

大阪市電の橋の設計計算について

松村 博¹・五十畑 弘²

¹ 正会員

E-mail: hmatsumura@leto.conet.ne.jp

² フェロー会員 元日本大学教授

Email: hiroshi.isohata@gmail.com

明治末から大正期にかけて大阪市が実施した市電事業で建設された橋の図面の調査を行う一方で、大阪市公文書館に委託されている旧電気局関連の文書の調査を行った。その中になんかの量の橋の設計計算書が残されていることがわかり、その解明を進めてきた。その結果、当時の橋の設計に対する考え方や手法を知ることができた。また、適用された設計方法が橋によって少しずつ違っていることがわかり、そこからわが国における橋の設計指針が整えられる以前の技術者の模索の跡が見て取れる。これらの計算書は橋梁技術発展の軌跡をたどることのできる貴重な資料であり、その解明は他地域における同様の調査や研究に資するものと考えられる。

Key Words: Tramway of Osaka-city, Early 20th century, Design practice, Standards of design, Calculation sheet, Steel bridge, Reinforced concrete structure, Substructure, Dorman Long & Co.

1. 残存する設計計算書

明治末から大正時代にかけて建設された大阪市電の橋梁の図面調査の概要については昨年の研究会で報告された¹⁾²⁾。その一方、大阪市公文書館に委託されている市電関連の文書を調査する中で、かなりの量の市電の橋の計算書が残されていることがわかった。

これらを読み解き、当時の軌道併設の道路橋がどのように設計、計算がなされていたかを明らかにする作業を行い、併せて当時整備されつつあった設計基準との関連についても調べることにした。現在把握できている市電の橋の計算書は以下の通りである。

表-1 残存する大阪市電の橋の設計計算書

橋名（建設年）	計算書名
築港線橋梁—第1号橋、2号橋(明治41年)	築港大道拡張橋梁第1号橋計算書
端建蔵橋(明治41年)	端建蔵橋橋桁耐力計算書
木津川橋(大正2年)	木津川橋計算書
江之子島橋(大正2年)	百間堀川橋計算書
門樋橋(大正2年)	門樋橋耐力設計書
大正橋(大正4年)	九条高津線木津川橋計算書
新樋橋(大正4年)	九条高津線尻無川架橋耐力計算書
川崎陸橋(大正4年)	天神橋西筋線官線鉄道跨線橋橋桁耐力計算書
都島陸橋(大正13年)	貨物線跨線橋設計計算書

城東線跨線橋(昭和2年)	鶴橋線城東線跨線橋耐力設計書
釧橋(昭和2年)	新平野川新橋架設計計算書
城東大橋(昭和32年?)	森之宮緑橋線城東大橋計算書

2. 市電の橋の荷重と材料特性値

構造計算の基礎となるのは、荷重、材料強度、そして計算方法の3点である。以下では、橋の計算書に適用されているこの3点に注目して検討する。

そして、市電の橋の設計にあたってはそれ以前に出された基準や仕様書、設計例を参考にしたと考えられるが、それらとの比較を行うことによって、市電の橋の設計の特徴が明確になると考えた。

(1) 荷重

橋の設計は死荷重と活荷重を載荷して行われるが、以下では活荷重（動荷重）について述べる。

電車荷重としては、15トン車、24トンボギー車が採用されているものが多いが、トンの換算値には英トンと米トン、そしてメトリックトンがある。

大正橋と都島陸橋では米トン、木津川橋（図-1）、江之子島橋、端建蔵橋などでは英トンの換算値が使われている。時代による違いも明確ではなく、違っている理由は不明である。

動荷重（活荷重）として軌道部床組には電車輪荷重が直接載荷されたとして検証され、歩車道部には1平方呎

当り 100 ポンド (488kgf/m²) の等分布荷重が適用された。また、衝動 (衝撃) 荷重としてその 25% (城東線跨線橋では 30%) が加えられた。

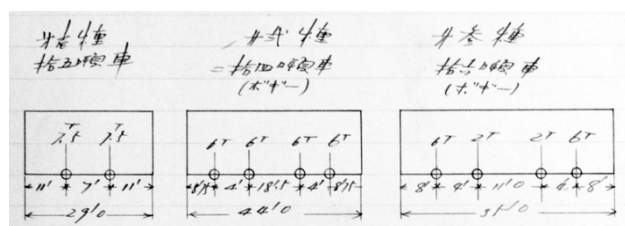


図-1 木津川橋の電車荷重

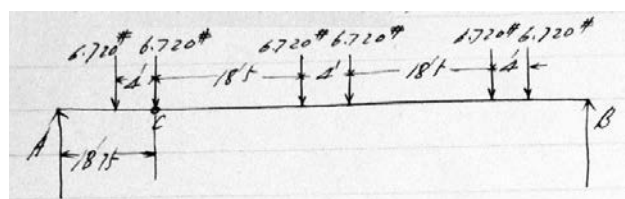


図-2 木津川橋の等斉等布動荷重

(アーチリブに作用する電車荷重は 24 トンボギー車で、輪荷重 3 トンが英トン=1,016kgf で換算されて 6,720lbs、この連行荷重が C 点 (4 分の 1 点) に生じさせる曲げモーメント 337000lbs・ft を等分布荷重へ換算すると、1 呎あたり 640lbs となる。)

