

既存橋梁に着目した二枚壁橋脚の構造特性と V付き二枚壁橋脚の効果

高松 寛子¹・関 文夫²

¹学生会員 日本大学理工学部理工学研究科土木工学専攻
(〒101-8303 東京都千代田区神田駿河台1-8-14, E-mail:cshi17014@g.nihon-u.ac.jp)

²正会員 工博 日本大学理工学部土木工学科
(〒101-8303 東京都千代田区神田駿河台1-8-14, E-mail:seki@civil.cst.nihon-u.ac.jp)

ラーメン橋は維持管理や耐震性に優れることから、多く建設されているが、二次応力の問題から多径間連続とするには限界が生じている。ラーメン橋の合理的な範囲を超えた構造で発生する二次応力の問題を解決するために、二枚壁橋脚を有する3橋の特徴を整理し、二枚壁橋脚の構造特性と有効性を明らかにした。また、二枚壁橋脚を用いて橋脚の剛性を低下させる手段について検討を行った。さらに、二枚壁橋脚にV型の柱頭部を設けたV付き二枚壁橋脚で、二枚壁橋脚の構造特性をより強めることができた。これらの基礎的な構造検討を報告する。

キーワード：二枚壁橋脚, ラーメン構造, 固定支間長, 変位拘束, 長周期化

1. はじめに

ラーメン橋は、主桁と橋脚が剛結合する構造で、耐震性能が高く、走行性に優れ、騒音も少なく、維持管理が容易など、多くの利点を有することから、高速道路や鉄道橋などで採用されてきた。しかし、高剛性であることから、多径間連続構造とすると、不静定次数が高くなるために、クリープ・乾燥収縮、温度変化などの二次応力が大きくなり、多径間連続構造には、ある程度の橋長で限界が生じている。

これらの課題を克服するために、二枚壁橋脚による橋脚剛性の低下について考察した。二枚壁橋脚とは橋脚を板状の2枚の壁とすることで、曲げ剛性を低下させ、二次応力を低減できる構造である。また、長周期化することで、耐震設計上有利となる等の利点がある。しかし、単純な剛性低下は地震時の耐力が著しく低下し、構造が成立しないという課題を有している。

本文では、二枚壁橋脚を有する既存の3橋の構造特性をまとめ、ラーメン橋の長大化の手段として、二枚壁橋脚にV型の柱頭部を設け、桁による水平荷重を回転荷重に変換し、橋脚に発生する曲げモーメントを軸力として伝えるV付き二枚壁橋脚押し引き効果について検討した。

ここでは、V付き二枚壁橋脚の構造の造形と構造合理性について報告する。

2. ラーメン構造の合理的な範囲

日本の代表的なラーメン橋26橋¹⁾と二枚壁橋脚を有する3橋を図-1に示す。推定限界線は、ラーメン構造が成立する橋脚高さ H と固定支間長 L_f の関係であり、高速道路調査会のPC橋の新しい構造事例に関する調査研究によると、(1)式で示される。横軸の固定支間長とは図-2に示すように、剛結合された橋脚の支間長である。

