

鉄製杭基礎とスクリーパイル に関する歴史的調査

五十畑 弘¹

¹フェロー会員 工博 JFE エンジンリング(株)鋼構造事業部(〒100 8202 東京都千代田区丸の内1 1 2)

スクリーパイルを用いた鉄製杭基礎は、19世紀中頃からヨーロッパ、とくにアイルランド、イギリスにおいて橋梁、燈台、棧橋などで施工が始まった。スクリーパイルは、先端に鋳鉄や鍛鉄製のスクリーが取り付けられた錬鉄または、鋼製の杭で杭頭に導入する回転力で貫入する杭である。国内では明治初期から導入され、欧米とは数十年の差はあるものの、機械施工以前のほぼ同時代から使用が開始された。適用事例としては鉄道建設にともなう橋梁基礎や、燈台基礎、港湾整備の棧橋の基礎構造などがある。本論文では、明治以降の近代初期の鉄製杭基礎技術とスクリーパイルの発展過程について適用事例の調査を通じて明らかにした。

Keyword: pile, screw pile, foundation, railway, bridge, jetty, lighthouse, seaside pier, modern Japan

1. 研究の目的と背景

19世紀後半は建設技術が地球規模で欧米からその他の国・地域へ移転された最初の時期であった。この技術移転は、当時の先進国の国策に沿った後進国・地域での鉄道建設を始めとしたインフラ建設に伴って進展した。

近代における技術移転は、欧米の技術者の派遣^{付録1})とともに、先進国で生産された建設資材や材料を、北部アフリカ、中東、インド、中国、オーストラリア、および日本などの発展途上国、地域へ輸出することによって、これらを用いた実際の建設工事を通じて進められた。19世紀から20世紀にかけて発展途上にあった国にとって長期間に亘って輸入品に頼らざるを得なかった建設資材の多くが鉄製加工品であった。この代表的なものが鉄道レール、鉄製枕木、および錬鉄製のトラス桁であったが、この他に量は少ないが棧橋や橋梁基礎用としてスクリー付き鉄製杭(スクリーパイル)があった。

スクリーパイルの国内への導入は、明治初年から始まり、橋脚基礎、燈台基礎、棧橋へと適用されていた。機械力による杭打ち施工が一般的となる以前にあって、人力で杭頭に回転力を与えることでスクリー翼により貫入ができ、同時により大きな支持力を確保できることが摩擦支持の木杭に対して着目された。この背景には蒸気機関車などによる橋梁基礎への荷重増大や、棧橋、燈台などの水中基礎の施工へのニーズ

があった。

スクリーパイルは、高価であることに加えて濃尾地震、関東大震災などによる被害もあって、19世紀後半から20世紀初頭の約半世紀余の間に使用された基礎工法として留まった。しかし、神戸、横浜、大阪などの主要港湾にはすべてスクリーパイルが使用されており、限定された期間での使用ではあったが、近代における基礎工法の発展過程を歴史的に評価するためには、無視し得ない工法である。

本論文では、まずスクリーパイルが開発されたアイルランド、イギリスおよび、その植民地のインドにおける発達状況を明らかにする。次いでスクリーパイルが国内に導入された過程について、国内における橋梁、燈台基礎、および棧橋の適用事例の調査を通じて明らかにする。さらにこの結果に基づきスクリーパイルの基礎工法の発展過程の中での位置付け、およびその技術導入の近代における技術移転に対して果たした意味について考察をする。

近代におけるスクリーパイルの発展に関する文献としては、国内では日本道路史¹⁾、日本国有鉄道百年史²⁾などで適用事例の記述はあるが、既往の調査・研究は限られている。小野寺が、明治、大正期におけるスクリーパイルの事例を調査した論文³⁾や、田中が鋼管杭の歴史の変遷についてまとめた中にもスクリーパイル棧橋について言及している⁴⁾。また、筆者らによる明治期における近代初期の杭基礎構造全般に関する調査⁵⁾の中でも一部スクリーパイルについて

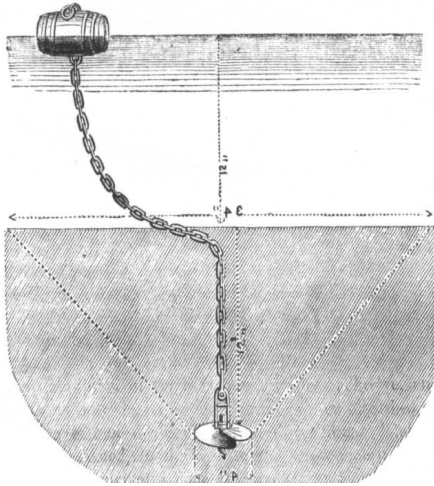


図 1 スクリューアンカー (1830 年代)
(出典：文献6) p.114)

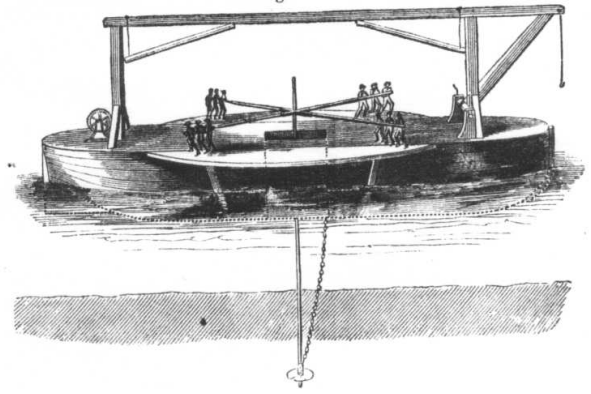


図 2 スクリューの施工法
(出典：文献6) p.133)

言及した。しかし木杭工法やその他の基礎工法に比べると、近代の特定の時期のみに限定的に使用されたスクリューパイルに関する系統的な歴史的調査・研究、およびそれに基づく歴史的評価は、ほとんどなされていない。本論文では、これらの既往の調査研究事例を踏まえつつも、イギリス等における文献調査による史料^{付録2)}や知見を新たに加えて研究を実施するものである。

2. ヨーロッパにおけるスクリューパイルの発達

アイルランド、イギリスを中心とするヨーロッパ、およびその植民地では、19世紀中頃以降、木杭のほかには鉄杭としてスクリューパイルが棧橋や橋梁の基礎として採用され始めた。

スクリューパイルはアイルランドの技術者であったアレキサンダー・ミッチェル (Alexander Mitchell) の考案によるもので 1833 年 (1847 年更新) にパテントが取得された。スクリューパイルの棧橋への適用に先立って 1830 年代から港湾地域におけるビーコンのアンカーや、川底への船舶の係留用アンカーにスクリューによる貫入方法が使用された^{6), 7)} (図-1, 2)

水中基礎として最初にスクリューパイルが適用されたのは、1840 年に北部イングランドのフリートウッドでミッチェルによって建設された燈台基礎である。先端に直径 3ft の鑄鉄製のスクリューが取り付けられた長さ 16ft の錬鉄製杭が 7 本使用された^{8), 9)} (図-3)

