

樋門基礎杭として 80 年以上経過したマツ材の性能

三宅 裕司・橋本 茂・網田 克明

要旨：大正 5 年～8 年にかけて建設された吉野川水系の飯尾川第一樋門の改築に伴い、掘り起こされた基礎マツ杭について、その劣化状況と強度について、新材マツ杭との比較を行なった。その結果、樋門基礎マツ杭は 80 年以上の経年経過にもかかわらず、新材マツ杭と比較しても劣化度の違いや強度差がほとんど認められず、木材が長期に耐用する素材であることがあらためて確認された。

1 はじめに

吉野川下流の飯尾川第一樋門は、飯尾川の排水と、増水時の逆流防止を目的として、大正 5 年～大正 8 年に建設されたものである。その本体構造はコンクリート製で底版下が栗石とマツ杭で支えられている。国土交通省徳島工事事務所では、県道徳島吉野線の改良工事に伴い、老朽化したこの樋門を改築することとなり、工事にあわせて大正時代の施工技術を検証するための調査を行った。その際、基礎に使用されていたマツ杭を抜き取り、劣化状況等を測定したのでその概要を報告する。



写真 1 改築前の飯尾川第一樋門

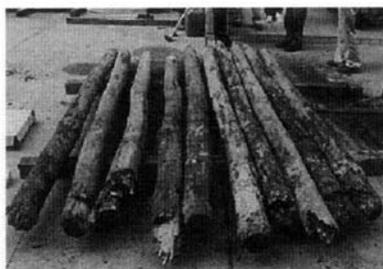


写真 2 試験に用いた基礎マツ杭



写真3 試験に用いた新材マツ杭

2 試験材料(供試体)と試験方法

2.1 調査地と試験材料

飯尾川第一樋門は、鮎喰川が吉野川に合流する約 2km 上流の三角州扇状地の扇端部にあり、吉野川河口から約 8km 上流の右岸に位置する。一帯は、吉野川下流の沖積低地にあり、地質は、細砂や砂混じりシルト等の細かい粒子で構成されている。

樋門函体は、長さ 54.5m の 6 門からなり、厚み 1.8m の無筋コンクリート底版を栗石と 1m ピッチのマツ杭が支える構造となっている。この樋門改築工事現場から末口径が約 15cm、杭長が約 3.5m の基礎マツ杭 10 本を採取し、比較対象として市場購入した末口径が約 23cm、長さ 4m の新材マツ杭 10 本を試験材料とした。

2.2 ピロディン打ち込み深さ測定

ピン打ち込み深さの測定にはピロディン(Proceq 社製 6 JForest)を用い、直径 2.5mm のピンとした。測定位置は、試験体の頂部から 30、120、230、320cm の位置で各 4 か所測定し(図 1)、その平均値を求めた。

なお、あらかじめ付着した泥を落とした後、目視による腐朽状況の観察を行った。掘り起こされたマツ杭は一見してマツであるとわかるが、念のため切片を採取し、走査型電子顕微鏡((株)日本電子製 JSM-5400LV)で樹種を同定した。



写真4 ピン打ち込み深さの測定

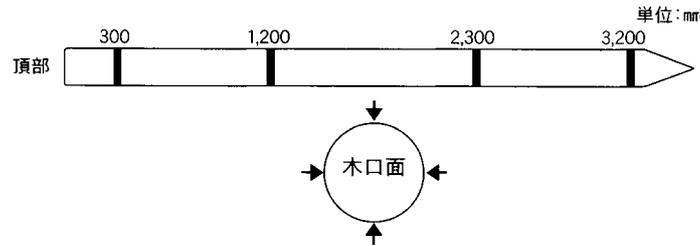


図 1 ピロディン測定位置

2.3 供試体(実大強度用丸太)の採取

ピン打ち込み深さを測定後，図 2 に示すように両端部を切り落とし，材長 250cm のマツ丸太を供試体とし，含水率測定に必要な円盤を供試体両端部の外側 5cm から採取し，寸法，年輪数等の測定を行った。

2.4 動的ヤング係数の測定

非破壊試験として，あらかじめハンドヘルド FFT アナライザ(小野測器社製 CF-1200)を使って，縦振動法による動的ヤング係数を次式により求めた。

$$E_d = (2Lf)^2$$

ただし， E_d ：動的ヤング係数(Pa)

L ：材長(m)

f ：一次周波数(Hz)

：密度(kg/m^3)

2.5 実大曲げ強度試験

図 2 に示すように丸太から強度試験に供する試験体を採材した。試験機は，曲げ最大荷重能力 20t(圧縮最大荷重能力は，100t)の木材実大強度試験機(島津製作所社製 UDS-100S 型)と，ストローク 200mm の変位計(東京測器研究所社製 SDP-200D)を使用し，図 3 のようにスパンを 200cm とし，単調増加による集中荷重を 10mm/min の速度で加え，曲げヤング係数と最大荷重より曲げ強度を求めた。

