

近世の橋脚杭の施工法について*

A Study on Pile Driving Methods for Bridge Piers in the Edo era

松村 博**

by Hiroshi Matsumura

要 旨

東京都立大学蔵の水野家文書の中にある「矢作橋杭震込之図」には近世の岡崎・矢作橋の現場工事の様子がリアルに画かれている。この図を元に、他の地域の橋に関する文書、例えば豊川の吉田橋や隅田川の両国橋の工事記録などを参考にすることによって、近世における主要な橋の橋脚杭が、杭頂部に架台を組み、その上に土俵を乗せて荷重を加え、綱で揺らせることによって建て込んでいく、いわゆる震込(ゆ込み)工法によって施工されていたことを明らかにした。さらにこの工法の従事人数や作業能率などを検討し、施工された杭の耐荷力を「道路橋示方書」の解析法によって計算することによってこの工法の有効性と限界点を明確にした。そして当時の基礎施工技術の限界が急流河川への架橋を阻んでいた要因であったことにも言及した。

1. はじめに

近世以前の橋はほとんどが木製の桁橋で、その橋脚のほとんどに木柱のパイルベント形式が用いられていた。その形は古くは絵巻物などに画かれ、近世では各種の名所図会や錦絵などによって見慣れたものとなっている。しかし、画かれているのは水面から上の部分のみで、ましてその施工法を示したものは見当たらない。このため、近世以前の橋脚構造やその施工法にはあまり言及されることはなかった。

東京都立大学付属図書館に寄贈された水野家文書の中に、三河・岡崎の矢作(やぎ)橋の絵とともに『矢作橋橋杭震込之図』(写真-1)という杭の施工の様子などを画いた絵がある。この絵には、橋脚杭の上に多数の土俵を乗せて荷重をかけ、両側から大勢の人が綱を引き、杭を揺すって押し下げていく工事の様子が画かれている。施工機械が未発達な時代にはこのような工法が一般的であったと考え、以下では主として近世の比較的規模の大きな木橋の橋脚の施工法の検討を試みた。

2. 近世の基礎形式

規模の大きな河川に橋を架け、それを維持していくためには、経済的な裏付けと政治的な安定が必要であった。天下統一を目指す織田信長は勢多(せ)橋と宇治橋を架けたが、「末代までの人助けとなる丈夫な橋を架けるように」命じている¹⁾。両橋とも幅4間(約8m)の、幹線道路にふさわしい橋であったが、その構造などの詳細は伝えられていない。豊臣秀吉も八幡・橋本の淀川に長さ350m、幅10mの長大橋を架けた。この橋の柱数は138本、根入れは1丈余(約3m)であったとされる²⁾。さらに鴨川に三条橋と五条橋を架けているが、いずれも石柱が採用された。三条橋の擬宝珠には「盤石(ばんじつ)の礎が地中五尋(びん)(7~8m)に入れら

* keyword : 近世、技術史、橋梁

** 正会員 (財)大阪市都市工学情報センター

(〒541 大阪市中央区北浜3丁目5-22 オリックスパビル3F)

れた」と彫られている。そして大坂築城にともなって、当時の淀川や大和川にも架橋されている。

徳川氏も江戸入府からしばらくして千住大橋と六郷橋を架けた。徳川時代に入ると江戸では隅田川に四大橋が次々と架けられ、大坂でも淀川に難波三大橋が架けられた。さらに街道の整備にともなって、東海道では矢作橋、吉田橋、瀬田橋、京の三条橋などが幕府の直轄で整備されるようになった他、各藩にも街道整備を命じ、山陽道では岡山の京橋、広島（えにう）の猿猴橋、元安（もとやす）橋などが架けられ、北陸道に沿った福井には九十九（つくも）橋が、金沢では犀川、浅野川に架橋されている。

これらの主要橋梁の構造は、当時の絵などから判断するといずれもパイルベント橋脚に支えられた桁橋であったと考えられる。材料としては三条・五条橋が石柱橋で、九十九橋が「半石半木」と言われたように半分に石柱が用いられていたが、他の橋は木柱、木桁の典型的な木橋であった。

施工法については、石柱の場合は河床に穴を掘って建て込む、掘立て式であったと想像される。木柱の場合は後に紹介する「震込」工法で施行されたのか、日本の河川は冬季には水量が大幅に減少するので、掘立て式を併用したのか、いずれかであろう。特に瀬田橋のように地盤の堅い所での杭施工にどのような工法が用いられたのか興味深いが、現在のところそれを検討する適当な資料を得ていない。