棧橋へのスクリューパイルの最初の適用は 1847 年のことで、アイルランドのダブリン南約 120km のウェックスフォード港でミッチェルによって建設されたジ

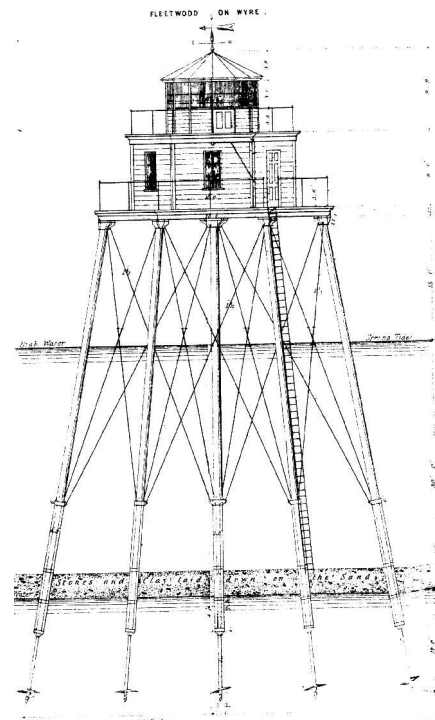


図 3 フリートウッド燈台基礎 (1840)
(出典:文献6)Plate2, Light house erected on Mitchell 's screw piles)

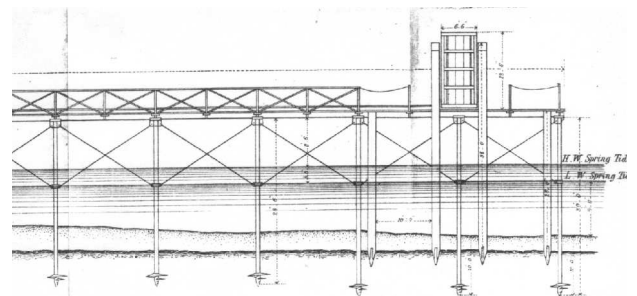


図 4 ウェックスフォード棧橋 (1847)
(出典:文献6)Plate3, Pier at Courtown ,Wexford, erected on Mitchell 's screw piles.)



写真-1 ブライトン, ウェスト・ピア (1866)

(1999年撮影; ブライトンのウェスト・ピアは1975年に老朽化により閉鎖され放置されていた。2004年より修復保全がされる予定であるが, 2002年12月29日の暴風雨によって床桁トラスの一部が崩壊した¹¹⁾。)

エッティ栈橋である。水深11~15ftの海域に17.5ft間隔に全長260ftにわたって直径2ftのスクリーをつけた直径5inの鍛鉄製パイルが使用された¹⁰⁾(図-4)。

イギリス本島において最初に栈橋工事でスクリーパイルが適用されたのは, 1856年に完成したケント州のマーゲイト(Margate)における栈橋で, 次いで1866年にブライトンのウェスト・ピア¹²⁾(写真-1)や, 1869年のウェールズのクレヴドン(Clevedon)・ピア¹³⁾でもスクリーパイルが使用された。

栈橋の建設はヨーロッパ, 特にビクトリア期のイギリスにおいて盛んに建設された。1813年のライデ栈橋(Ryde)から1901年のブライトン, パレス・ピアまで90年間で63基のジェット栈橋が建設され, これらのうち, 1850年代後半以降に建設されたほとんどにスクリーパイルが採用され, これを通じて基礎工法としての実績を積んでいった¹⁴⁾。

栈橋におけるスクリーパイルの施工法は, 水平面に半径7~10m程度の回転輪を設置しこれを回転することで, その軸にセットされたスクリーパイルに回転力(トルク)を与えて貫入する方法によっている。回転輪はその外縁に沿ってはめ込まれ陸上, あるいは既設の栈橋上に水平に張られたエンドレスのロープを人力で引っ張ることによって回転力が加えられる(図-5)。この工法は, ミッチェルによって考案され1847年にウェックスフォード栈橋で最初に採用されたが, その後スクリーパイルの施工法の原型となった。

一方, 橋梁基礎に大量のスクリーパイルを使用した例としてイギリス植民地のインドでの鉄道建設に伴う鉄道橋建設がある。ボンベイ・バローダ&セントラル・インド鉄道(Bombay Baroda & Central India Railway)

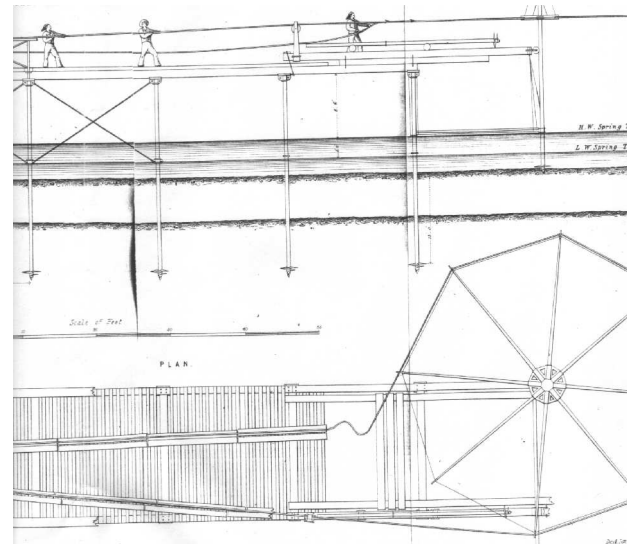


図5 スクリューパイル施工法(ウェックスフォード栈橋(1847))(出典:文献6)plate6部分)

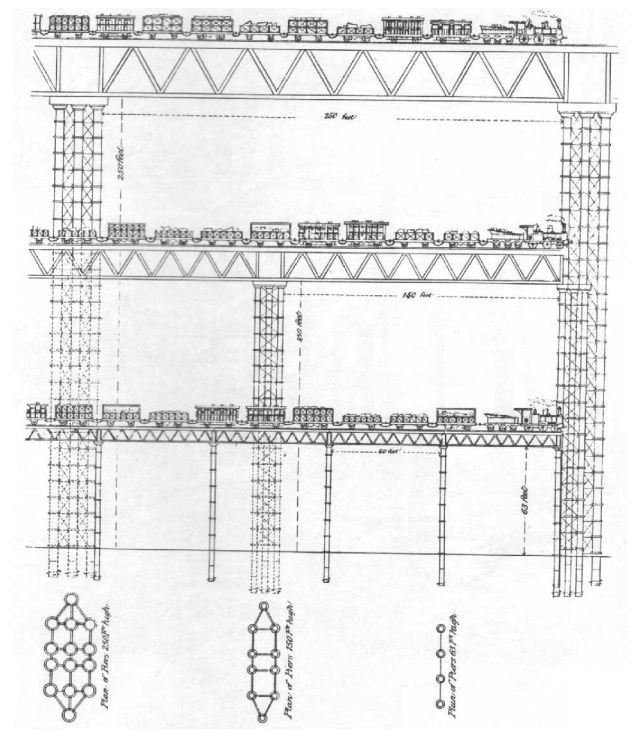


図-6 スクリューパイルによるパイルベント橋脚の標準設計(出典:文献15)p.83, Study on the standardized design of piled bent piers with screws for the spans of 60, 150 and 250ft.)