そして、特徴的な動荷重としては、等斉等布動荷重を用いるのが一般的であった。これは本桁 (主桁) の計算に適用されるもので、電車荷重によって横桁から伝えられた集中荷重によって主桁の 4 分の 1 点に最大の曲げモーメントが生じる値を等分布荷重に換算した値で、主桁計算の動荷重として載荷して計算されるものである。この動荷重に静荷重 (死荷重)、アーチ橋では温度変化なども付加されて計算がなされた。

アーチ橋の木津川橋の計算では 24 トン車の連行荷重が直接主構にかかるとして 4 分の 1 点の最大曲げモーメントを求め、このモーメントが発生する等分布荷重を算出し (呎当り 640lbs)、それを以下の計算に用いている

(図-2)。桁橋の江之子島橋の計算では 15 噸車が直接主桁に載ったときの最大曲げモーメントを求め、それを等分布荷重に換算 (呎当り 740lbs)、以下の計算に使用している。しかし、端建蔵橋では等斉等布動荷重の換算値を求めず、24 トン車の輪荷重を直接主桁に載荷して横梁分格点 (横桁の結合点) における曲げモーメントなどを算出している。電車荷重は横桁を介して主桁に伝えられるが、そのようにはせず、直接輪荷重を載荷したとしても大きな違いはないと判断されたと考えられる。

等斉等布動荷重の考えを導入しているのは計算を簡略化するためであるが、必ずしも統一されていたわけではない。大正橋のアーチの計算では軌道部の荷重も一律に 100lbs/ft² を載荷している。

新平野川橋 (劔橋) はおそらく第 1 次大阪都市計画事

業の設計仕様が適用されていると考えられ、計算は kg-m、つまりメトリックトン換算になっている。一方、建設年代が近い都島陸橋では従来の電気局仕様が適用されたとも推測され、ft-lb で行われている。

前者の下部工の設計には地震荷重として死荷重の 0.2 が考慮されているのに対して、後者では地震荷重は考慮されておらず、「橋脚橋台設計」に関しては「橋脚橋台に付いては別に危険視すべき所なく且構造物外見上非常に過強にできておれば別に証算を用いず」とされているのみである。

(2) 鋼材の材料強度及び係数

計算書に鋼材強度などが列挙されていないものも多いが、最も詳しく示されている木津川橋のものを例にして、計算に用いられた材料強度や材料係数を拾い上げると表-2 のようになる。また参考のために明治後期から大正初期に作られた仕様書などに採用されている値を表-3 に示す。

木津川橋の値を kgf-cm に換算すると、引張強度は 1055kgf/cm²、工場で打つリベットの剪断強度は、633kgf/cm²、弾性係数は 1.8×10^6 kgf/cm² (現在の鋼材は 2.1×10^6 kgf/cm²)、伸縮率 (線膨張係数) は 1.17×10^{-5} (1℃当たり) となり、現在の鋼材とはかなり異なる値となっている。

大正橋では基本的な引張強度は 17000psi (1200kgf/cm²)、曲げ強度は 16000psi などとなっており、弾性係数や温度収縮率の値も木津川橋とは違っている。その他の橋の数値を計算書から拾い出すと、端建蔵橋、江之子島橋は木津川橋と同じ値になっており、新櫛橋、門樋橋、川崎陸橋でも同じ数値が確認できる。

市電の橋の鉄材は鋼を前提にしていたが、明治末期においては、許容値は鋼材の破断強度から安全率 4 程度を目安として決められており、鋼の降伏点を基準にして決められたものではないと考えられる。鋼材の生産精度が増すにしたがって安全率は下げられ、許容値は高くなっていった。

市電の橋に使用された鋼材は当時の事情から大半が輸入材であったと考えられる。許容強度が橋によってばらつきがある理由は把握できていないが、メーカーの仕様に差があった可能性はある。

(3) 鉄筋コンクリートの特性値

鉄筋コンクリートに関しては床版の計算からその数値が確認できる。その数値は表-4 の通りである。

表-4 のように、コンクリートや鉄筋の許容値、弾性係数の比が橋によって違っている。参考に明治 42 年に大阪市土木課で作られた『鉄筋混凝土計算規定』にある数値を示した¹⁶⁾が、これとも違いがある。大阪市内でも試