3. 矢作橋の杭施工の図

前述の『矢作橋杭震込之図』(資料-1、写真-1)には、杭の建て込みを中心に現場作業の様子が詳しく画かれており、当時の現場の様子がよく分かる。

杭の建て込みでは杭頂に大きな架台(連台)を組み、その上に数百の俵を乗せ、上に突き出た棒に縄を掛けて両側へ張り、片方十数人の人が引っ張っている。その周辺では扇子や采払いのようなものを持って音頭を取っている人、俵を担いで待機している人などがいる。さらに主桁の継手部を加工している人、梁を切り揃え、表面を成型している人、橋板を削って平滑にしている人、足場を補強している人などがリアルに画かれており、当時の矢作橋の構造や施工の様子がよくわかる。また、絵の上には作業中に歌われた音頭(木遣唄)の歌詞が書き込まれている。この絵が画かれた年代ははっきりしないが、水野氏が岡崎藩主であったのは正保2年(1645)から宝暦12年(1762)の間であるから、この間に画かれた可能性は高いと思われる。

また、安政4年(1857)4月に大樹寺造営のために三河に滞在した幕吏が書いたとされる『三河美やげ』には、「矢作橋掛直御普請杭震込之図」(図-1)があり、次のような説明がされている。「矢作橋杭震込綱引人足1

ヶ所2、30人なり。この綱引人足は当所の者にて15才より60歳までを雇用すといえども、12、3くらいの子供多し。皆前髪を取りて出るなり。下働き払い一人180文音頭取2人払なりと云う。木遣りを唄て引くなり。この綱引を昔より鮫鯨（あにう）人足と云い伝う。これは口をあいて綱に取り付く故なるべし。土俵は始め2、300俵積み、震下がるにしたがって追々相増し、石俵坏重ねて700も800も積増すなり。」³⁾(資料-2)

写真-1を見ると、架台の上

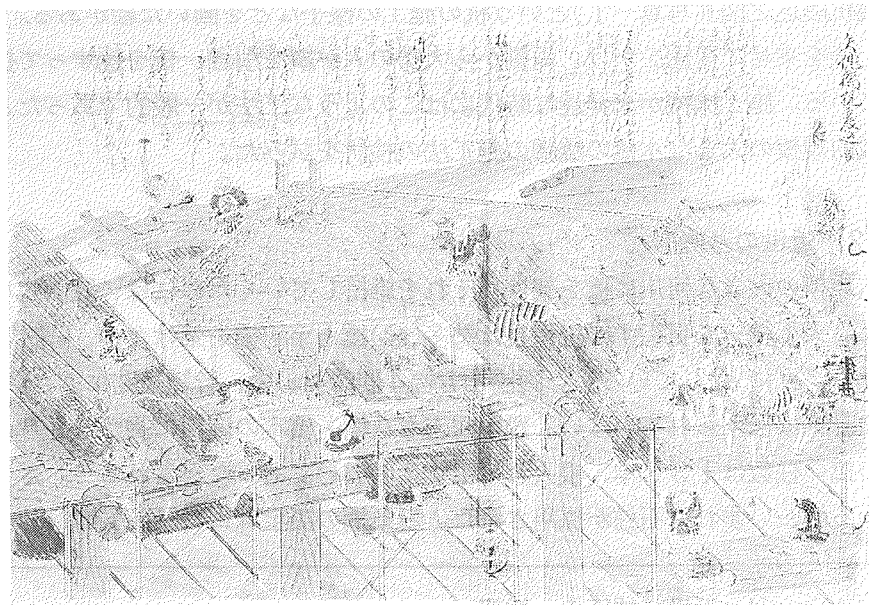


写真-1 矢作橋杭震込之図

(「水野家文書」：東京都立大学付属図書館蔵)