2.6 実大縦圧縮強度試験

実大曲げ強度試験破壊後に，図 4 に示すように非破壊部分から縦圧縮供試体(短柱丸太)を各 1 本ずつ採取した。この場合，試験機の性能や材の損傷状況を考慮し，基礎マツ杭の長さは約 45cm，新材マツ杭は 60cm とした。

そして強度試験にあたっては，図 5 に示すように，均一な圧縮荷重を供試体に加えるため，木材実大強度試験機の定盤を解放状態で使用し，1mm/min の荷重速度で圧縮し，最大荷重値から縦圧縮強度を求めた。

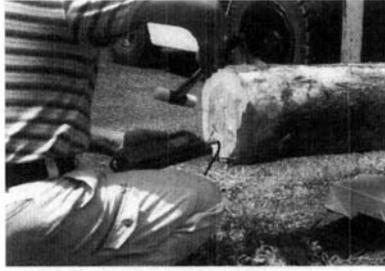


写真 5 動的ヤング係数の測定

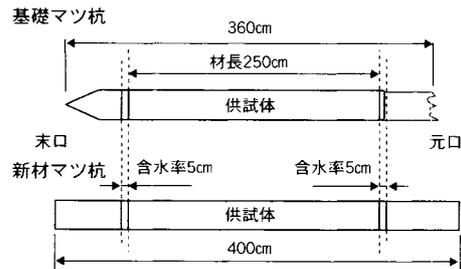


図 2 実大強度用丸太の採取

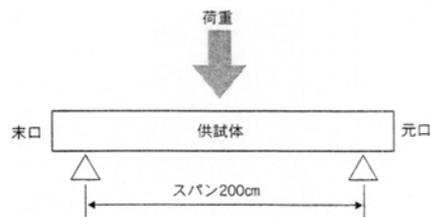


図 3 実大曲げ強度試験

2.7 小試験体曲げ強度試験

実大曲げ強度試験破壊後，図 4 に示すように実大縦圧縮供試体と同様に，非破壊部分から小試験体用短丸太(材長 32cm)を採材し，さらに，図 6 のように小試験体用短丸太から，髓位置を中心にして両半径方向へ可能な限り小試験体(2cm × 2cm × 32cm)を採取した。

試験方法は，JIS Z 2101 に準じ，スパンを 28cm とし，単調増加による集中荷重を 5mm/min の速度で加え，曲げヤング係数及び，曲げ強度を求めた。試験機は，万能試験機(インストロン社製 4026 型)を使用した。

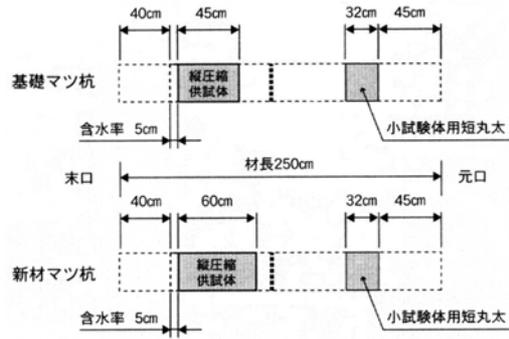


図4 実大縦圧縮供試体及び小試験体用短丸太の採取

2.8 小試験体縦圧縮強度試験

小試験体による曲げ強度試験破壊後，図7に示すように非破壊部分から縦圧縮用小試験体(2cm × 2cm × 4cm)を各1本ずつ採取した。試験方法はJIS Z 2101に準じ，1mm/minの荷重速度で圧縮し，最大荷重より縦圧縮強度を求めた。