は1854年に建設が開始され1860年に北側の半分の工区が開通した。この設計段階では, 直径2ft6in長さ9ftの鑄鉄杭を組み合わせて, 60, 150, 250ftの標準スパンのワーレントラス用に3タイプの橋脚の標準設計が検討された。実際に施工された設計では, 直径4ft6inの鑄鉄杭が使用された¹⁵⁾(図-6, 7)。



図-7 パイルベント橋脚基礎 (1860)

(出典：文献15) p. 85, The Tapti viaduct of piled bent piers with screws)

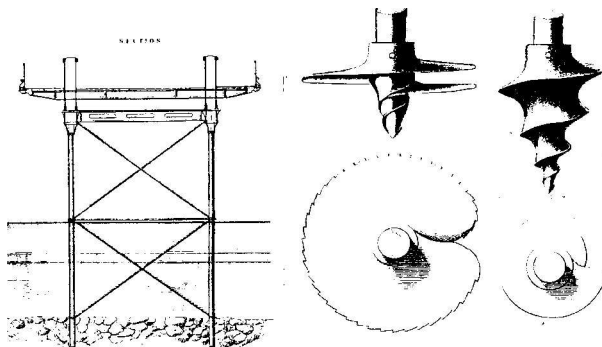


図-8 ガリバルディ(Garibaldi)橋 (1861, イタリア)

(左がオリジナルのスクリュー, 出典：文献16) p. 86, Ponte Garibaldi, “Neville’s last truss bridge”)

ネビル (Alfred Enrico Neville) のトラス橋の基礎にもスクリューパイルが使われている。1855年5月より設計が開始され、1861年に完成したイタリア、ベローナでアッジ (Adige) 川をわたるガリバルディ橋に使用されたスクリューパイルは、陸上施工されたスクリューパイルの初期のもののひとつである。

ネビル型のトラスの載る中間橋脚には、イギリス製のスクリュー付き鉄製パイルが使用された。スクリューはネビルによって直径 4ft 6in で設計されて現地に搬入されたが、施工が出来ずに直径を縮小した代替品がベニスで製作され施工された¹⁶⁾ (図-8)。

スクリューパイルは20世紀に入っても使用され、イギリスで1950年に直径 7ft 6in のスクリューを先端につけた直径 3ft の鋼杭が採用され、所定の深さまで貫入したことが報告されている¹⁷⁾。

アメリカは、鉄道建設で木橋とともに、木杭が盛んに使用されたが、一方では生産量でヨーロッパを追い越し始めた製鉄産業の生産量の増大を背景に1900前後より鋼橋や、鋼製杭が使われ始めた^{付録3)}。

表-1 国内における初期の鉄杭等の施工実績

年	実績
明治3 (1870)	高麗橋, (スクリュー付鉄杭)
明治6 (1873)	安治川鉄橋, (スクリュー付鉄杭)
明治7 (1874)	武庫川鉄橋 (スクリュー付鉄杭)
明治8 (1875)	羽根田燈台 (スクリュー付鉄杭)
明治9 (1876)	難波橋 (スクリュー付鉄杭)
”	神戸鉄道埠頭 (スクリュー付鉄杭)
”	六郷側鉄橋 (鑄鉄製井筒)
明治20 (1887)	長良川鉄橋 (スクリュー付鉄杭)
明治24 (1891)	(10/28) 濃尾地震
明治27 (1894)	横浜大棧橋 (スクリュー付鉄杭)
明治39 (1906)	横浜大棧橋 期工事
~大正6 (1917)	
明治35 (1902)	大阪港埠頭 (スクリュー付鉄杭)
~36 (1903)	
(1910s)	単動式蒸気ハンマー導入
大正8 (1919)	東京-万世橋高架橋コンクリート杭
大正11 (1922)	複動式蒸気ハンマー導入
大正12 (1923)	(9/1) 関東大震災
昭和5 (1930)	遠心力形成コンクリート杭

3. 国内における事例

(1) 概要

国内におけるスクリューパイルの使用は、大阪の高麗橋ほかの明治初期の橋梁建設から始まった。大阪、神戸間の武庫川鉄橋でも使用され、これは東海道本線の長良川鉄橋に引き継がれた。

一方、海中基礎へのスクリューパイルの適用は、明治8 (1875) 年に建設された羽根田燈台が最初で、棧橋としては明治9 (1876) 年に神戸鉄道棧橋で初めて使用され、規模を拡大して横浜港大棧橋 (明治27 (1894) 年)、大阪港埠頭 (明治36 (1903) 年) へと引き継がれた (表1)。これらの一連の工事に使用されたほとんど全てのスクリューパイルは、主としてイギリスから輸入されたが、後期には一部がアメリカからも輸入された。

(2) 橋梁基礎の事例

a) 高麗橋

国内における橋梁基礎にスクリューパイルが使用された最初の例として、明治3 (1870) 年に完成した大阪の高麗橋がある¹⁸⁾ (写真2)。幅員 18ft、スパン 30ft のプレートガーダー8連で構成され、橋脚は軟弱な河床に、橋脚1基あたり直径 1ft のスクリュー付き鑄鉄パイプ4本が打ち込まれた。パイル相互はブレース材

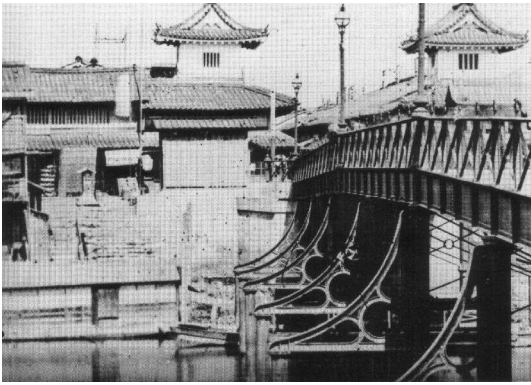


写真-2 高麗橋(明治3(1870)年)(出典:文献18)p.21)

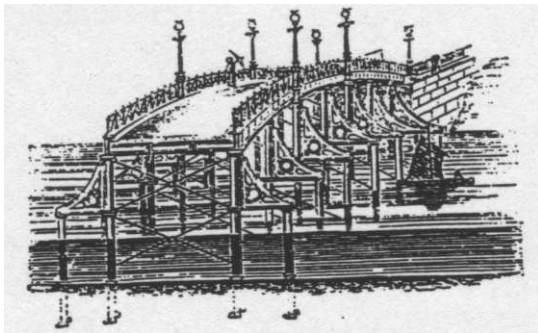


図-9 ハンディーサイド社の資料に描かれた高麗橋(明治3(1870)年)(出典:文献19)p.135)

で連結されたパイルベント構造で枕梁を介して二本の桁を支えた。8基の橋脚には合計 39-1/4 ton の鑄鉄が使われた。この橋の全ての部材は、イギリスのハンディーサイド社で製作されて輸入されたもので、同社側の記録にも本橋の記述がある¹⁹⁾(図9)。なお、高麗橋の後、大阪では明治6(1873)年に安治川橋、同9(1876)年に難波橋の橋脚にそれぞれ輸入したスクリーパイルが使用された。

b) 武庫川鉄橋

国内で最初の鉄製トラスは、明治7(1874)年に開通した大阪・神戸間の鉄道が、3河川を渡る個所に施工された。武庫川鉄橋はこのうちの一橋である。上部工はスパン70ftの錬鉄トラスで、下部工には、直径2ft6inの径の錬鉄スクリーパイルが用いられた²⁰⁾。杭の平均長さは河床下20ftで1橋脚あたり2本によるパイルベント構造とされた²¹⁾(図10)。

イギリス人技術者のポール(William Pole)がイギリス本国においてコンサルティングエンジニアとして設計および、すべての鉄工関係の担当をして、在日のイギリス人技術者のシャン(Theodore Shann)が施工を担当した。鉄工部分の製作はイギリスのダーリントン鉄工所(Darlington Iron Works Co.)で行われて日本に輸出された。