の俵の数は、最下段で14、三角形形状に積まれており、1列で100俵、それが2～3列に見えるからおおよそ2～300俵となり、上の記述が裏付けられる。

4. 他の震込工法の例

このように頂部に重量を加えながら両側から綱で揺すって杭を下げっていく「震込」工法は他の地方でもかなりの例がある。

(1) 三河・吉田橋

近世の吉田橋(豊橋)は東海道的主要橋梁の一つで、矢作橋と同様、幕府が直接管理する、いわゆる公

儀橋の一つであった。その詳しい工事記録が左岸側の船町会所に残されていた。この原文書は戦災によって失われたが、関係者により昭和46年に『船町史稿』⁴⁾として刊行されている。この一連の記録に、杭の「震込」という言葉が多く見られる。特に、弘化2年(1845)の架け換え時の「吉田藩普請奉行染矢兵左衛門留書」⁵⁾には工事の進捗状況が詳しく記されている。これによると杭の「震込」の根入れ長さや1日の施工本数、従事した人数などがわかり、後に示す推論の有効な資料となった。この工法は漢字は「震込」と書かれているが、仮名では「ゆり込」と表現されており、「ゆりこみ」と呼ばれていたと考えられる。

(2) 江戸・両国橋

『東京市史稿 橋梁篇 第一、第二』⁶⁾には江戸の公儀橋の記録が多く採録されているが、中でも両国橋の資料は詳しい。その中にも「震込」工法が散見される。例えば、享保14年(1729)の「両国橋継足御修復御普請御入用請帳写」⁷⁾では「俵をかけ、根入丈夫に震込申候」とあり、寛保3年(1743)の「両国橋新規御普請仕様注文」⁸⁾では「杭の先削とがし、大俵を掛け、根入随分丈夫にゆり込……」と表現されている。その他の資料には当時の両国橋の橋杭の寸法や根入れ長などがわかるものがあり、後述の数値的考察の参考になった。

(3) 八戸・湊橋

八戸藩が城下町と八戸湊を結ぶために湊橋を元禄5年(1692)に始めて架けたとき、藩の記録には「三月三日 晴 湊橋柱今ゆり込申……」⁹⁾とあり、橋杭はゆり込まれたと推定される。

(4) 大坂・心斎橋

江戸時代の心斎橋は町橋として、その工事費は橋筋の町々が負担することになっていた。その記録文書のいくつかが残されているが、宝暦13年(1763)の「心斎橋修覆諸入用并町割方算用一件写」には「ゆり人足」とあり、また享和2年(1802)の「心斎橋皆造諸入用割方帳」には「除杭ゆり直」という表現があることから断片的ながら「ゆり込」工法が採用されていたことがわかる¹⁰⁾。

(5) 金沢・犀川大橋 : 金沢城下の犀川大橋は、文化4年(1807)に架け換えられているが、「七月初より取拂御普請初りぬ。舟橋より下に舟渡し、衆人往来す。然処に九月十七日殊に大雨頻りにして、河水漲り出、ゆり込置し橋杭等流失、舟橋茂切れ流て、……」¹¹⁾とあり、ゆり込杭が洪水によって流されたことがわかる。

(6) 小倉・常盤(とぎわ)橋 : 小倉・紫川に架かる常盤橋の橋杭に石柱を用いることを提案した小倉藩士、杉生貞則の経歴を紹介した「貞則小伝」の中に「貞則君曰く、能ゆりこまば、其の上の処は決して下がるまじ」¹²⁾とあり、ここでも「ゆり込」が用いられていたと推察される。

以上のように杭の「震込」工法は近世の日本では一般的な工法であったことがわかる。

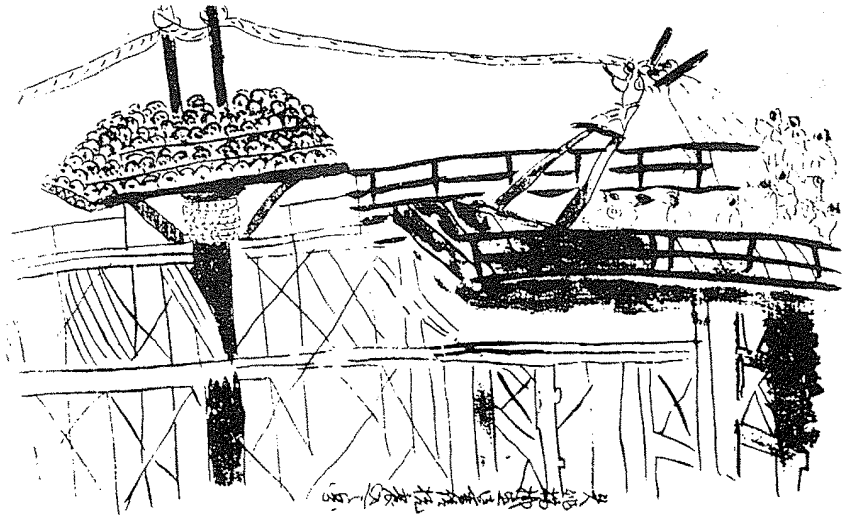


図-1 矢作橋掛直御普請杭震込之図(『三河美やげ』より)

