

重要文化財旧魚梁瀬森林鉄道施設 犬吠橋の構造的特徴に関する考察

崔 静妍¹・岡 建司²・益田 里佳³

¹正会員 株式会社文化財保存計画協会（〒101-0003 東京都千代田区一ツ橋 2-5-5）

E-mail: choi@b-hozon.co.jp

²非会員 株式会社文化財保存計画協会（〒101-0003 東京都千代田区一ツ橋 2-5-5）

E-mail: okakenji@b-hozon.co.jp

³非会員 株式会社文化財保存計画協会（〒101-0003 東京都千代田区一ツ橋 2-5-5）

E-mail: masuda@b-hozon.co.jp

この論文は、国指定重要文化財旧魚梁瀬森林鉄道施設における犬吠橋の構造的特徴及び設計経緯に関する考察である。本研究では犬吠橋の形状に着目し同時代の類例橋梁の調査を行い形状の特徴及び独自性を明らかにすると共に、設計者が参考した可能性が高い当時の教科書の計算を検証し、現在の構造解析結果とほぼ一致することを確認した。犬吠橋は、国鉄とは異なり標準化されていない森林鉄道の設計において技術者の個性が顕著に現れた橋梁として非常に合理性の高い設計として評価できる。

Key Words: Yanase、Inubo Bridge、forest railway、civil engineering heritage、bridge design

1. はじめに

(1) 研究の目的

一見どこにでも見られるトラス橋のようだが良く観察すると深い谷にかかる上路トラス橋としては一般的なトラスより背が高い。部材の長さを測ってみると 3 : 4 : 5 の比率であることも興味深い。なぜこの形にしたのであろう。本研究は些細な疑問から出発し、犬吠橋の形状及び類例橋梁の調査を行い、特徴及び独創性を明らかにするものである。そして当時設計に係った山林技師に着目し、設計に至った経緯について考察する。

(2) 犬吠橋の概要

魚梁瀬森林鉄道は、高知県東部中芸地区の森林開発のため 1910 年から 1942 年にかけて建設された。1963 年廃線まで地域産業を支える存在として、また地元の足として活躍した。廃線後、多くの施設が道路として整備され、現役の土木施設として利用されている。国内最初期の森林鉄道施設が群として旧態を良好に保持しながら残っており林業技術史上、貴重な土木遺産として 2009 年に 18 施設が重要文化財に指定された。その一つである犬吠橋は、施設群の中央部に位置しており、逆勾配という地形的弱点を克服するべく機関車を導入するため、1924 年既存の木造トラスから鋼製プラットトラス橋に架け替えられたものである。廃線後は道路橋として整備され県道として使われていたが、2016 年 9 月に斜材 4 カ所が破断する事故が発生し、全面通行止めを実施中である。

2. 犬吠橋の形状の特徴及び希少性

(1) 犬吠橋の形状特徴

犬吠橋の主構は上路式のプラットトラス橋である。橋長は 40.9m、トラス部分の径間長は 31.85m (≒105ft)、トラス下弦から上弦までの高さは 6.125m (≒20ft) である。トラスは等間隔の 7 格間から成るため、1 格間の長さは 4.55m (≒15ft) であり、このとき斜材の長さは三平方の定理より「≒25ft」となることが明らかである。ちなみに、垂直材に対する斜材の角度 θ は、約 37° をなす。また、トラス両端の斜材を端柱とみなすような、台形トラスを基本とした橋面の設計が特徴的である。トラス両端の垂直材と水平材（上弦材）は付加的に設計されている。

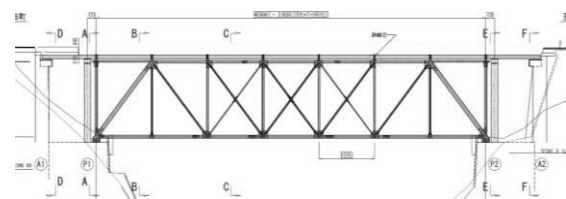


図-1 犬吠橋全景及び一般図

(2) 魚梁瀬森林鉄道における鋼トラス橋の形状特性

魚梁瀬森林鉄道施設における鋼製トラス橋は、犬吠橋の他、井ノ谷橋（1924年竣工）、明神口橋（1929年竣工）、小島橋（1931年竣工）が存在する。井ノ谷橋は犬吠橋と同じく上落式、明神口橋と小島橋は下落式のいずれもプラットトラスの形式が用いられており、中央の2~3格間のみ副斜材を用いてX字に交差させている。また、橋を真横から見たときに、トラスに用いられている直角三角形のプロポーションは、おおよそ（1格間の長さ）：（1格間の高さ）：（斜材の長さ）の寸法関係に、「（3、4、5）」のピタゴラス数の比率で統一されている傾向を読み取ることができる。

表-1 魚梁瀬森林鉄道施設のプラットトラス橋梁

橋梁	建設年度	形式	格間長(ft-in)	高(ft-in)
犬吠橋	1924	上路プラットトラス	15-0	20-0
井ノ谷橋	1924	上路プラットトラス	15-0	20-0
明神口橋	1929	下路プラットトラス	15-6	20-0
小島橋	1932	下路プラットトラス	15-9	20-7