$$H = 0.3 \times (L_f/2) - 5.4 \quad (1)$$

ここに、 H は橋脚高さ、 L_f は固定支間長である。

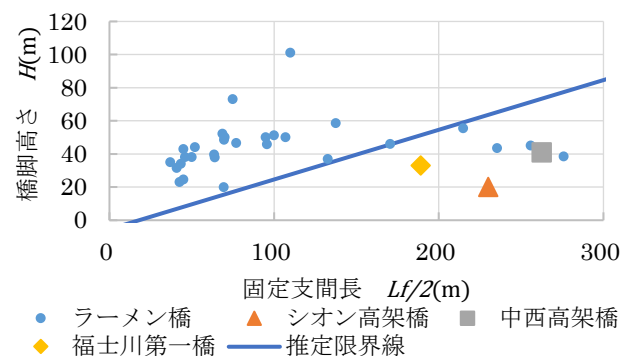


図-1 ラーメン橋26橋と二枚壁橋脚を有する3橋¹⁾

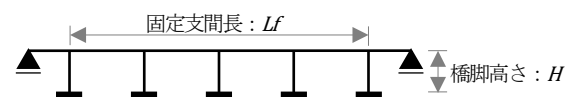


図-2 固定支間長

推定限界線を上回る領域が、ラーメン構造として合理的とされている。二枚壁橋脚を有する3橋はどれも範囲外であり、その構造特性を以下に示す。

3. 二枚壁橋脚を有する既存の橋の構造特性

(1) シヨン高架橋³⁾

シヨン高架橋は、スイスのレマン湖沿いに架かる橋長2110m、23径間を約5径間毎の箱桁連続ラーメンを繋げた橋である。写真-1のように剛性の低い二枚壁橋脚で二次応力を低下させている。橋脚の寸法は二枚壁の間隔8m、厚さ0.8m、幅5m、高さ3m~42mである。5径間の一例を図-3に示す。P4の短橋脚では剛性を高め、支承を設けて水平反力を開放している。



写真-1 chillion 高架橋⁴⁾

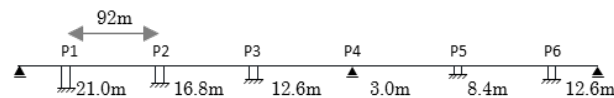


図-3 chillion 高架橋のモデル図³⁾

(2) 中西高架橋⁵⁾

中西高架橋は、東海北陸自動車道の岐阜県郡上郡白鳥町に架かる橋長675m、9径間箱桁連続ラーメン箱桁橋である。写真-2に示す。二枚壁橋脚と施工時に桁の二次力を見込んだ水平荷重を作用させた、水平変位調整工法を採用している。図-4に示すように、橋脚全てに二枚壁橋脚を用いている。



写真-2 中西高架橋¹⁾

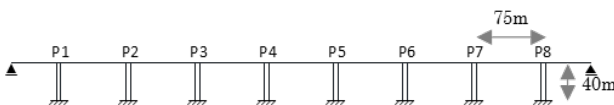


図-4 中西高架橋のモデル図¹⁾

(3) 富士川第一橋²⁾

富士川第一橋は、南部横断自動車道の山梨県南巨摩郡南部町に架かる橋長546m、5径間連続波形鋼板ウェブラーメン箱桁橋である。写真-3に示す。図-5に示すように、応力が集中する短橋脚に二枚壁橋脚を用いている。剛性を低下させ、応力を開放し、長橋脚のラーメン構造を可能にしている。



写真-3 富士川第一橋¹⁾

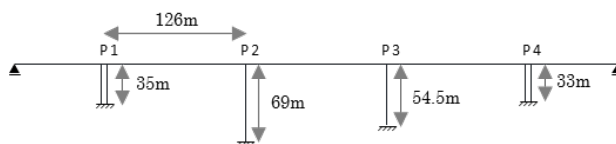


図-5 富士川第一橋のモデル図¹⁾

それぞれの橋で特徴があり、異なる活用方法で二枚壁橋脚が使われていた。活用方法を以下にまとめる。

- ① 二枚壁橋脚のみを利用する場合
 - ・ 橋全体の長周期化によって設計水平荷重の低減
 - ・ 短橋脚を含む場合の水平反力の集中を回避
 - ・ 桁のクリープ二次力に対して有効
 - ・ 橋脚自体の二次応力の低減
- ② 二枚壁橋脚と他の工法や構造を組み合わせる場合
 - ・ 変位拘束構造
 - ・ 水平変位調整工法

併用する構造や工法の組み合わせによって、より合理的に二枚壁橋脚が利用でき、ラーメンの連続多径間の可能性があると言える。しかし、二枚壁橋脚は水平荷重によって大きく変位するという課題がある。