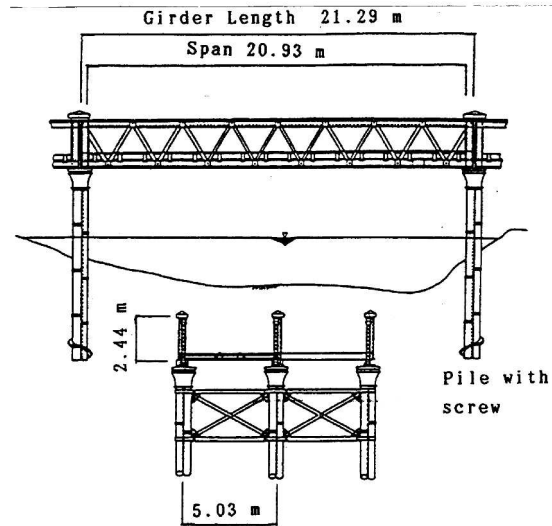


図-10 武庫川橋梁(明治7(1874)年)(文献20)をもとに作図)

c) 六郷川鉄橋

日本における鉄道建設にともなう鉄道橋の杭基礎は、明治5(1872)年完成の新橋・横浜間ではすべての構造物に木が使用され、橋梁についても上部工だけでなく下部工も木杭によるパイルベントが採用された。しかし、これらの寿命はきわめて短いもので数年で腐食が発生し、新たに建設されて明治9(1876)年11月27日に竣工した。架け直された新橋・横浜間の橋梁のうちもっとも大きなものは六郷川鉄橋でこの基礎には、杭ではなく鑄鉄および、レンガの井筒が使われた²²⁾。

レンガの井筒は、外径12ftであったが、鑄鉄の井筒は、外径8ftの一体で鑄込まれたシリンダーが採用された。1橋脚あたり2個のシリンダーが使用され、沈下したあとにはコンクリートが充填された。この工事もやはりイギリスにいたポール(William Pole)が設計を担当し、在日のイギリス人技術者のボイル(Vicars Boyle)が設計および、施工を担当した。410tonにのぼる鑄鉄シリンダーの製作は、イギリスのハミルトン・ウィンザー鉄工所(Hamilton Windsor Ironworks Company limited)によって行われた。

d) 長良川鉄橋

長良川鉄橋は東海道本線岐阜・穂積間の橋梁で明治10(1887)年1月21日に完成した。中央の河川部に200ftトラス、5連、その両側に100ftトラス2連づつを配置し、いずれも標準設計の錬鉄トラスで、全長1,493ftの橋梁である。橋台と橋脚は、鑄鉄のパイルベントで、スクリーパイルで施工された。設計は



写真-3 濃尾地震により震害を受けた鉄橋脚
(出典：文献24)plate26)

イギリス人技術者のパウナル(C.A.W.Pownall:1849-?)で、製作はすべてイギリスのパテントシャフト社製である。

橋台は径3ft3in、厚さ1-1/8 inの鉄管2本をコラムとして構成される。100ft トラスの橋脚は径2ft6in、厚さ1inの鉄管4本、200ft トラスの橋脚は同断面の鉄管を5本で構成され、スクリーパイルとして施工された。貫入後は、内部にコンクリートが打設され、コラム相互はT型のタイロッドのプレート材で連結された²³⁾。

本橋の橋脚は、完成後約4年半の明治24(1891)年10月28日に発生した濃尾地震で最も被害の大きかった土木構造物であった^{24), 25)}(写真3)。アプローチ区間の盛土部は崩壊し、中央部の200ft トラスの橋脚は完全に破壊されて、地面付近、および地面付近の地中部で折損した²⁶⁾。折損箇所はいずれの橋脚も地面の直上、および地中の鉄管の継手部(管内部のフランジ継手)近傍であった。

本橋は、レンガのウェル基礎で修復され被災1年後に再開されたが、これ以後、橋梁下部の鉄管パイルベント橋脚の使用は減少した。

(3) 燈台基礎の事例

a) 羽根田燈台

羽根田燈台は、日本で最初にスクリーパイルを用いた燈台である^{27), 28), 29)}。高さは55ftあり、明治7(1874)年3月から施工が開始されて、明治8(1875)年3月に完成した(図11)。設計は、スコットランドの燈台技術者で日本政府と燈台寮のコンサルティング・エンジニアの契約を結んでいた³⁰⁾チャールズおよび、デビッド・スチブソン(Charles & David Stevenson)で、イギリスで製作されて日本に輸送されて施工されたものである。

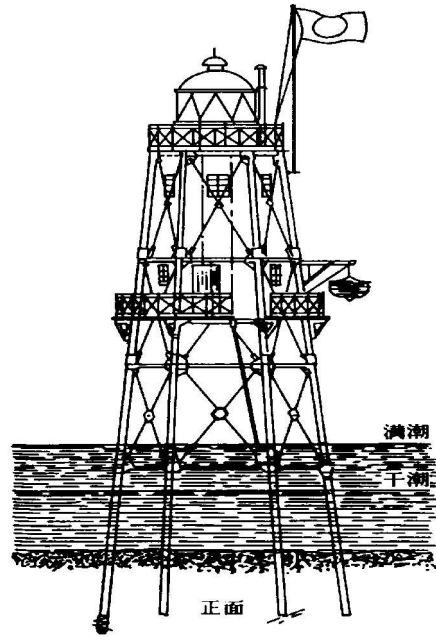


図-11 羽根田燈台(明治8(1875)年,出典:文献28)p.21)

施工はスチブソン兄弟について来日前に燈台技術を修得した³¹⁾お雇外国人のイギリス人技術者のブルントン(Richard Henry Brunton:1847-1901)が指導する横浜にあった燈台寮によって行われた。

(4) 棧橋基礎の事例

a) 神戸鉄道棧橋

神戸鉄道棧橋は、神戸駅ヤードの端部の海に突き出た場所に、国内で最初に鉄管スクリーパイルのついた鉄管杭が適用された棧橋として施工された。

神戸駅は、神戸・大阪間の鉄道開通とともに明治7(1874)年4月30日に完成した。しかしこの時点では、神戸駅構内の棧橋は未完成であり、完成は2年後の明治9(1876)年6月27日であった。棧橋は長さ450ftで幅は4車線が十分とれる40ftとされた。杭は直径12.5 inの鉄管パイプが使用され、先端には直径5ftのスクリーパイルが使用された³²⁾(図12)。完成後は、船舶の荷役がこの棧橋から直接鉄道貨車に陸揚げされた。このピアは昭和42(1967)年に川崎重工業(株)の修繕船ドックの建設のために撤去された。

神戸では、鉄道棧橋のほかに、民間埠頭として明治17(1884)年11月に小野浜鉄棧橋(全長149.8m、幅12.8m、3線軌道)が建設されてスクリーパイルが使用された³³⁾。

b) 横浜港大棧橋

明治10年代から貿易量は急速に増加し、外国からも横浜港の機能増強の要望が高まった。この需要に基づいて行われた横浜港の改築工事は日本で最初の本格

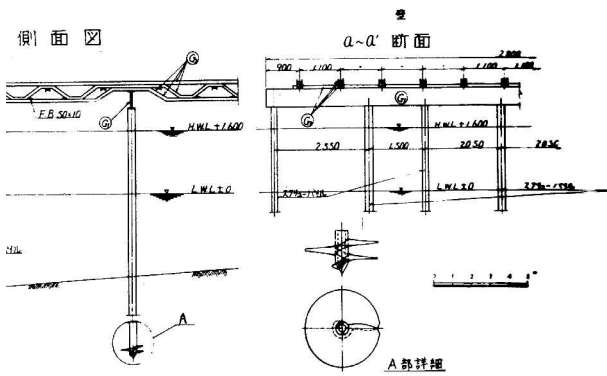


図-12 神戸鉄道棧橋(明治9(1876))(出典:文献33)p.82)