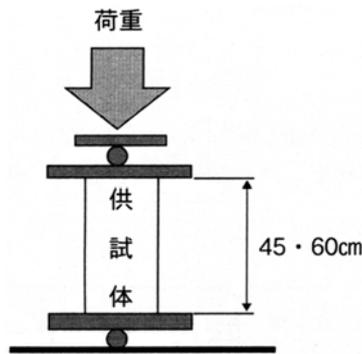


図5 実大縦圧縮試験

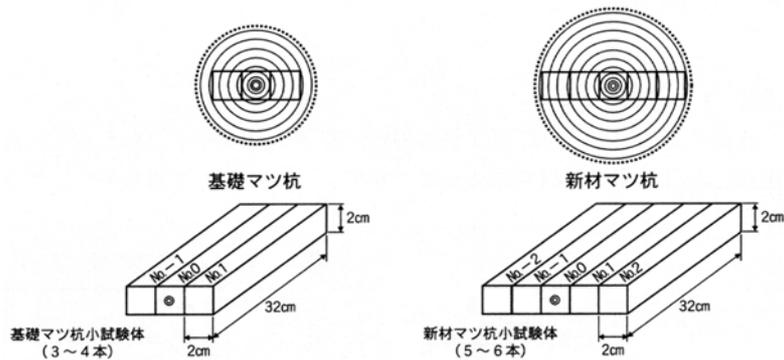


図6 小試験体の採取

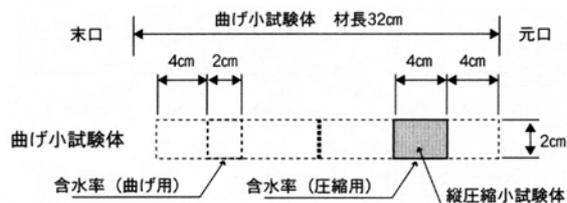


図7 縦圧縮小試験体の採取

3 結果と考察

3.1 ピン打ち込み深さの結果

目視による観察では、マツ杭の腐朽は見あたらなかった。図 8~9 に基礎マツ杭と新材マツ杭における測定部位のピン打ち込み深さを示す。その結果、基礎マツ杭の頂部から 30cm のピン打ち込み深さは、他の 3 カ所に比べて大きい値を示した。これは、樋門底版のコンクリートに巻き込まれていた部分であったと考えられる。

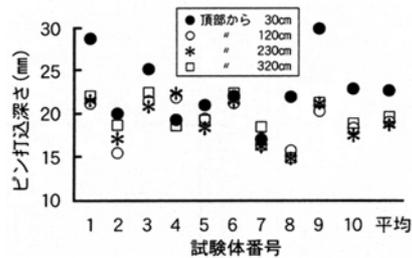


図 8 基礎マツ杭のピン打ち込み深さ

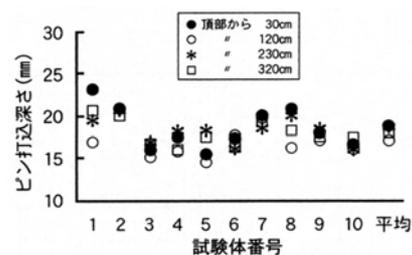


図 9 新材マツ杭のピン打ち込み深さ

明治 45 年の新聞記事⁽²⁾に、同種の樋門工事に係る記述が見られる。「基礎工事は末口五寸長さ八尺の松杭を方二尺五寸の間隔に打ち入れたるもの百二十本にして其の杭上に掌大の敷砂利を厚さ一尺に掻き込み其の上には厚さ二尺の「コンクリート」をなし...」というものである。この内容と現地の状況から、基礎マツ杭の上端は、コンクリート底版に約 10cm 程度貫入していたと考えられる。

今回の改修工事では、コンクリート底版取り壊しの際に杭上端を損傷したものであるが、施工方法によってコンクリートを貫入させたことが試験体の頂部から 30cm のピン打ち込み深さに影響したものと推察される。

なお、頂部から 30cm 以外のピン打ち込み深さは、平均 19.3mm、新材マツ杭のピン打ち込み深さは 17.9mm と、ほとんど差もなく耐腐朽性が維持されていたと考えられる。また、基礎マツ杭の細胞組織について観察した。写真 7 のとおり、木口面の垂直樹脂道は大型であり、柂目面に放射柔細胞が見え、分野壁孔は窓状であり、板目面に紡錘型の放射組織が見られる⁽³⁾ことからアカマツと同定した。

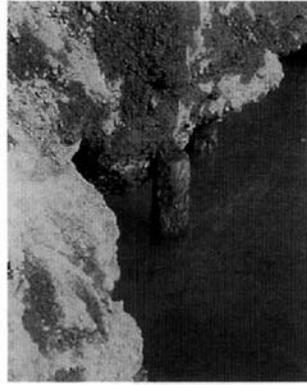


写真6 引き抜く前の基礎マツ杭の状況

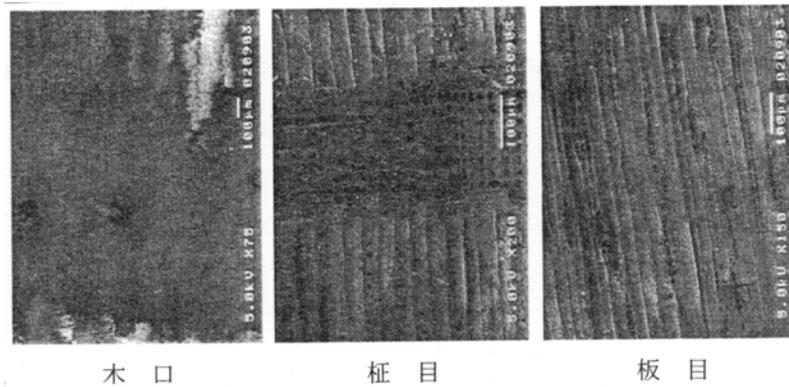


写真7 基礎マツ杭の細胞組織

3.2 供試体調査結果

表1に基礎マツ杭と新材マツ杭の含水率等の各種測定結果を示す。近年の松食い虫被害により、マツ材の入手が困難になり同径級の材を揃えることができなかった。このため比較対照としての新材マツ杭の径級が少し大きめとなった。