5. 震込工法の検証

震込の記録からこの工法の特徴、施工能率、施工された杭の耐荷力などを試算し、その有効性と限界点を考察してみたい。

(1) 吉田橋での検証

矢作橋では詳しい資料がないため、同じ幕府管理の橋で、橋の構造や河床地盤など施工条件のよく似た吉田橋の記録を基本にして検討を加えた。

a) 杭の寸法、根入れ長、施工能率

寛政5年(1793)に橋普請中に洪水があり、その用材が流出したが、それらを川筋や海岸の村々に捜すように求めた文書と共に付けられた橋絵図があり、橋用材の寸法がわかる。このときの吉田橋の規模は、橋長京間93間(183m)、幅員は、全幅で田舎間4間1尺6寸(7.8m)、有効で3間3尺5寸(6.5m)の規模をもち、反りは1丈(約3m)であった。それを支える橋杭は3本建、27組で、中央の最も長いもので9.3m、末口2尺より1尺8寸(55~60cm)のものが用いられていた¹³⁾(図-3)。

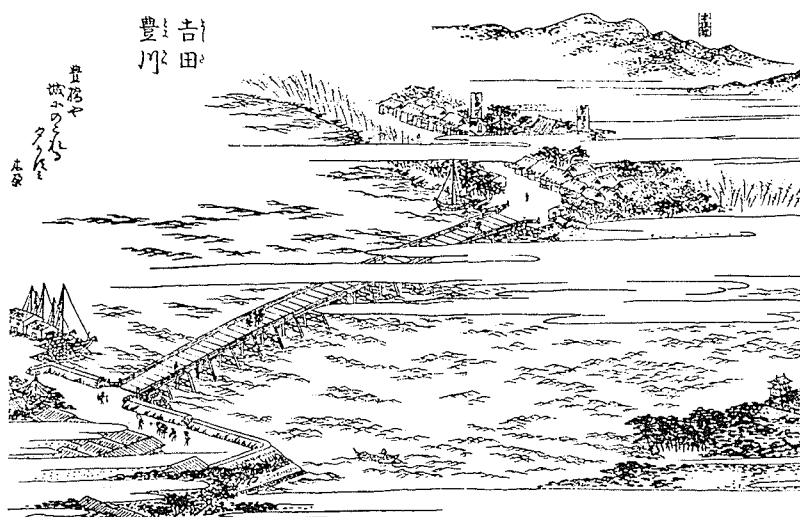


図-2 吉田橋(『東海道名所図会 卷三』より)

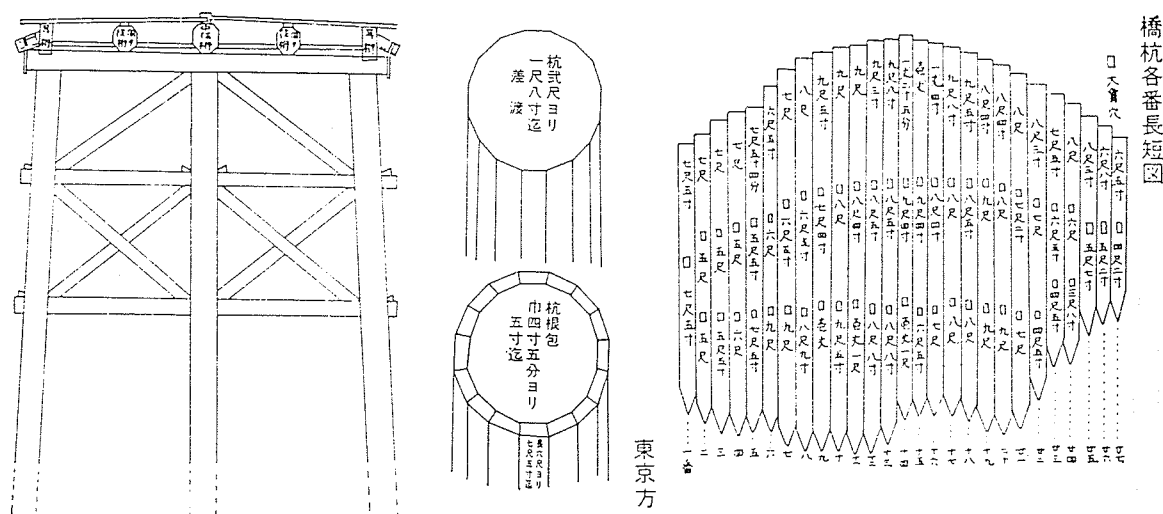


図-3 吉田橋-杭各番長短図(文献13)より)