行錯誤の段階で、局によっても異なり、また担当者個人の判断で採用していた結果であるかも知れない。劔橋の

例のように大正末期から昭和初期になるとRCの基準も整備され、共有されるようになったと考えられる。

表-2 市電橋における鋼の材料特性値 (psi=ポンド/平方吋) 換算: $\times 0.0703 (\text{kgf/cm}^2)$

	木津川橋 (T2)	大正橋 (T4)	江之子島橋 (T2)	端建蔵橋 (M42)	都島陸橋 (T13)
抗張強度 (引張強度)	15000psi (1055kgf/cm ²)	17000psi			16000psi
抗压強度 (圧縮強度)	15000-70l/r l: 部材の長さ (inch) r: 最小環動半径 (inch) (断面2次半径)	風荷重載荷時 17000psi			
抗弯強度 (曲げ引張強度)	15000psi	16000psi	15000psi	15000psi	16000psi
抗剪強度 (剪断強度)					
: 工場打ちリベット	9000psi (630kgf/cm ²)	11000psi			
: 現場打ちリベット	7000		7000psi	7000psi	
: 鉋桁腹板	9000		9000psi	9000psi	
: 栓桿 (ピン)	9000				
抗挫強度 (支圧強度)		ピンの支圧強度 : 15000psi			
: 工場打ちリベット	18000psi		18000psi	18000psi	20000psi
: 現場打ちリベット	14000			14000psi	18000psi
: 栓桿 (ピン)	18000				
: 転子 (ローラー)	長さ1inchにつき: 径 $\times 500$				
木材強度 (檜材)				1000psi	
弾性係数 (Modulus Elasticity)	26, 000, 000psi	30, 000, 000psi			
温度伸縮率 (Coeff. of Expansion)	0. 0000065 (華氏1° に付き) (1.17×10^{-5} (1° Cあたり))	0. 000006 (華氏1°)			

表-3 仕様書などに採用された材料特性値 (psi=ポンド/平方吋)

	廣井・Plate-Girder (M21) ¹²⁾	Waddel・示方書 (M35) ¹³⁾	関場・仕様書 (T3) ¹⁴⁾
引張強度	鋼基本値: 10000psi 設計許容値: 9600psi	鋼: 16000psi 鍛鉄: 15000psi	鋼: 16000psi
圧縮強度 l: 部材長、 r: 断面 2 次半径	鋼基本値: 9000psi 設計許容値: 8400psi	両端方形 鋼: $12000-45 \cdot l/r$ 鍛鉄: $9000-30 \cdot l/r$	$16000-70 \cdot l/r$
曲げ引張強度		1 等橋の場合 鋼: 20000psi 鍛鉄: 15000psi	20000psi
剪断強度 : 工場打ちリベット : 現場打ちリベット : 板桁腹板	リベット許容値: 7200psi 腹板許容値: 6400psi	鋼、1 等橋の場合 工場リベット: 9000 現場: 工場打ちの 25%減 腹板: 9000 (実用は 5000 以下)	12000psi 10000 10000 (腹板の剪断)
支圧強度 : 工場打ちリベット : 現場打ちリベット : 転子 (ローラー)		鋼、1 等橋の場合 工場リベット: 15000 現場: 工場打ちの 25%減	24000psi (工場リベット) 20000 (現場、圧縮機使用) 18000 (現場、手打ち) $600 \cdot d$ (d: ローラー径)

表-4 市電橋における鉄筋コンクリートの特性値

	大正橋 (T4)	川崎陸橋 (T4)	劔橋 (S2)	鉄筋混凝土計算規定 (大阪市土木課: M42) ¹⁶⁾
コンクリートの許容圧縮 応力度 (ポンド/平方吋 = psi)	400 (psi) $\approx 28 \text{ kgf/cm}^2$	—	42kgf/cm ²	換算値: 25 kgf/cm ²
コンクリートの許容剪断応力度	—	—	4. 25kgf/cm ²	
鉄筋の最大耐伸応力度	12000 (psi) $\approx 840 \text{ kgf/cm}^2$	—	1125kgf/cm ²	鋼: 800 kgf/cm ²
コンクリートと鉄筋の弾性度の比	18	13	15	18
鉄筋コンクリートの 単位体積重量	1501bs $\approx 2402 \text{ kgf/m}^3$	1401bs $\approx 2243 \text{ kgf/m}^3$	2242kgf/m ³	

3. 適用部材の決定

(1) 計算の方法

部材の決定の根拠となる構造計算は、複雑な計算は行っていない。床版(トラフプレート、鉄筋コンクリート)、縦桁(小桁)、横桁、そして主構のプレートガーダーなどはいずれも単純桁に分解して、直接または間接の荷重を載荷して断面力を計算して安全性を確認している。型鋼を用いた場合はメーカーのカタログにある断面係数の数値を引用してチェックを行っている。

アーチの計算については、木津川橋の場合はアーチ曲線を2次曲線と仮定して影響線から水平力を求める一般的な方法によっている。大正橋では図解法を用いており、その解法を確かめることはできなかったが、アーチを2次曲線に置き換えている点は共通している。(なお、下記の'はフィート、"はインチを示す)

(2) 床組

床組には大別して4種類があって、それぞれに共通の材料仕様、計算法が見られる。床組の断面寸法は軌道部では市電の輪荷重、歩車道部では等分布荷重を載荷して計算されているが、部材長はそれらが単純支持される横桁間隔や主桁間隔によって決められる。

a) 小桁(縦桁)