表 1 供試体調査結果

供試体	試験体 No.	供 試 体 寸 法				元口平均年輪幅		末口平均年輪幅		重 量	体 積	密 度	含 水 率	備 考
		元 口 径	中 央 径	末 口 径	材 長	年 輪 数	年 輪 幅	年 輪 数	年 輪 幅					
		(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(年)	(mm)	(年)	(mm)	(kg)	(m ³)	(g / cm ³)	(%)	
基礎 マツ 杭	1	16.8	15.4	13.9	249.9	17	0.99	15	0.93	42.20	0.0466	0.91	136.8	
	2	14.9	13.9	13.0	249.4	25	0.60	22	0.59	36.56	0.0381	0.96	111.7	
	3	16.1	15.4	14.8	249.9	31	0.52	24	0.62	42.32	0.0467	0.91	126.8	
	4	14.9	14.3	13.4	250.1	32	0.47	29	0.46	35.42	0.0398	0.89	103.0	
	5	16.0	15.7	15.8	249.0	29	0.55	24	0.66	38.86	0.0488	0.80	89.4	
	6	17.0	16.7	15.2	249.8	24	0.71	22	0.69	49.92	0.0529	0.94	152.5	
	7	16.3	15.3	14.8	249.2	26	0.63	23	0.64	45.54	0.0466	0.98	120.5	
	8	18.6	15.7	14.9	249.4	40	0.47	32	0.47	53.00	0.0520	1.02	100.9	
	9	16.7	16.1	15.3	250.6	39	0.43	33	0.46	48.68	0.0508	0.96	144.7	
	10	16.1	15.4	15.0	249.1	21	0.77	20	0.75	42.48	0.0469	0.91	119.8	
	平 均	16.3	15.4	14.6	249.6	28	0.61	24	0.63	43.50	0.0469	0.93	120.6	
	最 大	18.6	16.7	15.8	250.6	40	0.99	33	0.93	53.00	0.0529	1.02	152.5	
	最 小	14.9	13.9	13.0	249.0	17	0.43	15	0.46	35.42	0.0381	0.80	89.4	
	標準偏差	1.01	0.76	0.84	0.48	6.99	0.16	5.24	0.14	5.49	0.0046	0.06	19.11	
変動係数	6.2%	5.0%	5.8%	0.2%	24.6%	26.6%	21.5%	22.1%	12.6%	9.7%	6.2%	15.8%		
新 材 マツ 杭	1	28.3	24.5	22.8	249.5	43	0.66	37	0.62	92.02	0.1235	0.75	62.3	
	2	27.2	25.4	24.6	252.6	46	0.59	42	0.59	103.18	0.1307	0.79	93.4	
	3	25.1	24.1	23.2	252.1	40	0.63	37	0.63	91.18	0.1153	0.79	93.7	
	4	27.8	23.2	23.4	250.9	35	0.79	30	0.78	101.42	0.1181	0.86	99.8	
	5	26.1	24.9	23.0	251.8	42	0.62	36	0.64	81.98	0.1211	0.68	53.5	
	6	24.1	22.4	21.5	251.5	38	0.63	33	0.65	80.52	0.1011	0.80	72.2	
	7	24.4	22.8	21.6	252.5	35	0.70	31	0.70	90.14	0.1042	0.87	101.1	
	8	22.6	21.8	20.8	252.9	41	0.55	36	0.58	77.32	0.0940	0.82	104.3	
	9	24.7	24.1	23.3	250.6	41	0.60	38	0.61	85.58	0.1139	0.75	72.3	
	10	26.5	24.8	23.4	250.0	31	0.85	26	0.90	101.50	0.1217	0.83	110.5	
	平 均	25.7	23.8	22.8	251.4	39	0.66	35	0.67	90.48	0.1144	0.79	86.3	
	最 大	28.3	25.4	24.6	252.9	46	0.85	42	0.90	103.18	0.1307	0.87	110.5	
	最 小	22.6	21.8	20.8	249.5	31	0.55	26	0.58	77.32	0.0940	0.68	53.5	
	標準偏差	1.72	1.13	1.07	1.10	4.24	0.09	4.39	0.10	8.80	0.0108	0.05	18.61	
変動係数	6.7%	4.7%	4.7%	0.4%	10.8%	13.5%	12.7%	14.2%	9.7%	9.4%	6.9%	21.6%		

3.3 動的ヤング係数の測定結果

表 2 に動的ヤング係数の測定結果を示す。基礎マツ杭，新材マツ杭とも動的ヤング係数の平均値は，それぞれ 9.32GPa，9.93GPa とほぼ同じような値を示しており，両者に差はなかった。

