えなくてもよいポニー形式の特徴を活かしたアーチライズの検討により、さらに開放的な空間を生み出すことが可能かを検討した。

(2) 断面力バランスに着目したアーチライズ

対象橋梁は、歩道あり側のアーチリブにて歩道なし側の約1.4倍の軸力が発生している。左右のアーチリブの断面力を均衡させるため、歩道なし側のアーチライズを低くし、歩道あり側の軸力に均衡させる検討を行った。検討は、平面骨組み解析で軸力が均衡する左右のアーチライズに目安をつけ、そのアーチライズで断面力の偏りによる悪影響が生じないか、立体解析で精査を行った。なお、歩道あり側のアーチライズはH=18m(鋼重最小)とする。平面骨組み解析の結果、各アーチライズに対する左右の軸圧縮力は図-16, 17に示すとおりであり、歩道なし側のアーチライズをH=13mまで低くしたときに左右のアーチリブ及び補剛桁の軸圧縮力が均衡することを確認した。次に、歩道あり側(アーチライズH=18m)と歩道なし側(アーチライズH=13m)を組み合わせ、立体骨組みモデルの静的立体解析を行い、死荷重時及び死+活荷重時の断面力性状を確認した。その結果、平面骨組み解析と同様に、左右のアーチリブ及び補剛桁の軸圧縮力はそれぞれ同程度で均衡することを確認した。

以上より、左右のアーチライズを変えることで、アーチリブの軸圧縮力を均衡させ、面外座屈の照査を満足する左右のアーチリブ断面を同程度にする構造を考案することができた。

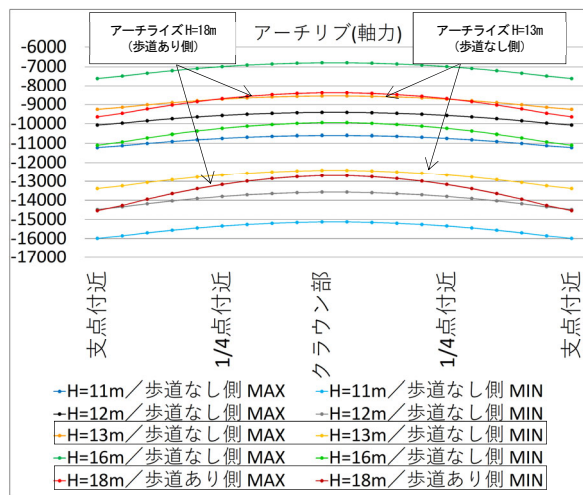


図-16 アーチリブ 軸力分布図

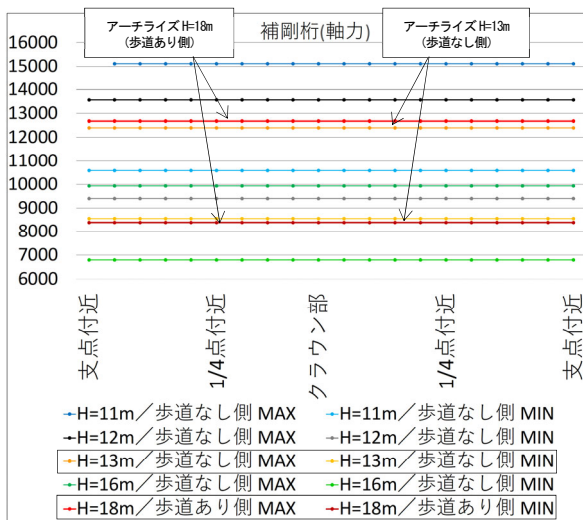


図-17 補剛桁 軸力分布図

(3) 景観

道路上からの見え方を図-18~20 に示す。上横構がある場合は、道路上の空間が面的に閉ざされた上、煩雑な印象を与えるが、ポニー形式とすることで前方の景色を見通すことができ、道路上に開放的な空間を生み出すことができた。また、歩道なし側のアーチライズを13mに下げること、更に開放的な空間を生み出し、並列配置の下路式ローゼ橋において新しい路上景観を計画できた。

4. あとがき

本橋のような都市部の橋梁は、構造の煩雑さを軽減できるポニー形式が有効と考え、ポニー形式の構造検討とプロポーシオン検討の内容を報告した。構造検討では、ポニー形式のアーチリブ特有の面外座屈を考慮した耐荷性、レベル2地震時における耐震性を検討することで、面外座屈の照査により断面が決定されることを確認した。また、プロポーシオン検討では、左右の断面力バランスに着目したアーチライズの検討を踏まえ、ポニー形式の特徴を活かした



図-18 歩道なし側アーチライズ18m(上横構あり)

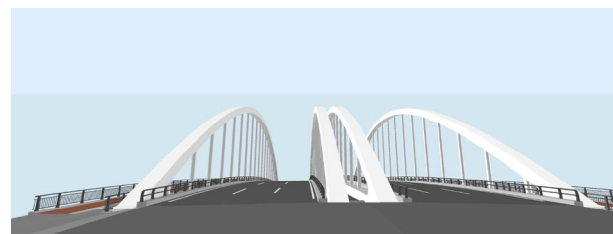


図-19 歩道なし側アーチライズ18m

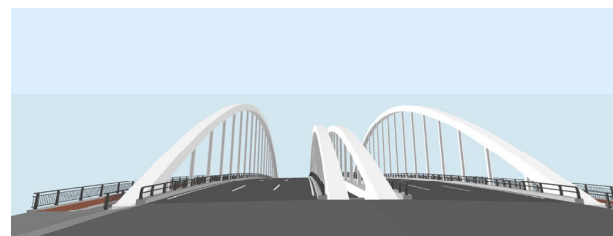


図-20 歩道なし側アーチライズ13m

アーチライズを揃えないプロポーシオンを考案し、並列配置の下路式ローゼ橋においても開放的な路上空間を生み出せることを確認した。

その他として、維持管理性に着目すると、従来形式の場合、上横構の保守点検や塗替えの際に大掛かりな交通規制を伴うが、ポニー形式の場合は車線規制に留めることができ、現道交通への影響低減やコスト縮減、施工期間の短縮に繋がる。また、ポニー形式のアーチリブは板厚が大きくなる影響で、箱桁内のリブを省略できる可能性があり、これより箱桁内のスペースが広がれば、維持管理性の向上も期待できる。

本論文で示した左右のアーチライズを変えたプロポーシオンは採用に至っていないが、選択肢の一つとして可能性は見い出せた。今後、ポニー形式のローゼ橋の採用が増えていくことを期待しつつ、その際に本考察が参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋・鋼部材編, H24.3, p.380~383
- 2) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震補強編, H24.3, p.113