的港湾工事で明治27(1894)年に完成した³⁴⁾。

横浜港の設計はオランダ人技術者のファン・ドールン(C.J. van Doorn: 1837-1906)と、イギリス人技術者のパーマー(H.S. Palmer: 1838-1893)によって行われ、最終的にパーマーの設計が採用された^{35), 36)}。

この港湾建設の中心は防波堤の建設に加えて棧橋の建設であった。この棧橋建設に大量のスクリー付き鉄杭が使用された。棧橋は、陸側の橋梁部分、中間部および沖合い部の3つの部分で構成された。延長は橋梁部が50ft、中間部が345ft、そして沖合い部が1,500ftで合計1,895ftの延長である。橋梁部は岸に沿った小型航行船舶の交通のために設けられた。

棧橋の幅員は橋梁部および、中間部で39ft、沖合い部は船舶の接岸、係留する部分であり幅は62ft6inであった。棧橋構造の詳細は以下のとおりである。

橋梁部の陸側の橋台は石造であるが、棧橋側の橋脚には径24in、長さ42ft9inから30ft1inまでの鉄杭3本が使用された。鉄杭の先端には直径6ftのスクリーを付して貫入された。3本のスクリーパイルはそれぞれ斜材で結合された。桁はスパン50ftのハウトラスでデッキはヒノキ製であった。

中間部では一列3本で長さ47ft6in~54ftの杭を15ft間隔で21パネル配置された。沖合い部は、一列5本で長さ54ft~63ftの杭を15ft間隔で100パネル配置された。

中間部、沖合い部に使用した杭は共通で標準化された4種類の部品によって構成された。水面上のコラムとして一番上でクロスビームと結合するフランジをもつA。この下は、両端を他のコラムと結合するフランジをもつB。最下部でスクリーと結合する両端ダウエル継手をもつD。そしてBとDをつなぐ上端フランジ、下端ダウエル継手をもつCである。A、B、Dは長さが9ftと一定であるが、Cは調整用としてその長さは場所によって変化するように設計された。材質は鋳鉄で接合個所は、機械加工仕上げとされた。

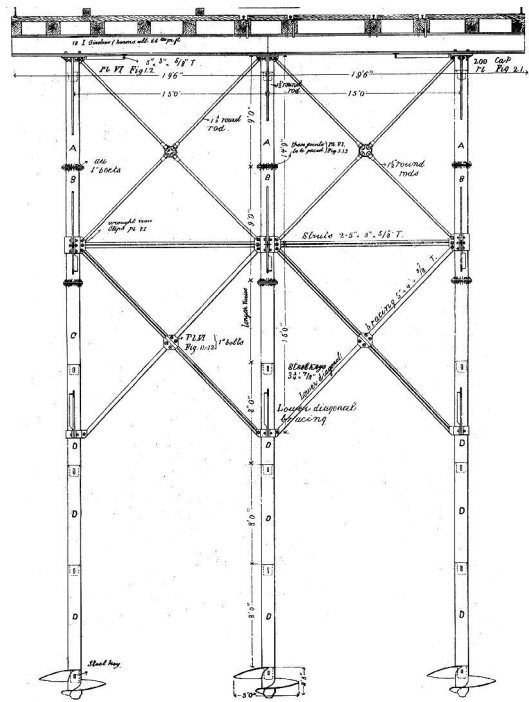


図-13 横浜港大棧橋断面
(出典:文献37)付図“Cross Section”.)

スクリーは直径5ftでD杭とはダウエルで結合し、鋼鉄製の楔が差し込まれて固定された。コラム相互はロッド、またはT型材でX形にブレースが組まれる構造となっていた³⁷⁾(図13)。

工事に先立って地盤の耐力調査が実施された。明治23(1890)年8月より建設現場と類似の地盤条件の神奈川町付近にイギリス、フェニックス鋳鉄会社から供給された仮棧橋で実施された。棧橋工事は明治25(1892)年1月20日にイルス商会(Irth(?) trading firm)が落札しグラスゴウのバーロウ・フィールド鉄工所(Barrow Field Iron works Ltd.)で製作された。資材購入契約では、輸送は工事の進捗に応じて5回に分けて輸送することが規定されており明治25(1892)年10月に第一回が搬入され、同11月12日より着工された。棧橋の竣工は明治27(1894)年3月31日で、棧橋上の鉄道敷設は同年1月より着手され3月に棧橋から税関構内まで完成した。

棧橋工事は、横浜港の工事費全体の約20%を占める部分であった。この棧橋は明治39(1906)年から大正6(1917)年までの間に拡張工事が実施されたが、拡張工事完成6年後の大正12(1923)年9月1日に発生した関東大震災により壊滅的な被害を受けた。

震害報告書によれば「その棧橋は、鋳鉄製であったので、激震により海底付近における接合個所で脆くもバックリングし、ほとんど旧態を認められない惨状であった。」と報告されている³⁸⁾。拡張工事では

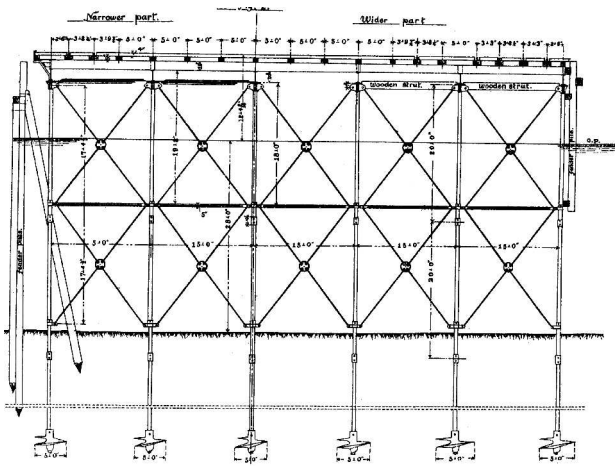


図-14 大阪港棧橋杭構造 (出典: 文献 39) 付図 PL.2 部分)

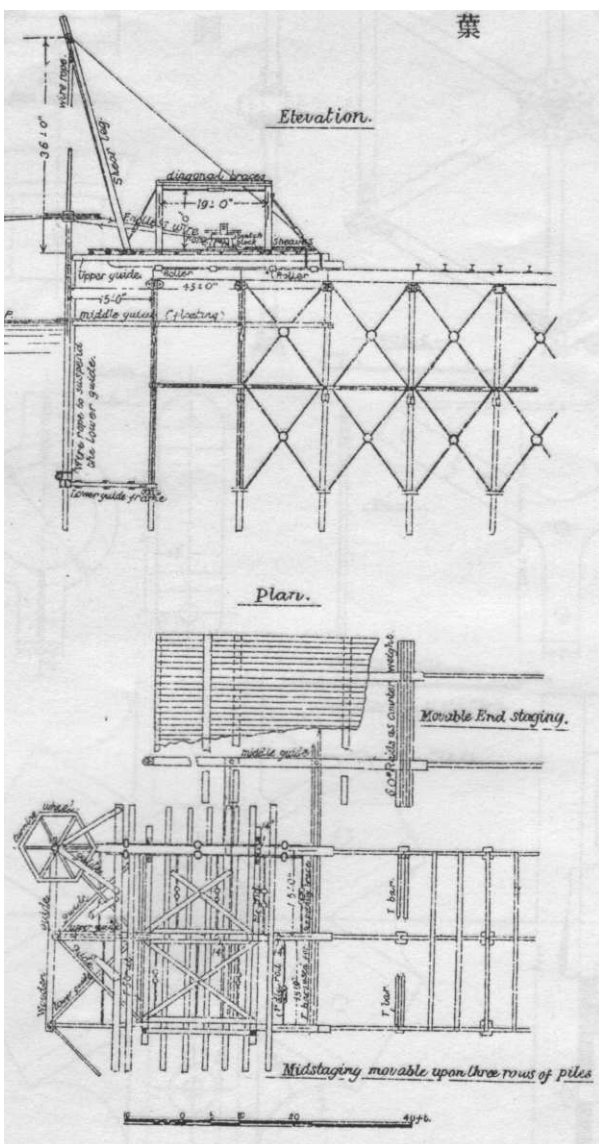


図-15 大阪港棧橋杭貫入用回転輪
(出典: 文献 39) 付図 PL.10 部分)