弘化2年の工事報告から作業の内容をかなり詳しく把握することができる。杭の根入れに関しては「右根入之所壹丈に候所 新杭へ競壹丈之所へ鋸目附 御普請役印を押しやり込候事 誠に嚴重之事之由……」¹⁴⁾とあり、1丈(約3m)を目標に施工されたことがわかる。ただ寛政5年の寸法図にある橋杭では根入は1丈は取れず、せいぜい2m程度であったと考えられ、弘化2年の橋では杭が長くされたのであろう。

施工能率については断片的ではあるが、表-1のようにまとめられる。この時の施工は全ての杭を建て替えたのではなく、傷みのはげしい杭のみを取り換えたり、ゆるみの出た杭を立て直したもので、約1/4の杭に限定されていた。

表-1を見ると1日に5~6本の震込を行っている日もあり、1本の場合もあった。この作業は何カ所で行われたかは明らかではない。写真-1や図-1の状態から判断すると、3~4番の近接した杭の施工はできなかったであろうから、作業班は1日につきせいぜい2~3組であったと考えられる。したがって1組当たりの施工能率は多い日で3本程度であった。中には10番目橋脚の上流杭は12月1日にかかって、

翌年の1月19日ようやく終了しており、少なくとも5日は震込作業を行っていることになる。その他、作業が複数日にわたっている杭が2割程度あり、場所によって所定の根入れを確保するための作業時間には随分ばらつきがあった。

b) 耐荷力

震込工法によって得られる杭の耐荷力はどの程度であったかを推定してみたい。本来は現地実験によって求めるのがよいが、それが難しいため、以下の検討はあくまで一定の目安を示すに過ぎない。

震込工法で載荷される荷重は、以下のように見積もった。資料-2では架台の上に乗せられた土俵の数は、200～800とされる。米俵1俵の重量は約60kgであるが、中に土を詰めればもっと重くできる。しかし不安定な足場の

上に1人の人間が担いで持ち運びするためにはあまり重くはできない。せいぜい50kgが限度であると考えた。こうすると、200俵では10tf、800俵では40tfとなる。弘化2年の吉田橋の工事では土俵に用いる土として「…御橋杭ゆり込候土俵に仕候土為取度 長四間巾四尺深さ三尺之口御断申候……」¹⁵⁾と約8㎡、およそ20tfの土砂を予め準備している。不足する場合は当然追加されたと思われる。

吉田橋の付近の河床の土質は礫交じり砂層で、N値では5～10前後である¹⁶⁾。この地盤の地耐力を『道路橋示方書』の杭の支持力式を当てはめると、次のようになる。

吉田橋の木材の径は55～60cmであるから、その断面積Aは、

$$A = \pi r^2 = 3.14 \times (0.27 \sim 0.30)^2 = 0.24 \sim 0.28 \approx 0.25 \text{ m}^2$$

「道路橋示方書 図-解10.4.1」¹⁷⁾より、根入れがない状態ではN値は5として、先端支持力は、

$$R_u = q_u \cdot A = 10 \text{ N} \cdot A = 10 \cdot 5 \cdot 0.25 = 12.5 \text{ tf}$$

根入れが杭径の5倍(約3m)程度になるとN値を10と仮定して、

$$R_u = q_u \cdot A = 30 \text{ N} \cdot A = 30 \cdot 10 \cdot 0.25 = 75 \text{ tf}$$

となる。震込中は周面摩擦はほとんど無く、先端部の地層を乱すことによって支持力も半分ほどに低下するとすると、土俵を200俵から800俵に増やしていくことによってようやく根入れを3m程度まで確保できるという説明が可能である。しかし実際には全ての杭が所定の深さまで貫入できたわけではなく、数日の震込作業によっても所定の根入れが確保できなかった杭もかなりあったと考えられる。杭が目標の1丈程下げられた場合、その耐荷力は周面摩擦力も加味すると80tf程度にはなるだろう。

c) 従事人数

震込作業に従事した人の数は、明治2年に作られた「吉田川御橋御修復積仕様帳」¹⁸⁾によると、

永78貫880文-ゆり込杭 24本 外に両切途2本 26本連台仕懸共

杭1本に付日雇18人掛り 468人 老人に付永160文づつ

永93貫600文-同断杭26本 鯰鰻日雇1組杭3本に付120人掛り 1040人

1人につき永90文づつ

とあり、震込杭の作業を準備する作業員は1本当たり18人で、1本の杭を施工する作業員(鯰鰻(あにう)人足)は40人を見込んでおり、資料-2の記述が裏付けられる。

表-1 弘化2年(1845) 吉田橋杭震込施工記録(文献5)より)