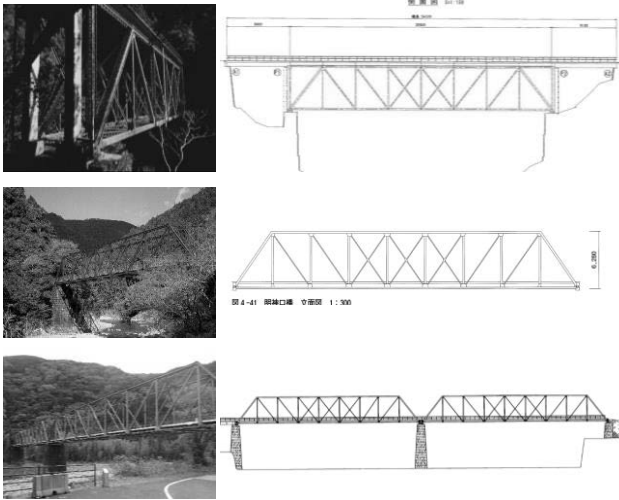
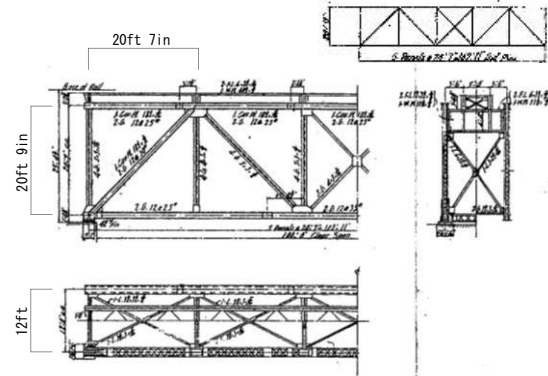


図-2 魚梁瀬森林鉄道施設におけるプラットトラス橋（上：井ノ谷橋、中：明神口橋、下：小島橋）

種別	桁ノ全長	高さ	格間	中心間隔	重量	設計年月
100 単線上落橋	107-0	20-0	5@20-7	12-0	56 6.1 14	明治31年10月
150	156-8	22-0	7@22-0	12-0	102 19 2 27	
200	207-9	28-0	7@24-3	16-0	152 15 3 10	
100 単線下路橋	107-0	23-7	5@20-7	15-6	53 6 2 7	
150	156-8	25-0	7@22-0	16-0	94 7 1 26	
200	207-9	34-0	9@22-9	16-0	145 4 2 28	
500	311-0	50-0	14@21-10	16-0	311 16 3 4	明治36年10月
100 複線下路橋	106-9	26-6	5@20-9	26-3	98 15 0 19	明治31年10月
200	209-1	37-0	9@22-9	27-0	298 5 0 22	明治33年10月
200						明治35年10月