軌道の枕木を直接支持する縦桁(計算書、図面では小桁と表現されていることが多い)は輪荷重が直接載る単純梁として断面力が求められ、適用材が決められる。残存する計算書では見られないが、小断面のI型鋼が使われた床組が一般的な形で、多くの例がある。土佐堀橋の軌道部では枕木を9"×4"(21lbs/ft)のI型鋼が支え、それが12"×5"(32lbs/ft)の横桁(Cross beam)に連結されているが、互いのウェブが山型鋼を介して綴釘(リベット)で連結されている(図-4 ①)。新船津橋でも同じ形が見られる。

西道頓堀天王寺線の南海線跨線橋では小桁に10"×5"(30lbs/ft)、横桁に20"×7(1/2)"(89lbs/ft)のI型鋼が使われており、天満専用橋では小桁が8"×5"、横桁が12"×5"断面のI型鋼になっている。また、湊町橋では小桁には7"×3.76"(17.5lbs/ft)、横桁には人車道部に15"×5.65"、軌道部に9"×4.33"のI型鋼を用いて床組が構成されている。

小規模で簡易な橋を見ると、花宮橋では小桁の6"×4(1/2)"のI型鋼が、8"×5"断面の横桁の上に載る形になっており、横桁は24"×7(1/2)"のI型鋼の主桁のウェブにリベットで止められている。同様の構造が築港線の玉藻橋、南北線の叶橋でも採用されている。

各々の部材は小桁に輪荷重が直接載る状態で、それを支える横桁にも小桁からの集中荷重が作用することを想

定して単純桁で計算されていると推測される。

市電の橋に適用されたI型鋼は寸法から推定すると、ほとんどの部材がドーマンロング社のカタログ¹⁰⁾にあるものである。ただ、湊町橋で用いられたI型鋼はドーマンロング社のカタログには見当たらず、アメリカ仕様の製品であったのかも知れない。

b) トラフプレート

床版にトラフプレートが用いられた橋には、大正橋、木津川橋、本町橋、難波橋などがある(図-4 ②③)。その寸法と型名を表-5に示す。一部の断面も図-3に示す。型はドーマンロング社の製品名で表されている¹⁰⁾。

表-5 市電の橋に適用されたトラフプレート

橋名	場所	床材：トラフプレート		
		ドーマンロング社 型名、波幅 ¹⁰⁾	平方呎 当重量	断面 係数
日本橋	軌道部	A ミニマム型 14"		
	車道部	O ミニマム型 12"		
木津川橋	軌道部	A マキシマム型 14"	23.1lbs	11.05
	車道部	O ミニマム型 12"	13.4	4.92
本町橋	軌道部	O ミニマム型 12"	13.4	
	車道部	O ミニマム型 12"	13.4	
江之子島橋	軌道部	A ミニマム型 14"	17.6	8.40
	車道部	O ミニマム型 12"	13.4	
門樋橋	軌道部	A ミニマム型 14"	23.1	
	車道部	O ミニマム型 12"	13.4	
大正橋	軌道部	B ミニマム型 16"	21.8	13.50
難波橋	軌道部	O ミニマム型 12"		

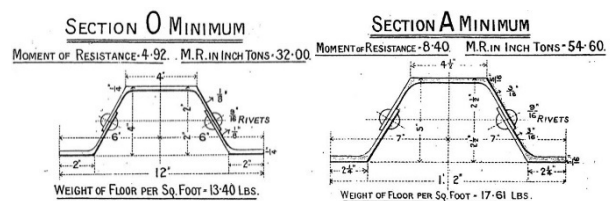


図-3 トラフプレート断面図(ドーマンロング社カタログ)

なお、上図の中ではMoment of Resistance(注-1)が便宜上断面係数の値を示している。

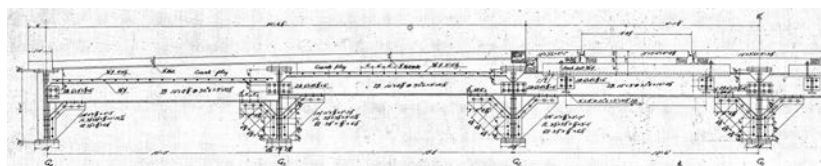
計算書では部材の各断面の曲げモーメントを許容曲げ強度で除して必要断面係数を算出し、使用材料の断面係数と比べ、それ以下であれば、良しとしている。また横桁に適用されたI型鋼や山型鋼においても、カタログにある断面係数を基準に使用材を決めたと考えられる。

なお、長堀橋や新出入橋には厚さ5/16"(約8mm)のバックルプレートが用いられているが、その力学的性能は不明であるので、詳述はできない。

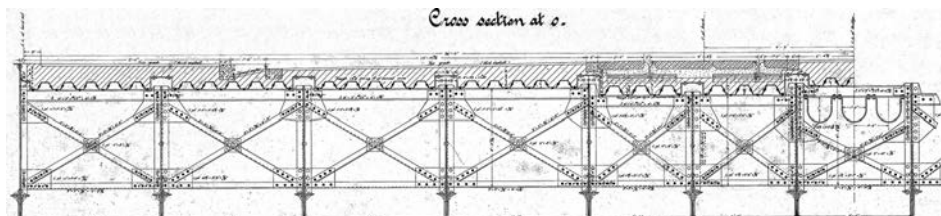
c) RC 床版

鉄筋コンクリートの床版が使われた橋は多くあるが、
計算書が残されているのは、大正橋、川崎陸橋、剣橋で

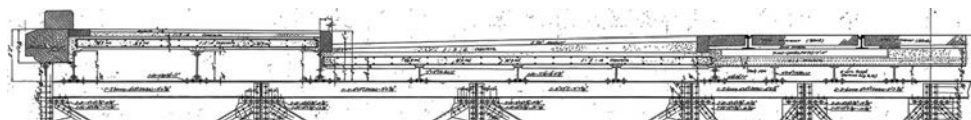
ある。RC の耐力計算の手法には変わりはないが、これらに使われた物理量には表-4 のようにばらつきがある。