コンクリートコラムも使用されたが、震災では鉄杭の部分特に破壊された。

c) 大阪港棧橋

大阪港の整備工事は、横浜港について日本での初期の大規模港湾工事であった。大阪港棧橋工事では、横浜同様に鉄製の杭が使用されたが、杭コラム本体には鋼が使用された。継手などの鋳鉄は国内で製造されて供給された。棧橋は長さ 1,500ft、幅 75ft で、木製の床版の上には貨車用軌道 2 線、クレーン軌道 1 線が敷設された。杭は、直径 6in、長さ 20ft の圧延丸鋼を 3 本繋ぎ 60ft として使用した。圧延丸鋼の両端は六角形断面に整形され、カップリングを介してジョイントされた(図 14)。地中への平均貫入量は、24ft であった。

杭の貫入は、六角の回転輪を取り付けて周囲にアンカーされた小船に可動ステーシングを載せるか、既施工部の先端に回転輪を設置しこれで杭頭のトルクを導入することで施工した(図-15)。

明治 35 (1902) 年 3 月に杭の施工を開始して翌 36 (1903) 年 1 月までの 11 ヶ月で 678 本すべての施工を終了した。月ごとの施工本数が記録されている。これによれば最高で月間 107 本の施工をしている³⁹⁾。

杭の施工に先立って現地では載荷試験を実施している。12 本の試験用の杭を使用し、荷重にはコンクリートブロックとレールが使われた。1 本あたり 26ton から最終的には 64ton まで載荷され、地中 23ft の個所での地盤耐荷力を 1.6ton/平方 ft としている。

材料は鋼材 4,134ton、ボルト、ナット 88ton で、長崎のハンター商会を通じてアメリカピッツバーグのジョンソン&ラフリン (Johnson & Rafrin(?)) で製作、輸入された。19 世紀末から 20 世紀初頭にかけて、橋梁上部工など、鉄製品の輸入先がイギリスからアメリカにシフトされ、大阪港棧橋も同様であった。

カップリングやスクリューなどの鋳鉄材は 1,013 ton あり、これは国内の汽車製造会社によって製作された。床版用の木材は米松で、アメリカより輸入された⁴⁰⁾。

4. 考察

(1) 杭基礎工法における鉄製スクリューパイルの位置付け

杭基礎は、構造基礎として直接基礎と並んでもっとも一般的な工法で、近代以前から長く使われてきた。明治以前では、橋梁の多くは木材の梁を木杭のパイルベントで支持した構造がほとんどであった。近代に入ってから戦前まで杭の材料として木はもっとも多く使われていた。これらの木杭のほとんどは、地下水位以下に摩擦杭として生のまま使用されるのが普通であ

った。木杭の材料には松、栗、杉、ヒノキ、モミなどが使われ、この中でも松がもっとも多く使われていた。近代初期における木杭の施工例の大規模なものとして明治5年に完成した新橋駅と関連施設がある。この中では転車台の群杭、工場建屋他で多数の木杭が使用された⁴¹⁾。明治末年以降、長尺な米松が輸入されて使われるようになった⁴²⁾。

コンクリート杭が使用されるようになったのは明治末から大正初めの1910年代半ば以降のことで、はじめは四角や六角の断面の杭が使われた。コンクリート杭が本格的に使用されたのは、1915年から1919年まで施工された東京・万世橋間の鉄道高架橋の基礎である⁴³⁾。1本あたり、設計荷重30t、長さ18から50ftの八角形断面のコンクリート杭が9,281本使用された実績がある⁴⁴⁾。

遠心力形成コンクリート杭の最初の適用事例は1930年代のことである。PC杭は1939年にスウェーデンで初めて使用され、国内には戦後に入ってきた。鋼杭は戦前にも施工事例はあるが、本格的に使用されたのは1950年代半ば以降である。

既製杭に対して場所打ち杭であるペDESTAL杭工法が日本に導入されたのは1915年のことである。これ以後各種の場所打ち杭工法が使われるようになった。

杭の施工法については、明治以前では、人力の打撃による打ち込みやランマーが普通で、二本子、真矢、真棒胴突と呼ばれるラムドライバーが使用された。明治中期以降、蒸気エンジンを動力としたドロップハンマーが導入され、明治末の1910年代には、単胴スチームハンマーが使われるようになり、複胴スチームハンマーが輸入されたのは、大正11(1922)年のことで、昭和4(1929)年から国産化された。

以上のような国内における杭基礎技術の発展の流れの中で、鉄製スクリューパーイルの使用は、機械施工が可能となるまでの間に、限定的に採用された特殊工法として位置付けられると考える。近代に入ってから杭基礎に対する条件として、それ以前との明確な相違は、設計荷重が増大したことと、大型船舶のための港湾施設である棧橋や船舶航行施設の燈台など、水中基礎建設の需要の出現である。より支持力が大きく、かつ施工条件の厳しい杭基礎への需要の高まりの一方、施工能力は19世紀末までは、近代以前のレベルで留まっており、蒸気エンジンを利用した機械施工の一般化まで半世紀近くの時間が必要であった。

コンクリート杭の出現も、機械施工の開始とほぼ同じ20世紀の初頭以降であった。機械施工および、コンクリート杭までの約半世紀の間に限定的に使用されたのがスクリューパーイルであったと考えられる。

(2) 工法評価の視点からの考察

開国直後の1870年代から、高麗橋、武庫川ほか4橋の橋脚基礎で錬鉄コラムにスクリュューをつけた鉄製杭が施工された。初期の陸上での基礎への鉄杭の使用は、施工技術が未熟な国内にあって現地施工をできるだけ少なくすることから、イギリス人技術者によってヨーロッパでの実績のある工法がほぼそのまま導入されたものと考えられる。

六郷川鉄橋の場合は鉄製のシリンダーが使用されたが、発想は鉄杭と同様であった。この鑄鉄シリンダーによる工法は、1849年にイギリスでブルネル(I.K. Brunel: 1806-59)のチブストウ橋⁴⁵⁾などで採用され、六郷川鉄橋の施工時ではすでに30年程度の実績のある工法であった。開通後輸送量が急速に増加していた新橋・横浜間の既存線橋梁の架け替えであった六郷川橋の鉄製のシリンダー工法は、早期に確実に施工するためという特殊条件によるものと考えられる。

ウェル工法は、施工技術、設備の充実に従って、大規模な基礎として広まった。明治16(1883)年4月から開始された荒川橋梁の建設は大規模なレンガウェルを使用した橋梁工事であった。直径12ftの円形で壁厚は2ft、平均沈下深さは50ft余りであった⁴⁶⁾。

数多くの小、中スパン橋梁の下部工では、木杭が一般的であり、鉄杭はごく限られたものであった。長尺の杭が施工され始めた明治後半以降には、アメリカから米松が輸入されることで長尺木杭も得られるようになったことから、木杭が依然として経済的な工法であった。従って、スクリューパーイルは、陸上構造物の基礎としては、特殊な条件下で適用された工法であったと考えられる。