表 2 動的ヤング係数の測定結果

供試体	試験体No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均値	最大値	最小値	標準偏差	変動係数
基礎マツ杭	動的 ヤング係数 (GPa)	8.67	10.88	9.46	11.10	8.96	7.01	7.97	11.84	9.36	7.95	9.32	11.84	7.01	1.55	16.6%
		10.56	10.67	10.38	8.30	12.32	10.26	6.62	9.72	10.93	9.55	9.93	12.32	6.62	1.55	15.6%

3.4 実大強度試験結果

表3に実大強度試験結果を示す。基礎マツ杭の曲げヤング係数，曲げ強度，縦圧縮強度の平均値は，それぞれ8.51GPa，35.0MPa，18.7MPaとなった。一方，新材マツ杭の平均値は，それぞれ7.94GPa，37.7MPa，16.5MPaとなった。すなわち基礎マツ杭の強度性能は，曲げヤング係数と縦圧縮強度で新材マツ杭を上回り，曲げ強度について新材マツ杭を下回る結果となった。建築基準で用いられるアカマツの基準強度(曲げ)は甲種1級で27.0MPa，甲種2級で16.8MPaであり，それからするとまずまずの値であると考えられる。

ちなみに文献⁽⁴⁾によると，古材の動的ヤング率等の値は，経過年数350年位に極大値を持つとされる。常温に長時間放置することにより繊維素分子の熱運動による結晶化がおり，年代とともに木材の結晶化が進んでいくという作用は，今回の基礎マツ杭にも働いていたはずである。樋門を支えた基礎マツ杭は80年以上にわたる経年経過にも関わらず新材と比べて遜色ない強度が維持されていることが示された。

表3 実大強度試験結果

試験体No.	曲げヤング係数 (GPa)		曲げ強度 (MPa)		縦圧縮強度 (MPa)	
	基礎マツ杭	新材マツ杭	基礎マツ杭	新材マツ杭	基礎マツ杭	新材マツ杭
	1	7.05	5.63	24.7	35.4	16.6
2	6.08	6.94	42.1	35.5	19.4	16.9
3	8.80	10.75	30.7	39.5	20.9	15.0
4	10.48	7.78	38.6	40.1	19.1	16.7
5	8.52	9.51	31.6	41.9	19.8	19.2
6	6.31	8.56	27.5	37.5	17.4	17.5
7	9.75	6.87	35.3	35.6	17.8	10.4
8	11.52	7.02	45.8	37.4	21.3	16.5
9	7.78	9.01	36.6	36.8	16.1	20.0
10	8.83	7.29	37.1	37.4	18.4	17.1
平均	8.51	7.94	35.0	37.7	18.7	16.5
最大	11.52	10.75	45.8	41.9	21.3	20.0
最小	6.08	5.63	24.7	35.4	16.1	10.4
標準偏差	1.68	1.44	6.17	2.06	1.66	2.52
変動係数	19.7%	18.1%	17.6%	5.5%	8.9%	15.3%

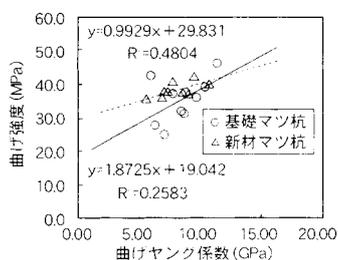


図10 曲げヤング係数と曲げ強度

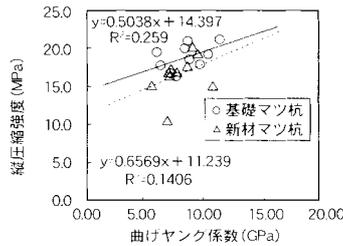


図 11 曲げヤング係数と縦圧縮強度

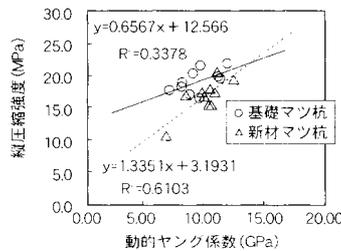


図 12 動的ヤング係数と縦圧縮強度

曲げヤング係数と曲げ強度，縦圧縮強度，また動的ヤング係数と縦圧縮強度についてそれぞれ相関関係を調べた。その結果，図 10 に示すとおり曲げヤング係数と曲げ強度については，基礎マツ杭，新材マツ杭ともやや弱い相関が見られた。また図 11 に示すとおり，曲げヤング係数と縦圧縮強度については，基礎マツ杭でやや弱い相関が見られた。そして，図 12 に示すとおり，動的ヤング係数と縦圧縮強度については，基礎マツ杭でやや弱い相関がみられ，新材マツ杭ではやや強い相関が見られた。この試験結果から，基礎杭など縦圧縮強度が必要な部材について動的ヤング係数で非破壊検査を行う有効性が示唆された。