年 月 日	杭番号
2. 1 1. 20	(工事開始)
2 1	2上
2 2	1?、3中
2 9	3中、4下、6上、26上
1 2. 1	10上
7	6?、6下、1上、10上、24上、25下
1 1	1上、2下、6下、10上、10中
3. 1. 6	3上、5上、10上、10中
1 9	6中、7上、9中、10上
2. 2 5	19?、20?
3. 2 8	17上

但し、数字は船町側(東側)からの橋脚の番号を示し、上中下は上流側、中央、下流側の杭の位置を示す。(作成：松村)

(2) 両国橋での検証

江戸の両国橋でも震込工法が用いられたが、前述のように「俵をかけ…」と表現されているように綱で結んだ土俵を杭に直接掛けたようにも受け取れ、架台(連台)を乗せた矢作橋や吉田橋と同じような施工法が行われたかどうか疑問が残る。しかし両橋とも幕府の作事奉行や小普請奉行の指導の下に工事が行われており、両国橋もほぼ同じ体制であったことを考えると、両国橋でも同じ工法が採られていたと推論してもよいと考えた。

両国橋は橋長が94間(田舎間で約170m)、幅員は時代によって異なるが、3間2尺~4間(6~7.3m)で、橋脚は4本建又は3本建で、25組程度に成っていた。杭の寸法としては享保19年(1734)8月の修復工事の記録では¹⁹⁾、

西より12側目 中杭新木槻長9間 末口1尺9寸 根入3間

但、肘木厚5寸幅8寸長4尺、ばい尻鉄物打

同 13側目 中杭新木槻長9間半 末口2尺1寸 根入3間半

北耳杭継木長9間 根入3間程…

同 14側目 中杭新木槻長8間5尺 末口2尺 根入3間1尺、ばい尻鉄物打

北耳杭継木長8間1尺5寸 根入2間3尺余…

などとあり、川の中央部の橋杭は長さがおおよそ9間(16.4m)、径が約2尺(60cm)で、根入れは3間(5.5m)が目標とされていた。また杭先端は巻貝のように円錐形に尖らされ、鉄板などの金物で補強されていたことがわかる。このような杭を矢作橋と同じような工法で施工した場合の施工能率や耐荷力は、道示式を適用すると次のようになる。両国橋の付近は、 $N=1\sim3$ 程度の軟弱なシルト層が厚く堆積しているため²⁰⁾、河床では、

$$R_u = q_d \cdot A = 10 \text{ N} \cdot A = 10 \times (1 \sim 2) \times 0.3 = 3 \sim 6 \text{ tf}$$

また根入れが3mを越えると、

$$R_u = 30 \text{ N} \cdot A = 30 \times 3 \times 0.3 = 27 \text{ tf}$$

さらにかかなりの粘着力が働いて、根入れが5mを越えると、建て込みに要する荷重は40~50tfにも達したと考えられ、このあたりが限界であったことになる。また杭が完成した後の極限支持力は、「道示 表一解10.4.4」²¹⁾を参考にして、

$$R_u = q_d \cdot A + U L f = 30 \text{ N} \cdot A + 2 \times (5 \sim 6) \text{ N} = 30 \times 3 \times 0.3 + 2 \times (5 \sim 6) \times 3 = 60 \text{ tf}$$