①土佐堀橋：枕木下の小桁(縦桁) 9" × 4" (21lbs/ft)、横桁(Cross beam)は 12" × 5" (32lbs/ft) の I 型鋼よりなる



②木津川橋：軌道部にはドーマンロング社のトラフプレートA マキシム型、車道部には0 ミニム型が採用され、6"×5"のI形鋼の床桁に支持されている



③難波橋： 軌道部はトラフプレート0 ミニマム型、車道部は複鉄筋のRC床版が、7" ×4" のI型鋼の縦桁に支持されている

図-4 市電の橋の床組断面図

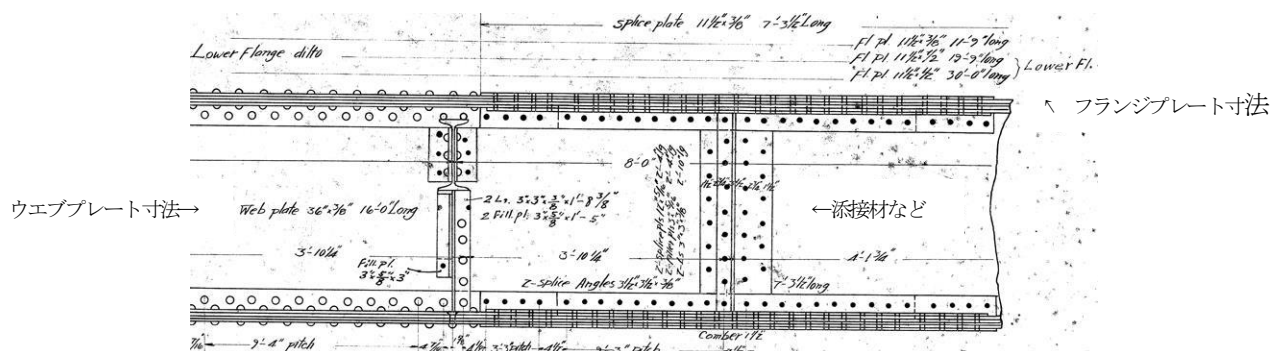


図-5 端建蔵橋の主桁詳細図

(3) 床桁

大正橋や川崎陸橋のような特別な構造は別として、ほとんどの橋では床組は横桁が支える形になっている。横桁は主桁間隔のスパンしかないので、部材は短く、主としてI型鋼が適用されている。

木津川橋の横桁にはドーマンロング社の I 形鉄 BSB. 10 を使用することにしており、同社のカタログによると、重量は 25lbs/ft で、断面 2 次モーメントは 43.61 となっている。都島陸橋の計算書では床桁の I-beam にカーネギー スティールの I-9" , 25lbs/ft を使用するとしている。

大正橋では横桁のスパンが大きいので、床版は縦桁に支えられている。軌道部のトラフプレートの床を支える縦桁には高さ 15"、重さ 60.8lbs/ft の I 型鋼が使われ、

「カーネギーポケットブック」にある断面係数 81.2 によってチェックしている。同じように歩車道部の RC 床版を支持する縦桁には高さ 10"、重さ 251bs/ft の I 型鋼が使われている。

このように英米の鉄鋼製品のカタログを使って安全性をチェックするのが一般的であった。そして、各部材にはその社の製品がその通り使われたと考えられる。

(4) 主桁、主構

市電の橋の支間は、90m を超える長さをもつ大正橋を除くと、アーチが適用された木津川橋でも 22.9m、難波橋の最大支間は 21.9m となっており、桁橋の最大支間は 19m に満たない。

桁に適用された鋼材とスパンの関係を見ると、概ね支間長(桁長)が 35feet 以下の橋では I 型鋼が適用され、それ以上では組立の鋼板桁になっている。

ただ、桁長 36' の千舟橋の主桁には 24" × 7(1/2)" の I 型鋼が使われているが、支間長 31.5' (桁長 34') の信濃橋では組立の鋼板桁が用いられ、ウェブに 26" × 3/8" の板材、その両端のフランジには 2 本ずつの 4" × 4" × 1/2" 断面の山形鋼をリベット止めし、中央部に 10" × 5/8" のカバープレートに 1 枚重ねて構成されている。このように桁長 35feet 前後の橋では型鋼桁と組立桁の適用が混在している。