注 1) $R > 0.9$ を非常に強い相関， $0.9 > R > 0.7$ をやや強い相関， $0.7 > R > 0.5$ をやや弱い相関とした。

3.5 小試験体強度試験結果

小試験体用短丸太から，髓位置を中心に両半径方向へ採取した各小試験体の平均強度値を表 4 に示す。基礎マツ杭の曲げヤング係数，曲げ強度，縦圧縮強度の平均値は，それぞれ 6.57GPa，40.7MPa，34.1MPa となった。一方，新材マツ杭の平均値は，それぞれ 7.54GPa，49.5MPa，40.1MPa の試験結果となり，小試験体における強度値は，基礎マツ杭が新材マツ杭より 12%～18%程度下回った。また，変動係数をみると基礎マツ杭は新材マツ杭に比べて，強度値がばらついている傾向がわかる。なお，今回，強度試験にあたって含水率を調整しておらず，その影響については考慮すべきであろう。平均含水率(絶乾法)基礎マツ杭 27%，新材マツ杭 48%であった。

図 13～15 に平均曲げヤング係数，平均曲げ強度，平均縦圧縮強度の半径方向の分布を示した。これをみると，基礎マツ杭，新材マツ杭ともに曲げ強度，縦圧縮強度が，髓位置(No.0)を中心に辺材部に向かうほど強度性能の高い値を示す V 字グラフを示した。また曲げヤング係数については，基礎マツ杭の辺材部に近い No.2 で落ち込みが示された。半径方向分布については，丸太の樹皮に近い側が外部からの影響を受けやすいと考えられるため，小試験体の採取にあたっては，髓位置を中心に採取するよりも，樹皮側からの採取が必要であったかも知れない。

表 4 小試験体強度試験結果

試験体No.	曲げヤング係数 (GPa)		曲げ強度 (MPa)		縦圧縮強度 (MPa)	
	基礎マツ杭	新材マツ杭	基礎マツ杭	新材マツ杭	基礎マツ杭	新材マツ杭
	1	5.83	7.26	33.6	51.0	31.3
2	7.00	7.64	41.2	50.4	37.5	38.3
3	7.23	7.89	43.3	50.2	33.7	37.8
4	8.20	6.81	50.2	47.0	36.7	37.8
5	7.42	9.25	42.1	57.6	36.6	46.9
6	4.42	7.01	32.0	47.2	27.5	41.9
7	4.97	7.24	37.8	45.6	30.4	38.5
8	7.84	8.05	50.2	50.0	41.9	39.2
9	5.66	7.80	37.1	50.8	31.1	42.5
10	7.09	6.46	39.6	45.3	34.7	37.1
平均	6.57	7.54	40.7	49.5	34.1	40.1
最大	8.20	9.25	50.2	57.6	41.9	46.9
最小	4.42	6.46	32.0	45.3	27.5	37.1
標準偏差	1.27	0.78	6.13	3.58	4.24	3.03
変動係数	19.3%	10.4%	15.0%	7.2%	12.4%	7.5%

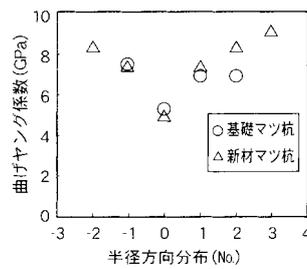


図 13 平均曲げヤング係数半径方向分布

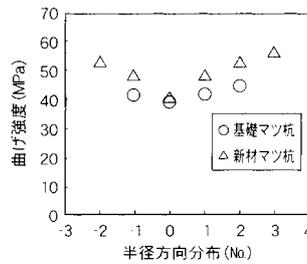


図 14 平均曲げ強度半径方向分布

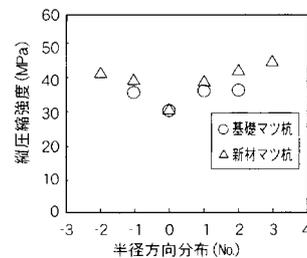


図 15 平均縦圧縮強度半径分布

3.6 ピン打ち込み深さと実大強度試験の関係

ピンの打ち込み深さと各強度値との相関関係を調べた。(図 16～18)曲げ強度について基礎マツ杭, 新材マツ杭ともにやや強い相関があった。縦圧縮強度は基礎マツ杭についてやや弱い相関が認められ, 曲げヤング係数は新材マツ杭についてやや強い相関があった。これらのことから土木資材について耐用年数などを知るための残存強度等の診断をするのにピロディンを用いた方法が有効であることが示唆された。