4. V付き二枚壁橋脚押し引き構造のメカニズム

二枚壁橋脚の柱頭部に回転荷重 P を載荷すると、図-7に示すように左右の橋脚に圧縮と引張の軸力が発生する。この効果を“押し引き効果”とする。この効果は斜張橋やエクストラード橋などで有効である。実際に、写真-4に示すフランスのMillau高架橋は、鋼製の薄い桁の変形をケーブルに伝え、主塔が回転しようとする力を、分かれた主塔から、分かれた橋脚で受け、回転による力を軸力で支えている。主塔が95m、橋脚が248mと巨大なために、橋脚は地上から150m地点で1本になっている。この構造は、図-6で示すように、地震時の水平荷重 Ph がケーブルによって主塔に回転荷重 $Ph \cdot e$ を作用させる構造である。

この効果を二枚壁橋脚のラーメン橋で活かすために、**図 - 8**の構造を提案する。地震時に桁の自重で作用する水平荷重 Ph を柱頭部で回転荷重 $Ph \cdot e$ に変換し橋脚に伝える構造である。



写真 - 4 Millau 高架橋

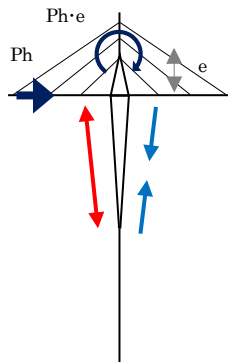


図 - 6 Millau のモデル図

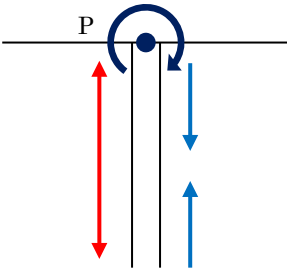


図 - 7 二枚壁橋脚のモデル図

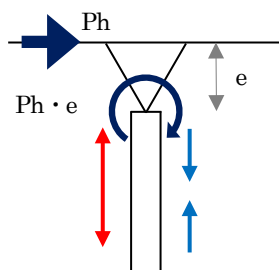


図 - 8 V 付き二枚壁橋脚

5. 基本モデルの骨組み解析と断面力の変化

スパン 75m, 9 径間, 橋脚高さ 40m の骨組みモデルを **図 - 9** に示す。橋脚に関して、一般的な箱型橋脚と、二枚壁橋脚, V 付き二枚壁橋脚を比較する。計算には平面骨組み解析プログラム Ezy-Frame を用いる。桁は **図 - 10** に示す断面で等断面とし、橋脚は **図 - 11** に示す箱型橋脚断面と、二枚壁橋脚断面とする。材料は設計基準強度 $f_{ck}=40\text{N/mm}^2$ のコンクリートで、単位体積重量 $\gamma=24\text{kN/m}^3$, 弾性係数 $E=3.1 \times 10^4\text{N/mm}^2$ とする。

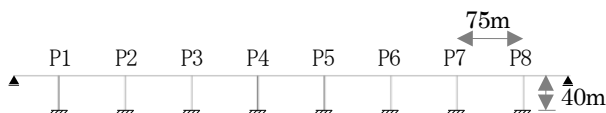


図 - 9 スパン割の骨組みモデル

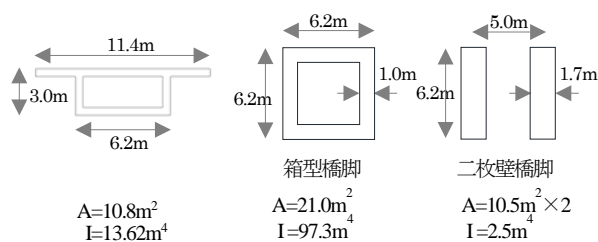


図 - 10 桁断面

図 - 11 橋脚断面

鉛直方向に桁と橋脚の自重を作用させた場合の P4 の桁の負の最大曲げモーメント M とせん断力 Q を **図 - 12** にまとめる。曲げモーメントの分布を実線, せん断力の分布を点線で示す。