となり、吉田橋の場合と近い値になる。

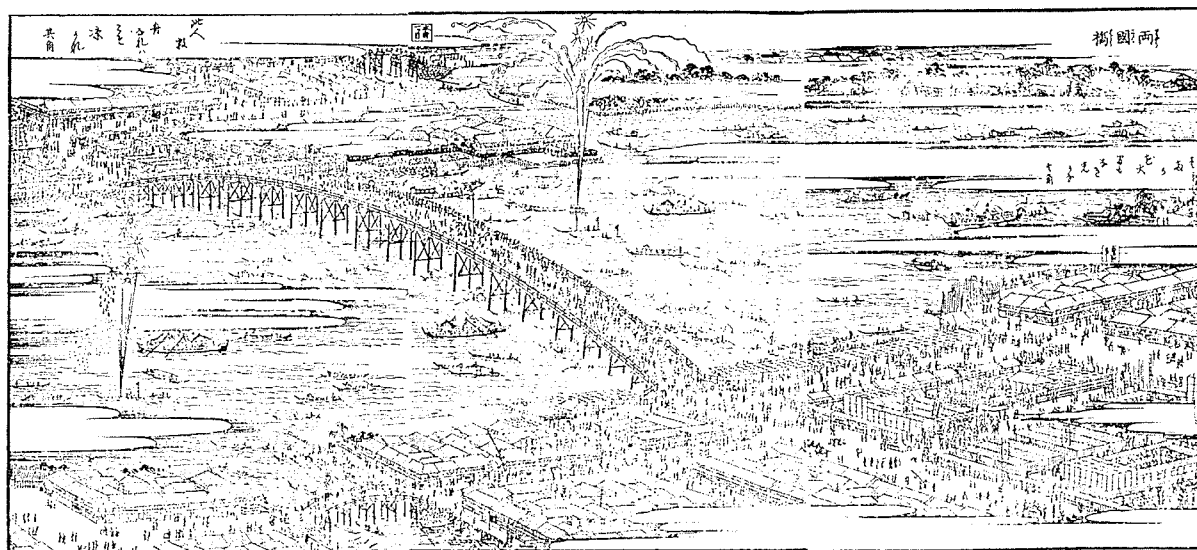


図-4 両国橋(『江戸名所図会 巻之一』より)

道示式は十分な根入れをもつ場合の支持層の耐荷力を求める式であるため、浅い根入れの杭に適用するには問題があり、あくまでおよその目安を示すにすぎない。ただ結果としては古文献の記述をうまく説明できる値を得ることができた。

(3) 載荷重の算定

標準的な木橋の載荷重がどの程度であったかを求め、杭の耐荷力と比較する必要がある。

死荷重（幅員8m、スパン10mと仮定）

床版他 厚0.2×長8×幅10m×0.8=12.8tf

桁 厚0.4×高0.6×長10m×5本×0.8=9.6tf

梁 厚0.4×高0.4×長8m×0.8=1.0tf

杭 $\pi \times (0.3)^2 \times \text{長}10 \times 0.8 = 0.7\text{tf}$

その他の部材を考慮し、杭1本あたりの死荷重を求めると、

$$[(12.8 + 9.6 + 1.0) / 3 + 0.7] \times 1.2 \approx 10\text{tf}$$

活荷重 長10×幅8m×0.3t/m²÷3=8tf

このように杭1本あたりの載荷重は大きく見積もっても20tfに満たない。

以上のような試算から鉛直耐荷力は確保できていたと考えられる。

(4) 打ち込み工法の可能性

木柱のパイルベント基礎は明治以降、現在でもなお用いられているが、そのほとんどが重量物を落下させてその打撃力によって打ち込む工法が使われてきた。二本構のように支柱の間に直方体の鉄塊を入れ、滑車を介して綱で引っ張り、それを落下させる工法が一般的であった。このため近世以前においてもそのような工法が用いられていたと漠然と考えてきた。しかしそのような施工の様子を示す図や文書はなく、施工機械が未発達であった近世では200～300kgの重さの鉄塊とそれを支える滑車を作ることはもちろん、それを現場で取り扱うのも容易でなかったと考えられる。

打ち込み式の施工法としては図-5のように跳木式の杭打機も実用化されていた²²⁾。しかしこのような機械では護岸用の細い杭には有効であったが、径50cmを越えるような橋杭には打撃力が不足している。このように近世では規模の大きな杭の打ち込み工法は使われていなかったと考えられる。