桁長が 54feet の土佐堀橋の主桁ではウェブに 36" × 3/8" の板材、その両端に 2 本の 6" × 6" × 5/8" 断面の山形鋼をリベット止めし、縁応力に応じて 12(1/2)" × 5/8" 程度のカバープレートを 1~3 枚重ねて構成している。また、端建蔵橋の主桁は同じウェブにフランジとして 4" × 4" × 5/8" の山形鋼が用いられ、必要に応じてカバープレートが重ねられている(図-5)。このような鋼板桁の製作法は、日本橋や長堀橋の変断面の桁橋においても、また難波橋や木津川橋、本町橋のアーチ構造においても基本的に同じである。

市電橋梁に用いられた鋼材は、よく似た型のものが使われている。

破格のスパンを持つ大正橋のアーチ構造も図-6 に見るように幅 24"、厚 5/8" の鋼板に 4 本ずつの 6" × 6" × 3/8" の山型鋼をリベットで止めた上下弦材を 3(1/2)" × 3(1/2)" × 3/8" の山型鋼で結んでトラス状のアーチを作り、それを並列させてカバープレートで結んで構成されており、基本的な材料は他の橋のものと大きくは変わらない。

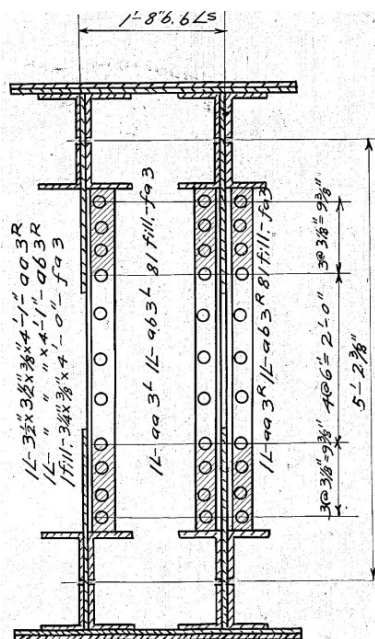


図-6 大正橋のアーチ主構断面図

これらの鋼材はほとんどがドーマンロング社のカタログ¹⁰⁾に見えるもので、一部にアメリカ仕様の鋼材も見られる¹¹⁾。同社のカタログには、桁を構成する鋼材の組合せが多数紹介されており、設計者が選択しやすい内容になっている。

当時の設計者は、標準的な設計ではこのようなカタログから適用断面を選んでいた可能性は高いと考えられる。逆に言えば、材料の選択はそのようなカタログに制約されていたとも言えよう。また、これらの橋に用いられた鋼板の厚さはほとんどが 3/8" (9.5 mm) になっており、この板厚が当時の標準的なものであったと考えられる。

(5) 下部工

市電の橋の下部工は総じて貧弱である。地震に対する考慮もなされていない。明治、大正期に完成した橋の計算書には下部工への言及はほとんどないが、一定の目安はあったはずである。

大正橋の計算書の最終章に「杭の支持力」に関して、長 30 尺末口 7 寸の米松杭の表面摩擦を 1 平方呎当り 150 ポンドを見込み、現場で載荷試験を行った上で本数を決める旨の記述がある。

その他の橋では、計算上は基礎の支持力に対する安全性は確認されていないようであるが、主要な橋の橋台、橋脚の基礎には松丸太杭が底面にかなり密に打ち込まれており、その寸法は末口 6 寸、8 寸 (18, 24 cm)、長さ 9 尺、12 尺、18 尺 (2.7~5.4m) など、地盤によって使い分けられている。

明治時代中期に建設された橋にはスクリーパイルが多く採用された。市電の橋においても端建蔵橋を始め、長堀橋、日本橋や新船津橋でもスクリーパイルを用いたパイルベント橋脚が採用されている。スクリーパイル基礎の端建蔵橋の橋脚が大正中期に沈下して交通が遮断され、架け換えを余儀なくされたことが影響して、それ以降はほとんど採用されなくなったと考えられる。

その他の橋では、厚さ 1m 程度のフーチング基礎や、土中に簡易な木矢板締め切りをした中を深さ 3~4m ほど掘削してコンクリートを打設した基礎の中に、山形鋼を細い鋼材でつないで構成された鋼製柱を埋め込んだ橋脚が多くみられる。

大正 12 年の関東大震災以降、橋に耐震耐火設計が考慮されるようになったが、その後の市電橋梁への対策は遅れることになった。

4. 市電時代に先行する基準、仕様書、参考図書

市電の主要な橋が建設されたのは、明治末期から大正中期にかけての 10 数年の間である。これらの橋の設計にあたってはそれ以前に出された設計基準や図書が参考に

されたはずである。それらがどのような形で参考にされたかを調べることは、市電の橋の設計の基本を知る手掛かりになると考えられる。以下では主に設計荷重について見ることにする。

明治～大正初期の道路政策は不十分で、道路橋に対する基準の規定もきめ細かなものではなかった。道路橋に関する基準が決められたのは明治 19 年(1886)のことで、歩車道の区別なく 400 貫/坪(455kg/m²)を載荷するものであった。この数値はワデルによって推奨されたとされている³⁾。