(i) 単線上落橋プラットトラス（径間100フィート）



(ii) 単線下路橋プラットトラス（径間100フィート）

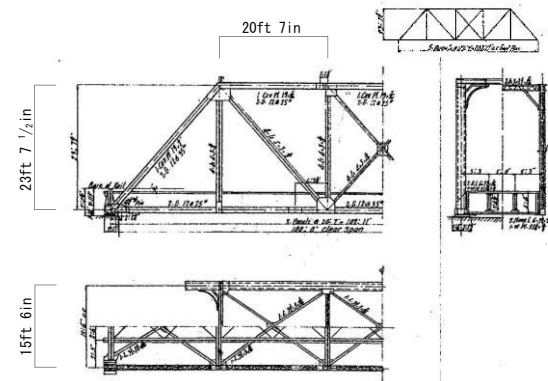


図-3 旧国鉄クーパー型トラス橋標準設計¹⁾

表-2 国鉄トラス橋総覧におけるプラットトラス一覧²⁾

番号	構造	年度	製作 数	現存(1957 年当時)	支間		高さ y		格間長さ x		x/y	天候性 類似性
					ft	inch	ft	inch	ft	inch		
未架橋	上路プラット	T13	1	1	105	0	20	0	15	0	0.75	
RP-16	下路プラット	M28	2	0	120	0	17	6	15	0	0.96	
PP-17	下路プラット	M30	1	0	208	0	17	4	17	4	1.00	
P-1	下路プラット	M15,M31	5	0	100	0	22	0	16	8	0.76	支間、斜角
P-2	下路プラット	M15	1	0	150	0	22	0	16	8	0.76	斜角
P-12	下路プラット (クーパー型150R)	M35~T1	33	31	154	0	25	0	22	0	0.88	
P-13	下路プラット	S31	2	2	154	0	25	0	22	0	0.88	
R-1	下路プラット	M30,31,S23	14	1	206	10	25	6	20	7	0.81	
R-2	橋脚下路プラット	M29	2	0	206	10	30	6	20	7	0.67	
R-3	下路プラット	M31,32	3	0	100	0	20	0	20	0	1.00	支間
R-4	下路プラット	M32	2	0	122	11	24	0	24	7	1.02	
R-6	下路プラット	S29		1	98	4	24	0	24	7	1.02	支間
R-7	下路プラット (クーパー型100R)	M39~S30	49	45	102	11	23	7.5	20	7	0.87	支間
R-8	下路プラット	M44	5	5	97	11	23	7.5	18	1	0.77	支間、斜角
R-9	橋脚下路プラット	M34,35,T9	47	47	103	9	26	0	20	9	0.80	支間
RF-2	下路プラット	T5~S4	39	37	102	11	25	0	20	7	0.82	支間
RF-3	下路プラット	T4,9,10	15	15	104	7	25	0	20	11	0.84	支間
RF-6	下路プラット	T5,S28	3	3	98	0	25	0	24	6	0.98	支間
RF-7	下路プラット	T7	12	12	102	11	25	0	20	7	0.82	支間
RF-8	下路プラット	T10	1	1	106	3	25	0	21	3	0.85	支間
RF-10	下路プラット	T3	8	8	154	0	25	0	22	0	0.88	
RF-11	下路プラット	T5~S4	54	45	154	0	25	0	22	0	0.88	
RF-12	下路プラット	S29	6	1	132	0	25	0	22	0	0.88	
RF-18	下路プラット	T2,3	6	1	108	0	29	5	27	0	0.92	支間
RF-23	下路プラット	T14	1	1	103	4	25	0	20	8	0.83	支間
RF-41	橋脚下路プラット	T12	19	19	103	9	30	0	20	9	0.69	支間
RF-42	下路プラット	T3	2	0	154	4.5	28	1.5	25	8.75	0.91	
PD-1	上路プラットトラス	S18,32,43	4	0	109	1	12	0.5	9	11	0.82	
PD-4	上路プラット (クーパー型150R)	M35~T3	11	9	154	0	22	0	22	0	1.00	
PD-6	上路プラット	M43	1	1	119	0	17	0	17	0	1.00	
RD-1	上路プラット (クーパー型100R)	M30	11	11	106	0	7	0	7	0	1.00	
RD-2	上路プラット	?	?	?	102	11	20	9	20	7	0.99	支間
RD-4	上路プラット	M44	1	1	108	1+13/4	12	1.3125	12	1.3125	1.00	支間
RD-6	上路プラット	T2	1	1	105	0	20	0	17	6	0.88	支間
RFD-1	上路プラット	T5	2	2	154	0	23	0	22	0	0.96	
RFD-6	上路プラット	T8~S6	26	26	154	4.5	25	8.5	25	8.5	1.00	

表-3 現存する戦前プラットラス²³⁴⁾

橋梁名	所在地	径間長 (m)	設計活荷重	竣工	鉄道名 / 線名	記事	標準設計	斜角比 (tan)
本城橋(跨線道路橋)	茨城県水戸市	30.5	-	1929.9.30 (昭和4)	水戸市市道	2001年撤去、現存せず(原形)Edge Moor Bridge/1999	R-3	1.00
錦豊川橋梁 (いいでがわ)	新潟県新発田市	47.4	E33	1922 (大正11)	(旧)日鉄鉱業専用鉄道	1957年改築 鉄道橋→道路橋→歩道	RFD-6 推定	1.00
荒川橋梁	埼玉県寄居町	3×47.6	KS12 (元E33)	1925.7.10 (大正14)	東武鉄道 / 東上線	トラスは日本本線川崎橋梁のものと同じで、鉄道後の図面によって製作されたと判断できる	RFD-1 推定	0.96
境川橋梁	宮崎県田野町	2×46.9	E33	1916.3 (大正5)	JR九州 / 日豊本線		RFD-1	0.96
第一利根川橋梁上り線	群馬県渋川市	3×47.1	E40	1924.3.31 (大正13)	JR東日本 / 上越線		RFD-6	1.00
第二利根川橋梁上り線	群馬県赤城村	2×47.1	E40	1924 (大正13)	JR東日本 / 上越線		RFD-6	1.00
第三利根川橋梁下り線	群馬県子持村	2×47.1	E40	1924 (大正13)	JR東日本 / 上越線		RFD-6	1.00
第八利根川橋梁上り線	群馬県水上町	47.1	E40	1931.8 (昭和6)	JR東日本 / 上越線		RFD-6	1.00
第一神通川橋梁	富山県大沢野町	6×47.1	E40	1929.10.1 (昭和4)	JR西日本 / 高山本線		RFD-6	1.00
那珂川橋梁上り線	栃木県黒磯市	2×47.1	E30	1920.11 (大正9)	JR東日本 / 東北本線		RFD-6	1.00
上碓氷川橋梁下り線	群馬県松井田町	33.2	248500 lbs機関車重連+3500 lbs/ft (換算KS16)	1910 (明治43)	JR東日本 / 信越本線		RD-4	1.00
碓氷川橋梁	福島県西会津町	1×62.4	206000 lbs機関車×2+3000 lbs/ft	1914.11.1 (大正3)	JR東日本 / 磐越西線	単線上路分格プラットラス(ボムチモア、ピン結合)	PD-5(ボルチモア)	1.33
長谷川橋梁	福島県西会津町	1×32.0	E33	1913.8.1 (大正2)	JR東日本 / 磐越西線	トラス材は東海道線東四相沢川橋梁から撤去のものを再利用したとされている。	RD-6	0.88
宮川橋梁	三重県小俣町	11×31.8	補強後KS15	1897.11 (明治30)	JR東海 / 参宮線	ダブルワーレンに補強	RD-1	1.00
浦山川橋梁	埼玉県荒川村	62.4	206000 lbs機関車×2+3000 lbs/ft	1930.3 (昭和5)	秩父鉄道	American Bridge/1913. <前架設場所>磐越西線阿賀野川当麻橋梁	PD-5(ボルチモア)	1.33
安谷川橋梁	埼玉県荒川村	62.4	206000 lbs機関車×2+3000 lbs/ft	1930.3 (昭和5)	秩父鉄道	American Bridge/1913. <前架設場所>磐越西線阿賀野川当麻橋梁	PD-5(ボルチモア)	1.33
押手沢橋梁 (おつてざわ)	埼玉県荒川村	1×46.9	206000 lbs機関車×2+3000 lbs/ft	1930.3 (昭和5)	秩父鉄道	American Bridge/1913. <前架設場所>磐越西線阿賀野川当麻橋梁	PD-4	1.00
吉野川橋梁	奈良県吉野町	3×46.9	E33 (KS15)	1928.3 (昭和3)	近畿日本鉄道 / 吉野線	日本本線横川橋梁や東武上野原川橋梁のトラスをスワップしたとされているが、独自の別形式	RFD-1 類似	0.96
丹生川橋梁 (にゅうがわ)	和歌山県九度山町	1×42.1	E33	1925.7.30 (大正14)	南海電気鉄道 / 高野線			詳細不明
八敷代川橋梁 (はっしだいがわ)	山形県真室川町	2×46.9	-	1904.10.21 (明治37)	国鉄奥羽本線	American Bridge/1903 2003年1月22日爆破工法により撤去。	PD-4	1.00
立場川橋梁 (たてばがわ)	長野県富士見町	62.4	-	1904.12.21 (明治37)	国鉄中央本線	American Bridge/1903 1980年9月に復元別線開通により復橋となるが、橋脚状態で現存。	PD-5(ボルチモア)	1.33
小黒部谷橋	富山県宇奈月町	-	-	1929.10? (昭和4)	黒部峡谷鉄道	小黒部橋?		詳細不明
一ノ戸川橋梁 (いちのどがわ)	福島県山都町	62.4	206000 lbs機関車×2+3000 lbs/ft	1910.12.15 (明治43)	JR東日本 / 磐越西線		PD-5(ボルチモア)	1.33