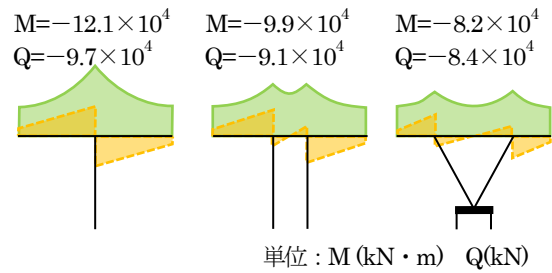


図 - 12 自重による桁の曲げモーメント M とせん断力 Q

箱型橋脚に対して、二枚壁橋脚は支点が増え、スパンが短くなることから、桁の曲げモーメントは $2.26 \times 10^4\text{kN} \cdot \text{m}$ 減少し、約 0.8 倍に低減している。さらに、 V をつけることで、スパンが短くなり約 0.9 倍に低減し、箱型橋脚に比べると 0.7 倍となる。

また、道路橋示方書 V 耐震設計編の静的照査法による耐震性能の照査方法より、固有周期 T と設計水平震度の標準値 k_{h0} から、それぞれのモデルの設計水平震度 k_h を算出した。固有周期 T と設計水平震度 k_h を表 - 1 に示す。地震荷重として、桁と橋脚にそれぞれの自重 W と設計水平震度 k_h の積を水平方向に等分布荷重で作用させた場合の結果を **図 - 13** に示す。橋全体の最大水平変位を δ_h , P4 の橋脚基部の曲げモーメントを M , せん断力を Q , 軸力を N とする。軸力については、引張を負、圧縮を正で示す。

表 - 1 固有周期 T と設計水平震度 k_h

	箱型橋脚	二枚壁橋脚	V 付き二枚壁橋脚
T	0.67 s	2.01 s	1.69 s
k_h	0.25	0.19	0.21

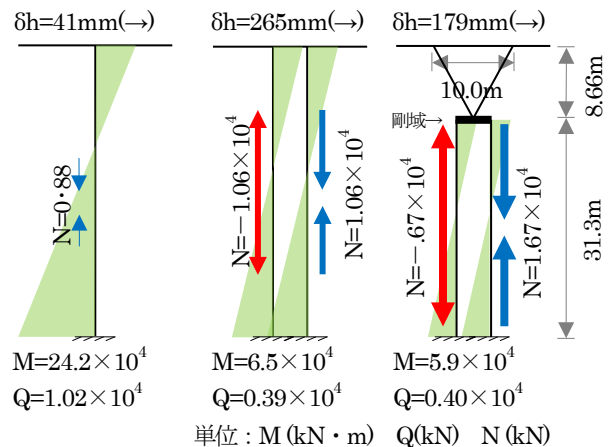


図 - 13 水平荷重による曲げモーメント M と軸力 N

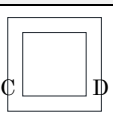
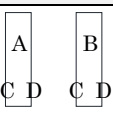
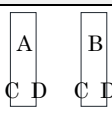
箱型橋脚に対して、二枚壁橋脚の水平変位は177mm増え、6.4倍になる。橋脚基部の曲げモーメントは壁1枚あたり $6.5 \times 10^4 \text{kN} \cdot \text{m}$ で、1本の橋脚としては $13 \times 10^4 \text{kN} \cdot \text{m}$ で、約半分である。橋脚の軸力は二枚壁橋脚にすることで、8本全ての橋脚に均等に軸力が発生する。この結果から、二枚壁橋脚には軸力を発生させる機能があり、押し引き効果がある。

また、二枚壁橋脚とV付き二枚壁橋脚を比較すると、橋脚基部の曲げモーメントは $0.56 \times 10^4 \text{kN} \cdot \text{m}$ 減少し、約0.9倍になっている。軸力は1.57倍になっていることから、Vの柱頭部によって、曲げが軸力に変換され、押し引き効果が増加している。さらに、変位は66mm減少した。曲げモーメントの減少に伴い、せん断力も減少している。

6. 橋脚基部の応力状態

それぞれの構造モデルに、桁と橋脚の自重と地震荷重の両方を作用させた。P4の橋脚基部の全断面有効としたときのコンクリートの応力状態を表-2にまとめる。曲げ応力度と軸応力度による合成応力については、引張と圧縮の最大応力を示す。引張を負、圧縮を正とする。二枚壁橋脚とV付き二枚壁橋脚の二枚の壁の橋脚は図に示すように左をA、右をBとする。また、箱型橋脚と、二枚壁橋脚の各壁の左端をC、右端をDとし、それぞれ添え字で示す。