スクリューパーイルで構成されるパイルベント構造の橋脚は、当時増加傾向にあった機関車などの鉛直荷重には有効に抵抗したが、水平力にきわめて脆弱であることが明治24(1891)年の濃尾地震で被った長良川鉄橋の被害から明らかにされた。明治期における欧米人技術者の設計による燈台を含む土木構造物では、地震力への配慮⁴⁷⁾が欠けるものがあつたが、スクリューパーイルによるパイルベント橋脚もその一つであった。

濃尾地震後の鉄道橋の基礎でウェルが一般化したのに対し、港湾構造は状況が異なっていた。横浜大棧橋(明治25-27年)や大阪港埠頭(明治35-36年)では、濃尾地震後にあつてもスクリューパーイルが大規模に採用された。これは港湾工事での海中基礎工事では、すでにウェル工法に移行していた陸上工事と異なり、代替工法がなく鉄杭の施工上のメリットが相対的に大きいとの考えから採用されたものと考えられる。なお、20世紀に入るところから、鑄鉄を主体とする鉄材の一部が輸入品から国産品へと切り替えられていったが、この

背景には明治 34 (1901) 年の官営八幡製鉄所の稼働開始がある⁴⁸⁾。

(3) 技術移転の視点からの考察

明治政府雇用のお雇外国人、とくにイギリス人技術者は本国の鉄工会社や学会などとの連携のもとに活動しており、初期にあつてはお雇外国人の技術者としての経験から信頼性のある本国の工業製品の導入に積極的な傾向があつた。新橋・横浜間ではレールなどを除き橋桁を含み木製などローカル材を極力使用したのに対し、阪神間ではレールはもとより、橋桁、橋脚基礎杭、枕木に至るまで鉄製加工品を用いている⁴⁹⁾。

スクリーパイルは、鉄製シリンダーのウェル工法と同様に、明治初年に国内に導入された時点ですでにイギリスその他のヨーロッパ諸国で 30 年ほどの実績を積んだ工法であつた。この時期に工学教育を受け、実務を経験したイギリス人お雇技術者は、日本での設計、施工を担当するにあつて、高価ではあるが経験より施工上の信頼性の高いスクリーパイル工法を本国のイギリスから材料込みで導入する選択をしたことが考えられる。これは極力出身国の技術的常識、および技術システムの範囲内で、派遣国で技術貢献をするという技術移転における一般的な傾向の現れと見ることが出来る。

初期の鉄道建設に関与したイギリス人お雇外国人技術者の 1 人であるポッター (William Furnis Potter : 1843-1907) は、イギリス土木学会の論文集に収録されている彼の論文 “ Railway Works in Japan (1878/79) ” の中で次のような記述を残し、自国のシステムへの信頼性を示している⁵⁰⁾。

「...日本が将来にわたって鉄道建設の分野で能力を發揮してゆくことは疑いないが、その発展を促進するには 2 つの基本的な事柄を指摘しなければならない。ひとつは、建設の経済性であり、もうひとつは、イギリスの請負者 (コントラクター) の起用である。もし日本政府が現在建設中の新たな鉄道のためのコンセッションをイギリス企業に与えれば、半分のコストとこれまで建設してきた 2 倍のスピードで建設できることは疑いがない。(筆者訳) 」

スクリーパイルは、鍊鉄トラス桁と同様に、材料を欧米から全面的に輸入することによって成り立つ工法であつた。杭は、現地条件の影響をより多く受けることによる不確実性や、鉄製品が他の建設資材に比べて高価であることから、その輸入を巡って問題が発生している。大阪の高麗橋も資材一式をそっくりイギリスから輸入して建設された例であるが、代金支払いを巡る契約上の摩擦があつた。

高麗橋の発注者は大阪府で明治元 (1867) 年に日本

で最初に建設された鉄橋である長崎くろがね橋の評価から知事の後藤象二郎が高額ではあるが、鉄製橋梁建設の決定をした。くろがね橋の建設当時の慶応 4 (1867) 年 5 月に起こった淀川の洪水で大阪市内一円の木橋が大被害を受けたことがこの決定の引き金となつた。大阪府はイギリスの貿易会社を通じて、上部工を含むスクリーパイルの輸入を依頼した。完成後契約に基づいて設計変更が行われたが、契約条項は「もし工事費が当初の代価 7,500 両を越えたときは双方協議の上ある限度以内で追加分を支払う」という曖昧さのある取り決めであつた。貿易会社は追加の見積額として契約額と同額以上の支払いを要求した。これに対し、大阪府は若干の追加を認めながらも総額を拒否したことから折衝は外交問題となり、外務省とイギリス公使パークスの折衝まで発展した。結局、イギリス側の主張がとおり日本政府が立て替えて、大阪府は後日この支払いをした。

一方、貿易商の仲介で実際にこの橋の設計製作をしたイギリス側のハンディーサイド社の記録⁵¹⁾では、次のような記述があり、契約後工事費が膨らんだことを伺わせる。「この橋は、不十分な現地に関する情報でイギリス国内にて設計され、必要以上に強固で重く製作されてしまった。通用の条件下であれば、経済性の観点から上部工のスパンはもっと長くすることが出来、スクリーパイルは本数をもっと減らすことができたはずである。(筆者訳) 」

技術移転はお雇外国人など派遣された技術者の指導のもとに、先進国から供給された鉄桁や、スクリーパイルを実地に使用することによって進められた。さらにこれらの実務を通じて、発注、契約、検収などのマネジメント技術が修得され、技術移転がされた点にも着目する必要がある。

謝辞：イギリス、アイルランドの文献調査にあつて、イギリス土木学会アーカイブスのキャロル・モーガン氏、ダブリンのトリニティ大学のコックス教授には便宜を図って頂いた。ここに謝意を表する。

付録

1) 1850 年以降欧米以外の国・地域で進められた鉄道建設は、欧米の技術者がそれぞれ本国との連携で進めた。イギリスからは主要な植民地であつたインドに多くの技術者が派遣され、彼らの一部は中国、オーストラリア、ニュージーランド、さらに開国間もない日本に送り込まれた。日本国内では、明治年間に鉄

道関係で雇用された外国人技術者は 251 名に上り、その内イギリス人は 233 名であった。1870(明治3)年に着工された国内最初の鉄道建設では、イギリス人技術者のブラントン (R.H.Brunton,1841-1901) によって明治2年3月に提案され建設にあたっては、南オーストラリアの鉄道建設を経験したモレル (Edmond Morel, 1841-71), イングランド (John England, 1823-77) や、インドで経験をしたボイル (Richard. V. Boyle, 1822-1908), シャービントン (Thomas. R. Shervinton, 1827-1903) などの多くのイギリス人技術者が関係した。彼らの日本の鉄道建設への関与の記録は、イギリス土木学会(ICE)アーカイブスに保管されている。(例えば文献21),22),27))