クーパー型 (米国型) トラスは、明治 30 年に鉄道橋の標準トラスとして設計され、それまで使用されていたポーナル型 (英国型) よりも、合理的な構造計算に基づいた比較的細身の部材を用いたところが特徴とされる¹⁰⁾。クーパー型トラスのうち、上路式のトラス橋は径間 100ft タイプ、150ft タイプおよび 200ft タイプの標準設計図面が残っており、径間 100ft タイプ、150ft タイプのものはプラットラスであり、100ft タイプのものは格点

部をリベット結合として、その他のものはピン結合である。犬吠橋も、径間 100ft タイプの上路プラットラス橋でありリベット接合の格点部を持つことから、クーパー型トラスの系譜的類似性が認められるが、いずれも 1 格間長さが 20ft7inch (約 6.3m) で犬吠橋より約 1.7m 長い上、1:1 に近いプロポーシオンを示す。

なお、クーパー型以降のトラス標準設計を網羅した総覧²⁾を確認したところ、犬吠橋と同じ設計は無いことが確認できる。プラットラスの標準設計では径間の長短に係らず 1 格間長さが 15ft 以下のものは PP-16、RD-1、RD-4 があるが、高さ比は 1:1 に近く犬吠橋より背が低い。なお、P-1、P-2 のように近似の斜材角度を持つものでは 1 格間長さが犬吠橋より 20inch (500 mm 以上) 長く、背が高いトラスである。

b) 森林鉄道のトラス橋

森林鉄道橋梁には様々な形式の橋梁が見られるが、上路プラットラスによる橋梁の事例は多くない。土学学

表-4 現存する森林鉄道のトラス橋³⁴⁾

橋梁名	形式	所在地	径間長 (m)	設計活荷重	竣工	鉄道名 / 線名
小巻沢林道橋	上路ワーレントラス(軍用組立式)	北海道夕張市	1×20.0	-	19--	大夕張森林署林道
第一号橋梁 (三弦橋)	下路ワーレントラス, 三角断面	北海道夕張市	1×39.00m +1×77.00m +5×52.08m	-	1958 (昭和33)	大夕張森林鉄道 / 夕張岳線
第五号橋梁	上路ワーレントラス(軍用可動組立式)	北海道夕張市	-	-	1958 (昭和33)	大夕張森林鉄道 / 夕張岳線
第六号橋梁	上路ワーレントラス(軍用組立式)	北海道夕張市	-	-	1958 (昭和33)	大夕張森林鉄道 / 夕張岳線
鬼淵橋	(1)単線上路ワーレントラス, (2)単線下路曲弦プラットラス, (3)単線上路プレートガーダー	長野県上松町	(1)1×24.4m, (2)1×54.9m, (3)1×12.9m	自動車林道一級, L-14	1913(1976) (大正2)	上松町林道
小田野橋梁	(1)単線下路プラットラス, (2-6)単線上路桁, (7)単線上路ワーレントラス	長野県上松町	101×36.6m, (2-6)2×3.0m, 3×4.8m, (7)1×24.4m	10t機関車2両, 等分布荷重 1200kg/m	1915 (大正4)	小川森林鉄道
大鹿淵橋梁 (大鹿淵橋)	2線2ヒンジソリッドリブアーチ	長野県王滝村	1×39.3	-	1923年 (大正12)	(旧) 王滝森林鉄道
木曾川橋梁	(1)単線上路ワーレントラス, (2)単線下路曲弦プラットラス, (3-5)単線上路プレートガーダー	長野県大桑村	(1)1×24.4m, (2)1×61.0m	10t機関車2両, 等分布荷重 1200kg/m	1923年 (大正12)	野尻森林鉄道 (廃止)
飛竜橋	上路2ヒンジバンドレルプレートアーチ	福岡県本川根町	-	-	19--	(旧) 千頭森林鉄道
第一阿寺川橋梁	上路ワーレントラス	長野県大桑村	-	-	1925 (大正14)	阿寺森林鉄道
乙女橋梁 (御留橋)	上路プラットラス	岐阜県高山市	-	-	1930以降	金木戸森林鉄道 / 本線
中の俣橋 (27号橋梁)	(1)上路プラットラス, (2)上路プレートガーダー	岐阜県高山市	(1)+(2) 35	-	1930以降	金木戸森林鉄道 / 本線
うぐい川本谷橋梁	上路ワーレントラス	長野県王滝村	27.4	-	1939	王滝森林鉄道 / うぐい川線
遠山川第二号橋梁 (ながとろの橋)	(1)上路ワーレントラス, (2-3)上路プレートガーダー	長野県飯田市	-	-	1958頃	遠山森林鉄道
畑川橋梁	上路ワーレントラス	福島県浪江町	-	-	19--	浪江森林鉄道