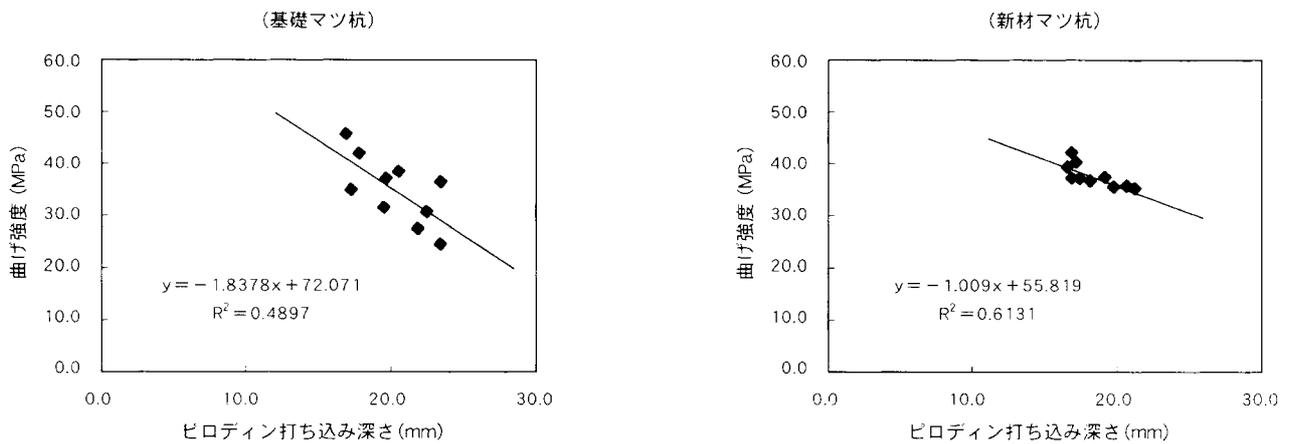


図 16 ピン打ち込み深さと曲げ強度の相関関係

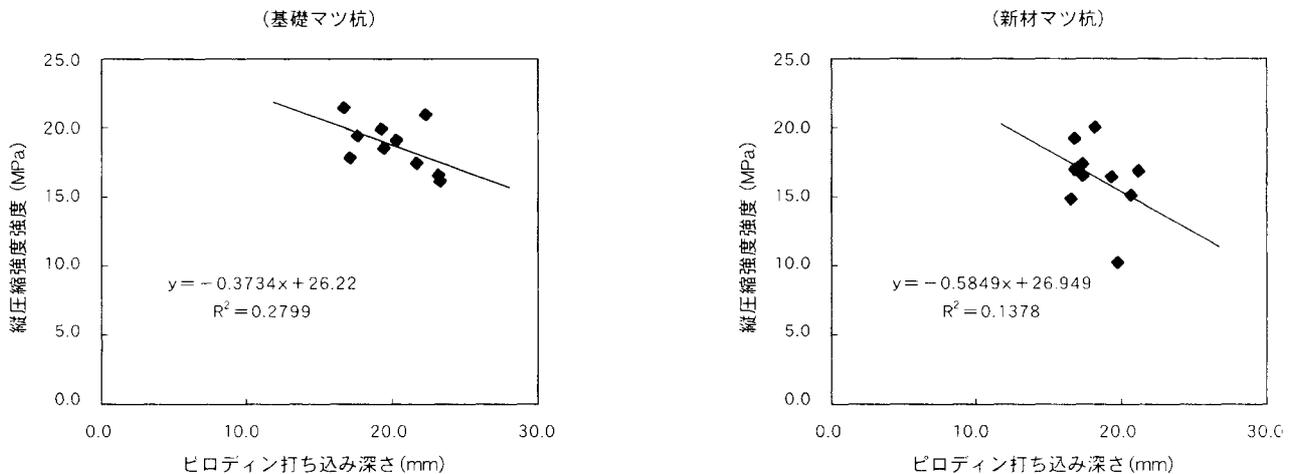


図 17 ピン打ち込み深さと縦圧縮強度の相関関係

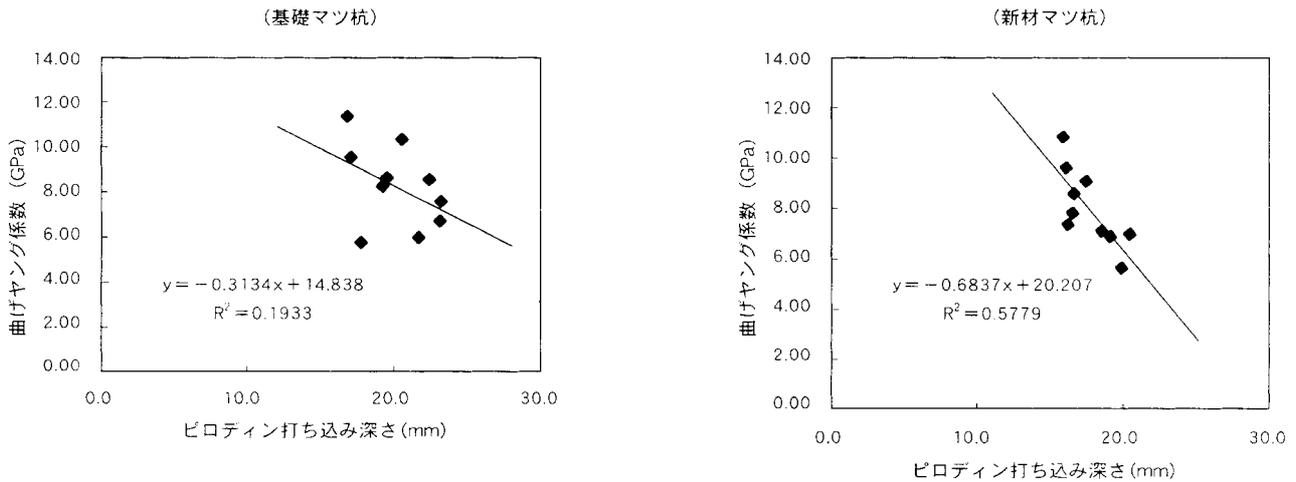


図 18 ピン打ち込み深さと曲げヤング係数の相関関係

3.7 その他

現在，スギ間伐材を土木資材として需要開拓する試みが全国でなされている。ところが，工事担当者には依然として根強いマツ信仰があり，スギの需要が伸び悩む要因となっている。マツ信仰とは，杭木等の土木資材には昔からマツが使われており，マツの耐朽性はスギを上回るという誤解である。表 5～6 のとおり，マツの耐朽性，耐蟻性はスギを下回っており，マツが使われてきたのは，その時代の資源状況であると考えている。

樋門の建設当時，すなわち大正 5 年の県統計書⁽⁶⁾(表 7)を見ると，スギ伐採材積 168 千石(約 47 千立法)に対して，マツの伐採は 433 千石(約 121 千立法)と多く，石あたり単価はスギ 2.88 円に対して 0.45 円と安く，土木資材として入手しやすかったと考えられる。すなわち，基礎杭にマツが使われたのは，当時の資源状況によるものと推察される。昔から河川工事にはマツが使われてきており，いつの間にか土木資材としてマツが耐朽性に優れているという誤解が生じているが，こうした資源的な背景を需要先に伝えていくことも必要である。

表 5 心材の耐朽性区分⁽⁵⁾

耐朽性区分	樹種
極大	
大	ヒノキ, サワラ, ヒバ, コウヤマキ, ケヤキ, クリ等
中	スギ, カラマツ, クスギ等
小	アカマツ, クロマツ, モミ, ブナ, コナラ等
極小	トドマツ, エゾマツ等

表 6 心材の耐蟻性区分⁽⁵⁾

耐蟻性	樹種
大	ヒバ, トドマツ, コウヤマキ等
中	ヒノキ, スギ, クリ, ケヤキ等
小	エゾマツ, カラマツ, クロマツ等