次に国から基準が示されたのは大正 8 年の「道路法」の交付に合わせて決められた「道路構造令」などの規定であった。ただ、市電の主要な橋の建設はそれ以前のことである。

明治 20 年代から 30 年代には橋梁設計に関する本が幾つか刊行されている。中でも後の設計の参考となる基準を示したものとして、以下の 3 つがある。

- ① 廣井勇の「プレートガーダー建設」に関する設計基準(1888、1893、・・・1914 改定)：参考文献 12)
- ② ワデルの「鉄橋設計示方書」(1902、金井彦三郎訳)：参考文献 13)

次いで、大正初期には以下の図書が発刊された。

- ③ 関場茂樹の「標準橋梁設計仕様書」(大正 3 年(1914))：参考文献 14)

①では、初めに梁理論によるプレートガーダーの構造特性を説明し、続いて鉄道が通る支間長 50ft の橋を実例としての計算法を提示している。その中で具体的な荷重の説明がなされている。なお本書は版を重ね、数値も時代に合わせて修正されている。

②では公道橋の設計の指針を示しているが、構造としては主にトラスを想定している。そして橋を 1 等から 4 等に分類して適用値を提案しているが、1 等橋は常に重い貨物を運搬する、大都会の市街に用いるもので、複線の市電が走る道路はこれにあたると考えられる。動荷重(活荷重)としては径間長 100ft 以下の橋には 100 lbs/ft²を載荷するとし、径間長 350 呎では 65lbs/ft²としてその間の荷重を径間長によって遞減している。そして狭い幅員の橋であっても 1800lbs/ft を下限とするとしている。また、集合荷重(集中荷重)としては 30000 lbs の道路用ローラー(前輪 12000 lbs、後輪 9000 lbs×2)を載荷して各部材を計算するとしている。ただ、市街電車の記述はない。

③の「仕様書」では公道橋の動荷重(活荷重)として、第 1 種市街橋の床桁及び支承に対しては、基本的に市街鉄道軌道上に 24 トン(注-2)の集合荷重、具体的には 1 軸荷重を 12 トン、車軸間隔を 10ft、軌道間を 5ft とし、単線の場合は車幅を 12ft、複線の場合は車幅を 23ft とすること、そして、残りの橋面には 100lbs/ft²(488 kg/m²)

を載荷し、径間 100ft 以下の主構造では 1 軌道あたり 1800lbs/ft(2680kg/m)、軌道部以外には 100lbs/ft²を載荷するものとしている。また、衝撃荷重として市街鉄道が敷設されている橋梁には、最大応力を発生させる径間上の動荷重の長さL(ft)に対して、(200/(L+300))の係数を加えるとしている。

この仕様書は大正 3 年に発刊されたものであるが、関場は 5 年にわたるアメリカでの研修後の明治 41 年には横河橋梁製作所の技師長に就任しており、一方、横河橋梁は大正橋、難波橋など大阪市電の多くの橋の製作を行っており、その設計に影響を与えた可能性は考えられる。ただ、市電の橋に適用された荷重を見ると、関場の『仕様書』の規定が直接適用されたようには見えない。

明治 30 年代に刊行された橋梁設計に関する参考書には、文献 11)、18) などがある。

文献 18)では、桁橋の人道橋の静荷重として、床組の重さは 1 平方呎(フィート)あたり 20~25 封度(ポンド)、主桁の 1 呎の重さは $W=2 \cdot l+50$ (ただし l =橋梁の長さ)とし、動荷重は 1 平方呎(フィート)あたり 50~120 封度とし、かなり幅を持たせた数値が提案されている。

文献 11)では、ドーマンロング社の型鋼やアメリカのメーカーの鋼材表を示し、設計者に選択の利便を提供しており、大正 8 年(1919)公布の道路構造令の規定にも対応した改定もされている。

当時は、鉄筋コンクリートに関する調査研究も盛んで、基準化への提案も多く行われている。その先駆的なものが、大阪市土木課で明治 42 年に作られた「鉄筋混凝土計算規定」である。この規定を作るにあたってはオーストラリアの規定を始め、多くの国の基準を調査し、材料強度や設計法の提案も盛り込んでいる。

これに続いて大正 3 年に鉄道院で「鉄筋混凝土橋梁計算心得」が制定されている。この規定では公道橋に関する荷重にもかなり詳しく言及されており、等分布荷重だけではなく、集中荷重や衝撃荷重の規定もある。また内務省においても大正 4 年に「鉄筋混凝土橋梁仮取締規則」が作られた。この規則では交通頻繁橋梁に対しては集中荷重として 16 トンの自動車荷重と 15 トンの転圧機、等分布荷重として 125lbs/ft²(610kg/m²)などを載荷することが規定されている¹⁶⁾。

これらの規定は RC 橋梁に関するものであるが、このような試行が大正 8 年の「道路構造令」などの荷重の規定につながっていったと考えられる。

5. 市電の橋の構造計算の特徴

市電の橋の構造設計の特徴をまとめると以下のようになる。

- ・ 荷重や材料特性値の設定においては、軌道部への載荷

の仕方や歩車道部への荷重の大きさなどで共通点が見られるが、大正橋のように独自の設定がなされた橋もあり、各橋でばらつきがある。したがって設計部局内に統一基準を作る模索はあったものの細部では設計者の判断に任されていた可能性が高かったと考えられる。