会データベース等から確認できるものとしては長野県の金木戸森林鉄道（1930年開通、1963年廃止、名古屋営林局）でわずかに上路プラットラスによる橋梁が確認される。図面等入手できず格間と高さの正確な比率は不明だが、写真等資料より肉眼で確認した比率は1:1に近く犬吠橋等魚梁瀬森林鉄道施設のプラットラスのような背の高いものは確認されない。

現存する森林鉄道のトラス橋を整理したところ、各線路に非常に多様な形式の橋梁が存在することが分かる。森林鉄道の建設に関する規格が定まるのは1953年12月「森林鉄道建設規定」以降で、戦前の農林省山林局では森林鉄道の橋梁については特に標準的な設計や指針が定められておらず、橋梁の設計や仕様については各営林局の技術者が担っていたとみられる。架橋地点によって地形・地質等の異なる設計条件の中で、森林鉄道の橋梁設計は必然的に技術者個人の能力や考え方が大きく反映されるものあり、犬吠橋を含む魚梁瀬森林鉄道の鋼製トラスの独創的形狀もその証といえる。なお、森林鉄道橋梁において設計者の名前が判明しているのは、鬼淵橋（長野県）の三根奇能夫（みねきのぶ、宮内省土木技師）のみである。

3. 魚梁瀬森林鉄道の技術者 小松亀治

既往の調査⁹⁾では魚梁瀬森林鉄道の設計体制及び仕事を明らかにし、中心人物として小松亀治について取り上げている。その記述の一部を以下に示す。

「…大正11年から昭和初期にかけて機関車の使用にともなう橋梁の架替え工事等の設計・監理がおこなわれたが、この時期には、大正後半に秋田大林区署で田中第二のもとで森林鉄道の敷設をおこなっていた長谷川松枝技師のもと、明治期に採用された小松亀治とともに、大正期に採用された技術者たちによって工事が遂行されたと考えられる。」

「魚梁瀬森林鉄道では、大正11年から昭和初期にかけて、機関車の導入にともなって、枕木の取り替えや橋梁の架替えが行われた時期であり、これらの橋梁の設計時には、（小松亀治は）局内でも指導的な位置づけであったと思われる。（小松亀治のご遺族から馬路村教育委員会に）寄贈いただいた写真には、犬吠橋・いの谷橋の工事中の写真が残っている。ご遺族の方の記憶では、橋に対して最も興味があったようで、教本（「土木須用公式設計実例」）には含まれたメモは橋に関する記述がみられる。」※（）内を補足

小松亀治の生い立ちと経歴は以下の通りである。

- 1875年 高知市一宮に生まれる
- 1897年 神戸税関に税関監吏として勤務、同年退官
- 1900年 農商務省林野整理局属、石川支局に勤務
- 1902年 黒部林道工事監督として勤務

- 1905年 大阪大林区署、高野山官行事業場に勤務
- 1907年 官庁事務の都合により、休職（1年間）
- 1908年 高知大林区署雇、翌年山林技手となる
- 1921年 勲八等瑞宝章を授与
（1924年 犬吠橋・井ノ谷橋建設）
- 1929年 営林局技師に昇格、勲七等となる
（1929年 明神口橋建設）
（1932年 小島橋建設）
- 1934年 退官し同年から嘱託となる（1936年まで）

犬吠橋及び井ノ谷橋の建設された1924年は小松亀治の49歳頃のことであり、担当プロジェクトの中心的立場であったと考えられる。小松亀治の経歴や工事中の現場の写真等の遺品を見ても分かるように、犬吠橋や井ノ谷橋の橋梁設計・施工に主導的立場であった可能性が高い。なお、明神口橋及び小島橋の建設時期にも技師として勤めており、両橋の形式決定や設計にも大きな影響を与えたと思われる。