表7 飯尾川樋門建設当時の伐採状況⁽⁶⁾

徳島県統計書（大正5年）

	伐採面積	伐採材積	価 額	単 価
	反	石	円	円 / 石
杉	1,633	168,389	485,010	2.88
扁 柏	316	13,227	62,712	4.74
松	3,707	432,896	194,293	0.45
樺・白檜・唐檜	-	9,922	11,887	1.20
榎 樫	20	81,538	46,725	0.57
其 の 他	2,131	36,262	21,234	0.59

4 おわりに

飯尾川第一樋門に使われた基礎マツ杭と新材マツとに強度や劣化の差はほとんど認められなかった。これは、使われた場所が、腐朽菌などが進入しにくい場所であったためだと考えられる。ただ使用部位によっては、劣化が進む可能性も示唆されたが、うまく使えば木材が長期に耐用する素材であることを改めて確認することができた。

先人は木材を土木資材として上手に利用してきた。しかしながら金属やコンクリートが万能であるという考えは依然強く、そうした材料を多用した近代技術を反省し、可能な限り、エネルギーコストが少なく地域資源を生かしたかつての工法を見直すことが必要な時代となってきた。飯尾川第一樋門に使われた基礎マツ杭は、そのことを我々に教えてくれているのかも知れない。

さいごに、本調査にご協力いただきました国土交通省徳島工事事務所の方々にお礼申し上げます。

【参考・引用文献】

- 1 「約 50 年経過した樋門用マツ基礎杭の強度」愛媛林試 松岡真悟 日本木材学会中国・四国支部 第 13 回研究発表要旨集(2001)
- 2 明治 45 年 6 月 1 日徳島毎日新聞「県下唯一閘門」(1912)
- 3 図説 木材組織：島地 謙，伊東隆夫，(株)地球社(1992)
- 4 「木材の動的弾性率及び圧電率の年代経過による変化」深田栄一，安田栄夫，小原二郎，岡本 一 小林理学研究所報告第 6 巻第 2 - 3 号(1956)
- 5 木材工業ハンドブック：改訂 3 版 丸善株式会社(1982)
- 6 徳島県統計書(1916)