- 2) イギリス土木学会アーカイブスで収録されているスクリューパーイル関係の文献類を調査した中で、発明者であるアレキサンダー・ミッチェル (ICE 会員) の論文「On Submarine Foundations; particularly the Screw Piles and Mooring(1848)」(文献6)が、特にスクリューパーイルの歴史的調査のために貴重である。この論文は1848年2月22日に当時のICE会長のジョシア・フィールドが座長となって議論がされていることが記録されている。挿入図13枚、添付図5枚、論文40ページある。
- 3) 「鋼の時代」(中沢護人, 岩波新書, 1970, p. 140)によれば、19世紀か20世紀にかけて鉄鋼業の中心がヨーロッパからアメリカに移ったことが表のように統計的に分かる。この製鉄産業を背景として建設資材としての鋼杭が生産されるようになった。1908年からアメリカのベツレヘム・スチールおよび、カーネギー・スチールで鋼製杭として厚肉のH型鋼の圧延が開始された。しかしスクリューパーイルについては、鋼杭の生産以前から豊富な米松の供給により実績は少なく、さらに鋼杭が生産されるようになってからも蒸気ハンマーによる機械打撃による貫入がより一般的となってきたことからアメリカにおいてスクリューパーイルが使用されることは少なかった。

年	英	独	仏	米	世界
1880	1,320	620	390	1,270	4,300
1890	3,640	1,610	580	4,350	12,400
1900	4,900	4,820	1,560	10,690	28,300

(主要先進国の製鉄生産量, 単位: 千 ton)

参考文献

- 1) 日本道路史, (社)日本道路協会編, p.874, 1975
- 2) 日本国有鉄道百年史, 第2巻, 日本国有鉄道, p.162, 163, 1969.
- 3) 小野寺駿一: 或るスクリューパーイルの歴史について,

- 第8回日本土木史研究発表論文集, pp.32-39, 1988.
- 4) 田中柳之助: 鋼管杭・材料と工法の歴史の変遷, 基礎工, pp.5-12, 1992.
- 5) Isohata H. et al.: The Early Development of Structural Pile Foundations in Japan, -During the Meiji Era 1868-1912-, Transaction of Newcomen Society, Vol.71, No.1, pp.91-113, 2000-2001.
- 6) Mitchell A: On submarine foundations, particularly the screw pile and moorings, Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers, pp.108-146, 1848.
- 7) 後掲文献13) p.118
- 8) 前掲文献6), pp.120-122, plate2.
- 9) *Civil Engineering Heritage, Northern England*, Edited by M.F.Barbey, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford, London pp.124,125,1981.
- 10) 前掲文献6), pp.126-129.
- 11) Brighton's West Pier too unstable to fix, *New Civil engineers*, Institution of Civil Engineers, p.7, 2/7 January 2003.
- 12) *Civil Engineering Heritage, Southern England*, Edited by R. A Otter, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford, London, pp.199-200, 1994.
- 13) *Civil Engineering Heritage, Wales & Western England*, Edited by W J Sivewright, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford, London, pp.87,88, 1986.
- 14) Adamson S.H.: *Seaside Piers*, Batsford, London, p.100-102, 1983.
- 15) James J.G.: Overseas railways and the Spread of Iron Bridges, c.1850-70, pp.6-9, 83-85, 1987.
- 16) James J.G.: The Origins and Worldwide Spread of Warren-truss Bridges in the mid-Nineteenth Century, Part1, History of Technology, Vol.11, pp.84-86, 1986.
- 17) Chellis R.D.: *Pile Foundation*, McGraw-Hill, p.275, 1951.
- 18) 日本の橋-鉄の橋百年のあゆみ-, (社)日本橋梁建設協会, 朝倉書店, p.21, 1984.
- 19) Ewing Matheson, *Works in Iron -Bridge and Roof Structures-*, A.Handyside and Co. Spon, p.135, 1873.
- 20) 久保田敬一, 本邦鉄道橋の沿革二就テ, 鉄道省大臣官房, p.75, 1934.
- 21) Potter W. F. : Railway Works in Japan, Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol.56, p.14, Session 1878-79.
- 22) Boyle R. V.: The Rokugo River Bridge and Foundations on the Tokio-Yokohama Railway, Japan, Selected Papers, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, No.1685, pp.224-225, 1882.
- 23) 野村龍太郎, 長良川鐵橋改築工事報告, 工学会誌第二百二十七巻, pp.402-406, 1892.
- 24) Milne J, Burton. W.K.: The Great Earthquake in Japan, Lane,

- Crawford & Co , Yokohama , 1891 .
- 25)Richard T.,Rudd C.:*Japanese Railway in the Meiji Period 1868-1912*, Brunel University, p.22,23, 1991 .
- 26)Pownall A.W.: The Railway System of Japan, Foreign Abstracts, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, p.472,1895 .
- 27)Brunton R.H.:The Japan Lights, Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol.47 , Part I , p.10,23 , Session 1876-77.
- 28)黎明期鋼構造物調査報告 , JSSC , Vol.16 , No.175 , pp.21,1980 .
- 29)五十畑弘 : 明治初期における英国からの技術移植-R.H.ブランドンの業績を通じた一考察- , 第7回の日本土木史研究発表会論文集 , 土木学会 , p . 81 , 1987 .
- 30) Leslie J, Paxton R.:*Bright Lights, the Stevenson Engineers 1752-1971*, Heriot-Watt University, Edinburgh,p.78,1999.
- 31)R.H .ブランドン , 日本の灯台とまちづくりの父 , 横浜開港資料館編 , p . 47 , 1991 .
- 32)前掲文献2) p.161 .
- 33)神戸開港百年史 , 神戸市 , p.75,1970 .
- 34)横浜グラフィカ , 岩壁義光編 , p.53,1989 .
- 35)神奈川の百年 , 毎日新聞横浜支局 , pp.25-27,1968 .
- 36)横浜市史 , 第四巻上 , 横浜市 , pp.865-902,1965 .
- 37)三田善太郎 , 横濱鐵棧橋 , 工学会誌第百五十九巻 , pp.183-194,1895 .
- 38)横濱港震害復旧工事報告書 , 内務省横濱土木出張所 , p.56,1929 .
- 39)森垣亀一郎 , 大阪市築港鐵棧橋工事報告 , 工学会誌第二百六十一巻 , pp.85-110,1904 .
- 40)日本の土木技術-100年の発展のあゆみ- , 土木学会 , p.268,1965 .
- 41)汐留遺跡 -旧汐留貨物駅跡地内の調査-第1分冊,第4分冊 , 東京都埋蔵物センター , 1997 .
- 42)前掲文献1)p.870 .
- 43)御茶ノ水両国間高架橋建設概要 , 鉄道省 , p.10-17,1932 .
- 44)「東工90年のあゆみ」(東工第37巻 , 特集号) 日本国有鉄道東京第一工事局 , p.360,1987 .
- 45)Vaughan A.:*Isambard Kingdom Brunel*, John Murray, London, p.154,1991.
- 46)河野天端 , 荒川鐵橋建築報告第一 , 工学会誌第四十八巻 , pp.712-722,1886 .
- 47)前掲文献27) p . 13 , 14.
- 48)明治工業史 , 鐵鋼編 , p . 27 , 1929 .
- 49)日本国有鉄道百年史通史 , 日本国有鉄道編 , p.35,1974.
- 50)前掲文献21)p.14.
- 51)前掲文献19)p.135.

(2003.1.31 受付)

Historical study on iron pile foundations and screw piles

Hiroshi ISOHATA

Iron piles with screws (screw piles) had been developed from the middle of 19th century in European countries including Ireland and Great Britain applying to the foundations of bridge, lighthouse and jetty. Screw pile is iron or steel pile with cast iron screw at the bottom end to be propelled into ground due to torque introduced at the head. Screw pile was introduced into Japan at the beginning of Meiji Era and had been applied to bridge piers, foundation of lighthouse and jetties etc. In this paper the process of the development of screw piles in Modern Japan had been clarified and studied by examining the practical applications in Japan as well as European countries .