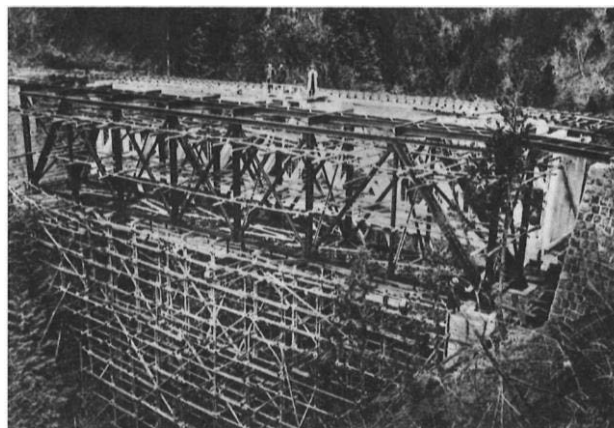


図4 建設中の犬吠橋（中央に立つのが小松亀治氏）

4. 文献に見るプラットラス設計手法

(1) 土木須用公式設計実例

プラットラスの設計手法や各部材の応力計算については、明治30年頃にはすでに国内で発行された文献⁶⁾に、公式や計算方法が紹介されていたことが確認できる。魚梁瀬森林鉄道の建設に従事した小松亀治氏の遺品に含まれる書籍『土木須用公式設計実例』⁶⁾にも「プラットラス及ハウトラスに於ける最大応力表」が掲載されており、犬吠橋を設計するにあたり参考にした可能性が高い。

書籍の巻頭によると、初心者も含めて実務設計に実用的に役に立つ公式を選定したと紹介されており、この計算の特徴は、図式で簡単に計算ができることである。

プラットラスの場合、斜材の応力計算には $\sec \theta$ （正割、 $=1/\cos \theta$ ）、上下弦材の応力計算には $\tan \theta$ （正接）が必要となる。それぞれの数値は斜材の角度と三角関数早見表を用いるほかは、

$$\sec \theta = (\text{斜材の長さ}) / (1 \text{ 格間の高さ})$$

$$\tan \theta = (1 \text{ 格間の長さ}) / (1 \text{ 格間の高さ})$$

によって求められる。犬吠橋の場合、「(3、4、5)」のピタゴラス数を用いたトラスの場合、

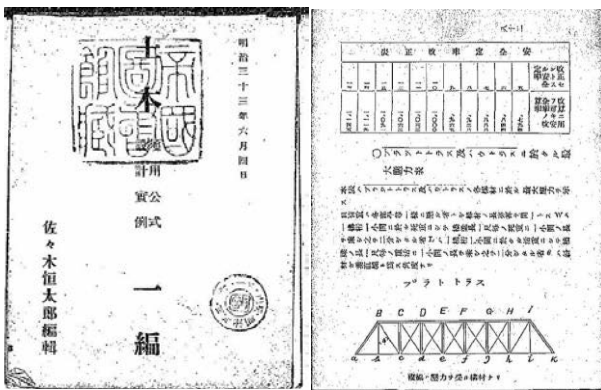
$$\sec \theta = 5/4$$

$$\tan \theta = 3/4$$

となり簡単な有理数として計算することができる。計算機がなかった時代に手計算でトラスの設計を行うにあたって、簡単な有理数を用いて計算時間を短縮し設計工程を高速化しようとする発想は、現場としては非常に合理的な考え方と言える。

また、「(3、4、5)」のピタゴラス数を用いたプラットトラスは一般的にトラス梁のせいが高く、下路プラットトラスとしても建築限界を考慮して路面上の空間を確保することができる。魚梁瀬森林鉄道においては、上路式あるいは下路式として用いることのできるプラットトラスの標準的な考え方であった可能性も否定できない。

これらの結果として、犬吠橋や井ノ谷橋のように、他に類がない特徴的なプロポーションをもつ上路プラットトラス橋が生まれたとするならば、その橋梁設計者である小松亀治の独創性は高く評価されるべきものであろう。



桁	小間ノ数	13	11	10	9	7	6	5	4	3	乗数	
桁	Ab	aB	5.5+5.5	5+5	4.5+4.5	4+4	3.5+3.5	3+3	2.5+2.5	2+2	1.5+1.5	1+1
	Bc	Bc	4.5+4.5	4+4	3.5+3.5	3+3	2.5+2.5	2+2	1.5+1.5	1+1	0+0	0+0
	Cd	Cd	3.5+3.5	3+3	2.5+2.5	2+2	1.5+1.5	1+1	0.5+0.5	0+0	-0.5+0.5	
	De	De	2.5+2.5	2+2	1.5+1.5	1+1	0.5+0.5	0+0	-0.5+0.5	-1+0.2		
	Ef	Ef	1.5+1.5	1+1	0.5+0.5	0+0	-0.5+0.5	-1+0.2				
	Fg	Fg	0.5+0.5	0+0	-0.5+0.5	-1+0.2						
	Gh	Gh	-0.5+0.5	-1+0.2	-1.5+0.8	-2+0.2						
	Hi	Hi	-1.5+0.2	-2+0.2								
	Ab, bc	ab	5.5+5.5	5+5	4.5+4.5	4+4	3.5+3.5	3+3	2.5+2.5	2+2	1.5+1.5	1+1
	Bc, cd	bc	10.0+10.0	8+8	8.0+8.0	7+7	6.0+6.0	5+5	4.0+4.0	3+3	2.0+2.0	1+1
	Cd, de	cd	13.5+13.5	12+12	10.5+10.5	9+9	7.5+7.5	6+6	4.5+4.5			
De, ef	de	15.0+15.0	14+14	12.0+12.0	10+10	8.0+8.0						
Ef, fg	ef	17.5+17.5	16+16	12.5+12.5								
fg	FG	18.0+18.0										
桁	下Ab	ab	5.5+5.5	5+5	4.5+4.5	4+4	3.5+3.5	3+3	2.5+2.5	2+2	1.5+1.5	1+1
	Bc	Bc	4.5+4.5	4+4	3.5+3.5	3+3	2.5+2.5	2+2	1.5+1.5	1+1	0.5+0.5	
	Cd	Cd	3.5+3.5	3+3	2.5+2.5	2+2	1.5+1.5	1+1	0.5+0.5	0+0	-0.5+0.5	
	De	De	2.5+2.5	2+2	1.5+1.5	1+1	0.5+0.5	0+0	-0.5+0.5			
	Ef	Ef	1.5+1.5	1+1	0.5+0.5	0+0	-0.5+0.5					
Fg	Fg	0.5+0.5	0+0	-0.5+0.5								
Gh	Gh	-0.5+0.5										