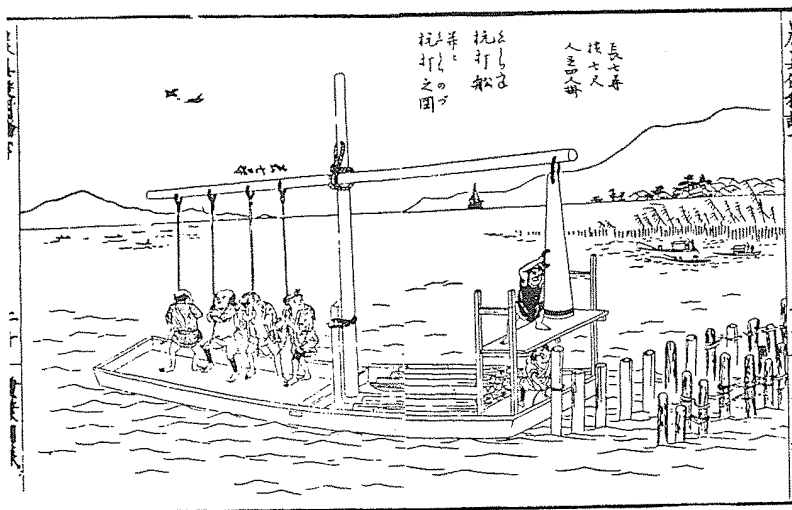


図-5 杭打船并に杭打之図(文献22)より)

6. おわりに

以上のような検討や推論から「震込」杭打工法は、N値が10程度の砂層やN値が5程度の粘性土に対して根入れが杭径の5～10倍程度がその適用の限界であったと考えられる。江戸や大坂のような沖積粘土層が厚く堆積している地域の他、東海道筋の河川では矢作川や豊川のような比較的勾配がゆるく、砂分の多い河床では適用が可能であったが、大井川や富士川のように礫分が多く、N値が20～30を越えるような河床をもつ河川では施工は困難であったと考えられる。このような結論は、筆者が以前に検討した大井川や富士

川に橋が架けられなかったのは技術的要因が大きいとする仮説を補強するものである²³⁾。

近世以前には、規模の大きな橋脚杭の施工には重量物の落下による打ち込み工法が用いられた形跡はなく、震込工法が有力な工法であったが、それによる根入れは浅く、水平抵抗は弱く、特に橋軸直角方向には水貫や筋違によって補強してラーメン構造にする必要があった。また洪水時の水流による洗掘にも不十分であったことは、被害の実状からも明らかである。

震込工法はある程度の水深のある所でも適用が可能であることから、江戸や大坂のような沖積平野に発達した都市での架橋を促進したことは事実であろう。しかしこの工法がいつ頃から用いられたかは不明である。そして地盤が比較的堅い地点、例えば瀬田橋のような場所に適用されたのかどうかは今のところ解明できていない。今後はより多くの適用事例の発見と、可能ならば現地での実験などによって、近世以前の架橋技術が明らかになっていくことを期待したい。

【参考文献】

- 1) 太田牛一『信長公記 巻8』及び『信長公記 巻11』
榊山潤訳『信長公記(上)』, pp. 282 及び『信長公記(下)』, 教育社, pp. 120~1, 1980年5月
- 2) 『京都府の地名』, 平凡社, pp. 258, 1981年3月
- 3) 柴田顕正編『岡崎市史 第8巻』, pp. 438, 昭和5年4月 にも紹介されている。
- 4) 佐藤又八編著、歌川 学校訂『三州吉田船町史稿』, 昭和46年9月
- 5) 同上 pp. 206~243
- 6) 東京市役所『東京市史稿 橋梁篇 第一、第二』, 昭和11年11月、昭和14年10月
- 7) 『同上 第一』, pp. 753
- 8) 『同上 第二』, pp. 327
- 9) 八戸市『八戸市史 史料編 近世 I』, pp. 547, 昭和44年3月
- 10) 松村 博:江戸時代の心斎橋の構造と管理、『心斎橋筋の文化史』, 心斎橋筋商店街振興組合, pp. 192, 平成9年5月
- 11) 『加賀藩史料 第十一編』, pp. 648, 昭和12年12月
- 12) 小倉市役所『小倉市誌 下編』, pp. 325~8, 大正10年7月
- 13) 4), pp. 349~350及び付図
- 14) 4), pp. 224
- 15) 4), pp. 222
- 16) 愛知県地質調査データ
- 17) 『道路橋示方書(I 共通編・IV下部構造編)』, 日本道路協会, pp. 333, 平成8年12月
- 18) 4), pp. 303~7
- 19) 6)『同 第二』, pp. 62~3
- 20) 東京都地質調査データ
- 21) 17), pp. 336
- 22) 大蔵永常『農具便利論 下』, 文政5年
- 23) 松村 博:大井川徒渉制を中心とする近世・東海道の渡河形態について、『土木史研究 第14号』, pp. 125~137, 平成6年6月