- ・市電の橋の支間長は、大正橋を除くとアーチ橋でも20数m以内、桁橋は20mに満たず、ワデルや関場の仕様書で提案されているような支間長による荷重の通減は適用されていない。

- ・橋の計算方法では各部分を単純梁に置き換えるなど、簡略的な方法によっている。また主構造への载荷も計算を簡略化する方法が採用されているが、橋によって違いが見られる。

- ・桁橋の主桁構造の選択にあたっても型鋼桁と組立桁の適用にばらつきが見られ、標準設計のようなものがあったとは考えにくい。

- ・設計計算は材料の許容強度を基本にして行っているのは当然であるが、当時はまだ許容応力度設計法は十分に確立されておらず、各部材の断面決定にはドーマンロング社などのメーカーの鋼材カタログに示された断面係数によっている場合が多い。そのため材料の選択の幅は限定されていたはずである。しかし、よく似た材料を用いながら、異なる選択も見られ、設計者の判断に任されていたように見受けられる。

- ・先行する基準、仕様書に示された数値、例えば等分布荷重の100lbs/ft²などのように、共通している部分もある。しかし市電の橋の計算の基になった基準を絞り込むことはできなかった。

- ・大正橋もそうであるが、担当者の独自性は尊重しながら、設計部局内では統一基準に向けての模索は続けられていたと考えられる。

この時代は事業全体もそうだが、設計の面でも「歩きながら考える」の喩えが当てはまる、模索の時代であったと言える。

7. 謝辞

以上の記述は各橋の図面の詳細な説明と計算書の解説に基づいている。研究会に参加していただいている方々の努力の賜物である。ここに改めて感謝を申し上げたい。

注-1: Moment of Resistance は通常は抵抗モーメントを示すが、文献 10) では断面係数を示しており、市電の床組の計算ではこの値を用いている。

注-2: 関場はアメリカの仕様書類を参考にしていることから米トン(ショートトン)の可能性もあるが、メトリックトンとも考えられる。

<参考文献>

- 1) 黒山泰弘 松村 博: 大阪市・市電事業で建設された橋梁に関する図面調査とその分析 第37回土木史研究会 2017年6月
- 2) 小澤広直 佐々木 葉: 大阪市営電気軌道事業による橋梁の全体像と特質 第37回土木史研究会 2017年6月
- 3) Hiroshi ISOHATA, Tetsukazu KIDA: Development of design and theory bridge structures in modern Japan (近代日本の橋梁設計技術および、構造解析理論の発達について)「土木史研究 第21号 審査付き論文」2001年5月
- 4) 五十畑・福井: 土木アーカイブの確立に関する研究
http://www.cit.nihon-u.ac.jp/kouendata/No.41/3_doboku/3-014.pdf
- 5) 福井次郎: 橋梁設計技術者・増田淳の足跡 「土木史研究論文集 Vol.23」2004年6月
- 6) 橋梁研究会編: 「鋼鉄橋梁設計資料」昭和28年4月
- 7) 土木学会: 「日本土木史一大正元年～昭和15年」昭和40年12月
- 8) 多田宏行編著: 「橋梁技術の変遷―道路保全技術者のために」2000年12月
- 9) 大田孝二: 鋼橋床版の発展経緯に関する調査研究 土木学会論文集 No.658/-48 pp.45～57 2000.9
- 10) Steel Sections DORMAN, LONG & CO., Limited : 1895 McCorQUODALE & CO., limited , London
- 11) 中村健一: 「橋梁学上巻」明治44年5月初版、大正15年4月11版、工業雑誌社
- 12) Isami Hiroi, Plate-Girder Construction, D Van Nostrand Publisher, New York, 1888
<https://archive.org/stream/plategirdercons02hiroogoo?ui=embed#page/n4/mode/2up>
- 13) J. A. L Waddel, 金井彦三郎訳: (ワデル氏) 鉄橋標準仕様書, 建築書院, 1902
<http://dl.ndl.go.jp/info:ndl.jp/pid/845977/8?tocOpenedNodeIds=info%3Andl.jp%2Fpid%2F845977&tocCloseNodeId=info%3Andl.jp%2Fpid%2F845977&viewMode=>
- 14) 関場茂樹: 標準橋梁設計仕様書. 丸善, 1914.9
<http://dl.ndl.go.jp/info:ndl.jp/pid/951504/6>
- 15) 日本道路協会編: 日本道路史, 昭和52年
- 16) 山根巖 我国への鉄筋コンクリート橋導入の技術史的研究 pp.245～259, 京都大学学位論文, 2002.5
https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/138480/2/D_Yamane_Iwao.pdf
- 17) 鋼橋技術研究会: 鋼橋図面の資料性に関する調査研究部会報告書Ⅰ、Ⅱ、平成20年5月
- 18) 石井槌太郎: 橋梁学 (鉄道橋及人道橋), 博文館, 明治37年8月

(2018.4.9 受付)