図5 プラットトラス及ハウトラスに於ける最大応力表⁹⁾

(2) 最大応力表を用いた計算の検証

ここでは、上記書籍の計算表を用いて犬吠橋の応力を計算し現在の構造解析結果と比較、検証した。計算で用いた条件を整理する。

① 格間当たり死荷重 (W)

本書籍には、死荷重の計算が明記されていないため、当時の教科書「土木工学橋梁編」を参照し橋長から導き出せるメリマンの公式による近似値を用いた⁷⁾。

＜鉄道橋の静荷重 (メリマン氏公式)＞

単軌条橋梁の場合 $w=560+5.6L$

w: 橋の長さ1フィートにおける静荷重 (ポンド lbs)

L: 橋の径間長 (フィート ft) = 105ft

従って、 $W=w \times 15/2=8,610\text{lbs}=3.9\text{トン}$

積上げで計算した実重量 3.07 トンに比べると少し大きい数値となっており、メリマン公式は計算の簡便さのため当時の諸外国の事例から一般化したもので森林鉄道のような小規模鉄道施設では実より大きい数値となると考えられる。

② 格間当たり活荷重 (L)

実際に使用された蒸気機関車 (ポーター社製、B-1形) の整備重量 (約 10 トン=22046lbs) を用いて古写真により推定した貨車の積載重量を推定した。

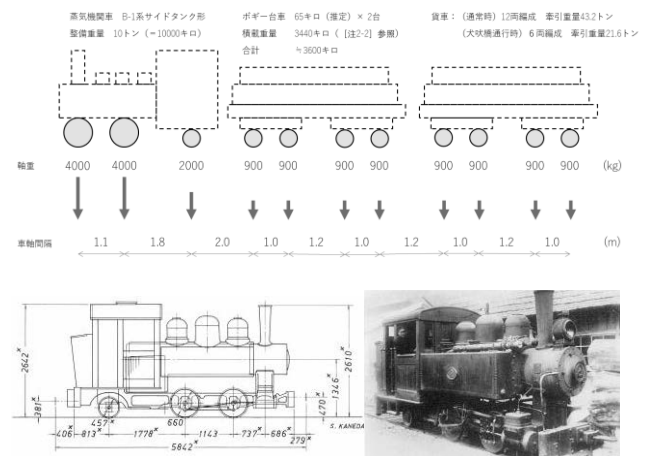


図6 蒸気機関車及び積載貨車の車軸配置と軸重の推定¹¹⁾¹²⁾

③ 計算結果

現代の計算法と比較して、当時の計算法について比較すると、計算結果の軸力は概ね同様の傾向を示すことが判明した。次ページに各条件による計算結果を示す。

計算結果と犬吠橋の部材とを比較してみると、垂直材や上弦材等圧縮応力が大きい部材は溝形鋼をシングルレーシングで組み合わせている。一方端柱を除く斜材や下弦材等引張材になる箇所は、山形鋼をタイプレートで組み合わせている。

表-5 土木須用公式設計実例における最大応力表により求めた各部材の応力

明治大正期の解法で求める各部材の応力				応力：kN	応力：kN	応力：kN	
橋材	【小間の数】7	乗数	応力	死荷重：メリマン公式 活荷重：ボーター機関車	死荷重：実重量 活荷重：ボーター機関車	死荷重：実重量 活荷重：0	
斜材	aB	3W + 3L	$1.25 - \sec \theta$ (25/20)	圧縮	-327.1	-296.4	-112.9
	Bc	2W + 15/7L	1.25	引張	226.8	206.3	75.3
	Cd	1W + 10/7L	1.25	引張	135.2	125.0	37.6
	De	0W + 5/7L	1.25	引張	43.7	43.7	0.0
	Ef	-1W + 3/7L	1.25	引張	-74.1	-63.8	-37.6
臥材	abc	3W + 3L	$0.75 - \tan \theta$ (15/20)	引張	196.3	177.8	67.7
	BC	5W + 5L	0.75	圧縮	-327.1	-296.4	-112.9
	cd	5W + 5L	0.75	引張	327.1	296.4	112.9
	CD	6W + 6L	0.75	圧縮	-392.5	-355.7	-135.5
	de	6W + 6L	0.75	引張	392.5	355.7	135.5
垂面材	Bb	(0W + 0L)	1	-	0.0	0.0	0.0
	Cc	1W + 10/7L	1	圧縮	-108.2	-165.1	-60.2
	Dd	0W + 5/7L	1	圧縮	-35.0	-100.0	-30.1