表-2 橋脚基部の応力状態

	箱型橋脚	二枚壁橋脚	V付き二枚壁橋脚
橋脚断面			
曲げ 応力度 σ	$\sigma_C : 7.7$ $\sigma_D : -7.7$	$\sigma_C : 23.0$ $\sigma_D : -23.0$	$\sigma_C : 20.3$ $\sigma_D : -20.3$
軸 応力度 σ	-1.9	$\sigma_A : -0.9$ $\sigma_B : -2.9$	$\sigma_A : -0.4$ $\sigma_B : -3.6$
合成 応力度 σ	$\sigma_C : 5.8$ $\sigma_D : -9.6$	$\sigma_{AC} : 22.1$ $\sigma_{BD} : -25.9$	$\sigma_{AC} : 19.9$ $\sigma_{BD} : -23.9$

単位：N/mm²

それぞれのモデルで、橋脚基部のDの箇所が圧縮応力最大となる。コンクリートの設計基準強度 $f_{ck}=40\text{N/mm}^2$ より、地震時のコンクリートの許容応力度は、道路橋示方書の許容応力度より、 $\sigma_{ca}=20\text{N/mm}^2$ となる。二枚壁橋脚では σ_{ca} を超えるが、V付き二枚壁橋脚では下回る結果となった。コンクリートの圧縮破壊の可能性はないといえる。

7. まとめ

骨組み計算の解析結果より得られた、V付き二枚壁橋脚のメリットを以下にまとめる。

- Vによって支点の間隔が大きくなるために、さらに桁の負の最大曲げモーメントを低減できる
- Vによって、橋脚の高さが低くなるために、剛性を高める、変位を低減することができる。
- 桁からVで偏心をかけて回転荷重として橋脚に軸力を伝えることで、橋脚の曲げモーメントを低減し、軸力による押し引き効果を増加させることができる。また、V付き二枚壁橋脚のイメージを図-14に示す。

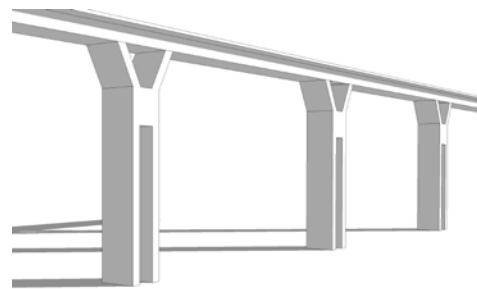


図-14 V付き二枚壁橋脚のイメージ

8. おわりに

二枚壁橋脚を有する既存の3橋から、特徴と活用方法をまとめることができた。また、二枚壁橋脚の機能を活かして、桁の負の曲げモーメントを低減し、橋脚の曲げモーメントを軸力に変換するV付き二枚壁橋脚の“押し引き効果”を明らかにすることができた。今後は、多径間連続化による二次応力の変化と、地震時の動的挙動について解明し、ラーメン橋の長大化につなげたい。

参考文献

- 1) 三井住友建設：PC設計NEWS, No. 34,67,99,114,119,126,132,135,136,144,147,148,152,156,158,160,166,182,190,190,191,193,194
- 2) 渋谷智裕：二枚壁式橋脚によりラーメン剛結化を行った富士川第一橋の計画・設計
- 3) Pigué, Jean-Claude : Ponts en courbe préfabriqués et construits en encorbellement (exemple de Chillon), SIA spécial, no 3 , 71e Assemblée générale de la Société des ingénieurs et architectes, Bulletin technique de la Suisse romande, 1969
- 4) Structurae[Chillon Viaduct][https://structurae.net/structures/chillon-viaduct\(2017/04/04\)](https://structurae.net/structures/chillon-viaduct(2017/04/04))
- 5) 水口和之：2枚壁式橋脚を有する多径間連続ラーメン橋の耐震設計に関する一考察, プレストレストコンクリート, Vol.39, No.5, Sep. p46-53. 1997