表-6 現代の解放で求める各部材の応力

現代の解法で求める各部材の応力				応力：kN	応力：kN	応力：kN
橋材	断面形状	使用鋼材： ϕ (寸)	部材断面	死荷重：実重量 活荷重：歩道橋	死荷重：実重量 活荷重：S315T府重	死荷重：実重量 活荷重：0
斜材	aB	H	2[-304.8x88.9x9.5x12.7 (12x3 ^{1/2} x3/8)]	-491.0	-285.1	-109.2
斜材	Bc	D-1	2L-76.2x63.5x7.9x7.9 (3x2 ^{1/2} x5/16)	323.5	218.3	72.8
斜材	Cd	D-3	2L-63.5x63.5x7.9x7.9 (2 ^{1/2} x2 ^{1/2} x5/16)	64.6	80.4	17.9
斜材	De	D-3	2L-63.5x63.5x7.9x7.9 (2 ^{1/2} x2 ^{1/2} x5/16)	-23.8	-41.1	-2.4
斜材	Ef	D-2	2L-76.2x63.5x7.9x7.9 (3x2 ^{1/2} x5/16)	-109.3	-71.3	-18.5
下弦材	abc	C-1	4L-127x76.2x7.6x7.6 (5x3x0.3)	297.7	168.0	65.1
上弦材	BC	A	2[-254x88.9x9.5x12.7 (10x3 ^{1/2} x3/8)]	-487.1	-278.7	-108.5
下弦材	cd	C-2	4L-127x76.2x10.8x10.8 (5x3x0.425)	550.1	292.7	119.5
上弦材	CD	A	2[-254x88.9x9.5x12.7 (10x3 ^{1/2} x3/8)]	-520.2	-290.5	-119.2
下弦材	de	C-2	4L-127x76.2x10.8x10.8 (5x3x0.425)	589.3	324.5	131.6
鉛直材	Bb	D-3	2L-63.5x63.5x7.9x7.9 (2 ^{1/2} x2 ^{1/2} x5/16)	-0.2	0.0	0.0
鉛直材	Cc	B	2[-203.2x63.5x7.9x11.1 (8x2 ^{1/2} x5/16)]	-173.8	-165.6	-43.6
鉛直材	Dd	B-2	2[-177.8x76.2x9.5x12.1 (7x3x3/8)]	-38.5	-80.3	-12.4

5. まとめ

本研究の成果を以下にまとめる。

- ・犬吠橋及のトラス形状の特徴を調査し、旧魚梁瀬森林鉄道施設の同形式プラットトラス橋との類似性を明らかにした。なお、その背景として同一人物による計画・設計の可能性が高いことを指摘した。
- ・魚梁瀬森林鉄道施設の建設において、十分な路面空間が確保でき、上下路トラスのどちらでも適用可能な 3 : 4 : 5 のプロポーシオンを標準設計として取り入れた可能性を指摘した。
- ・同時代の国鉄トラス橋の標準設計及び他森林鉄道施設のトラス橋の現状調査を行った。その結果、魚梁瀬森林鉄道施設のトラス橋に適用されたトラス形状の希少性が高いことを明らかにした。
- ・既往の調査によって当時の設計者として小松亀治の存

在が明らかになっている中、所蔵品として残っている書籍に注目し、構造計算式を犬吠橋に適用し検証した。その結果、現在の構造解析結果とほぼ合致しており、十分な信頼性があることを確認した。

・電子計算機等が発達していない当時の環境において簡単な有理数を用いて計算時間を短縮し設計工程を高速化できることは現場として非常に合理的な考え方であり、安全面での十分な信頼性に加えて計算の効率性を持つことから、実務設計において活用された可能性が高く犬吠橋の設計に影響を与えた可能性が非常に高いことを指摘した。

・犬吠橋に見られる独創性は、明治時代初期から橋梁の標準設計が定着した旧国鉄とは異なり、個別の地形や森林条件に大きく左右される中、山林技師個人の技術及び個性を顕著に表すものといえる。

謝辞：本稿は、高知県道路課安芸土木事務所より委託した犬吠橋調査工事業務に関連して調べた成果です。本稿をまとめるにあたって株式会社長大の竹田達也様、岡本淳一様、中芸地区森林鉄道遺産を保存・活用する会の清岡博基会長、犬吠橋修復・活用計画策定協議会の小野田滋先生をはじめたくさんの方々のご協力と支援がありました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 久保田敬一：本邦鉄道橋ノ沿革ニ就テ、1934
- 2) 西村俊夫：国鉄トラス橋総覧、1957
- 3) 土木史研究委員会：日本の近代土木遺産-現存する重要な土木構造物 2800 選-、2005
- 4) 土木学会 HP 歴史的鋼橋集覧データベース
- 5) 中芸地区森林鉄道遺産を守る会：高知県中芸地区森林鉄道遺産調査報告書、2008
- 6) 佐々木恒太郎：土木須用公式設計実例、1900
- 7) 金井彦三郎：土木工学橋梁編、攻玉社工学校土木講義録発行部、1908
- 8) キルレム・ランキン：土木学(蘭均氏)、上、文部省、1880
- 9) 小西 純一等：明治時代に製作された鉄道トラス橋の歴史と現状 第 1 報~第 6 報、土木史研究講演集、1985~1991
- 10) 小野田滋：鉄道構造物探見、2003
- 11) 金田茂裕：H.K.ポーターの機関車 O&K の機関車補遺、1987
- 12) H.K. Porter Co. : Light locomotives、1908

(2022. 4. 18 受付)