

# 杭丸太を活かした小規模構造物の設計方法の検討

久保 光<sup>1</sup>・吉田 雅穂<sup>2</sup>

<sup>1</sup>福井県雪対策・建設技術研究所（〒918-8108福井県福井市春日3-303）

<sup>2</sup>福井工業高等専門学校 環境都市工学科（〒916-8507福井県鯖江市下司町）

全国版基準の考え方や佐賀県のローカルルールの考え方を整理し、杭丸太の特性を活かした設計方法を提案した。また、その設計方法に基づき設計を行い、現場施工を実施した。施工後のモニタリング調査を行い設計方法の妥当性について検討した。具体的には、福井県小浜市の県道拡幅工事において、周面支持力のみ安全率1.5で設計した。次に土留式自由勾配側溝基礎およびボックスカルバート基礎の軟弱地盤対策にスギ杭丸太（φ15cm,長さ3m）を使用し、施工性について検討した。また、沈下量について計測した。周面支持力のみ安全率1.5にて設計・施工し安全率・施工の妥当性について検討した結果、実務上問題ないことがわかった。

キーワード コスト縮減, CO<sub>2</sub>排出量削減, 環境保全

## 1. はじめに

公共工事の設計は、全国版基準の考え方に従って行われることが多い。自治体が国の補助を受けて行う工事では、そのことが必要条件とされる場合もある。ところが、軟弱地盤の場合、全国版基準では対応できないこともある。例えば、道路橋示方書・同解説(2002)では、先端支持力3、周面支持力4の安全率を採用しているが、これに基づき設計するとコスト高であるのみならず杭丸太の設計により杭間隔が狭くなりすぎて杭の打設も困難となる場合がある<sup>1)</sup>。よって本研究では、杭丸太の特性を活かした設計方法について検討する。次に、その設計方法に基づき設計を行い、現場施工を実施した。施工後のモニタリング調査を行い設計方法の妥当性について検討する。

## 2. 設計法の比較検討

道路橋示方書・同解説(2002)<sup>2)</sup> [以降道路橋と呼ぶ]  
 ・鉄道構造物等設計標準・同解説(2000)<sup>3)</sup> [以降鉄道と呼ぶ]  
 ・建築基礎構造設計指針(2007)<sup>4)</sup> [以降建築と呼ぶ]  
 ・港湾の施設の技術上の基準・同解説(2007)<sup>5)</sup> [以降港湾と呼ぶ]  
 ・杭網(パイルネット)工法設計・施工の手引き(2000)<sup>6)</sup> [以降パイルネットと呼ぶ]  
 ・プレキャストL型擁壁(H≤2m)の木杭-底盤系基礎(佐賀県)設計マニュアル第1版~(2006)<sup>7)</sup> [以降佐賀県と呼ぶ]、  
 以上6つの基準について比較検討を行う。

いずれの設計方法も基本式(1)は以下のとおりである。

$$R_a = \frac{1}{n_p} R_p + \frac{1}{n_f} R_f \quad (\text{kN}) \quad (1)$$

ここで、

$R_a$ : 杭1本当たりの許容鉛直支持力(kN)

$R_p$ : 単杭の基準先端支持力(kN)

$R_f$ : 単杭の基準周面支持力(kN)

$n_p, n_f$ : 各荷重状態に対する安全係数

### (1)支持力式比較

6つの基準における先端支持力と周面支持力の式を表-1にまとめて、比較検討を行う。

#### a)先端支持力について

砂質系の土については、道路橋を除いて各設計とも300Nとしている。なお、道路橋についても、上限値は300Nである。粘性土については、鉄道とパイルネット(9c or 100N)、または建築と港湾(6c)がそれぞれ同様の基準を定めている。粘性土の設計に着目すると、建築と港湾の基準の方が設計値を小さくしている。道路橋では、先端支持力と同様の提案式が用いられている。また、建築については、上記以外で静的貫入試験結果  $q_c$  を支持力式に直接用いることができるようにしている。このことから、他の支持力算定に比べ粘性土の先端支持力については、各設計法により考え方に差異がある。佐賀県は軟弱地盤を対象としていて、先端支持力を見込んでいないのが特徴である。

#### b)周面支持力について

砂質土については、鉄道とパイルネット(3N+30)または建築と港湾、道路橋、佐賀県(2N)が同様の基準を定めている。このことから、建築と港湾、道路橋、佐賀県の基準の方が設計値を小さくしている。また、砂質土の周面支持力度の算定法は、上記の先端支持力度における粘性土設計基準とほぼ同じ組み合わせである。粘性土については、鉄道と道路橋、パイルネット(c or 10N)または建築と港湾、佐賀県(c)が同様の基準を定めている。

いずれの基準においても算定式にほぼ差異が見られない。また、建築と港湾において、先端と周面支持力度ともに粘性土では、 $N$ 値での評価を認めていない。加えて、表-2に示す通り  $N$ 値や  $c$ に上限値が設けられているため、各設計で式が同じであっても、必ずしも同じ値にならないことに留意しなければならない。

**(2)安全率比較**

本節では、軟弱地盤中に丸太を打設することを考え、安全率の比較検討を行う。表-3は、6つの基準における安全率を示す。軟弱地盤を想定すると、周面(摩擦杭)の安全率の比較となるが、先端(支持杭)と周面(摩擦杭)で安全率の値が異なるのは、道路橋だけである。その道路橋における周面の安全率4が、他の安全率と比較して最も大きいことがわかる。杭の材料として木材を基準に明記している港湾とパイルネット、佐賀県の安全率はそれぞれ2.5, 2, 1.5となっており、道路橋よりかなり小さいことがわかる。最も小さい佐賀県の基準では、プレキャストL型擁壁(H=2m以下)の底盤支持力を計算して不足支持力を杭丸太の支持力で補うという考え方である(基礎地盤鉛直支持力に関する安全率は3, 杭丸太の水平支持力, 鉛直支持力に関する安全率は1.5)。また、周面の安全率が1.5と小さいのは、杭丸太のテーパー効果や

杭丸太と原地盤の周面摩擦力, 杭丸太の吸水機能による原地盤水分の排水効果などを加味した結果である。佐賀県と比較して道路橋では、底盤支持力を見込まず鉛直荷重を全て杭に持たせる設計となっている。これにより杭丸太を用いる場合、過剰設計となり不経済となるばかりか杭と杭の間隔が狭くなりすぎて施工に支障をきたす場合も報告されている<sup>7)</sup>。ところで、鉄道と港湾については状況に応じて詳細に安全率の設定がなされている。港湾の括弧内の数字は、不完全と思われる支持層内に杭先端を止める場合である。

上記のとおり6つの基準の安全率を比較検討した結果、佐賀県の安全率1.5が実務上、最適と考えられる。

**(3)設計法のまとめ**

道路橋, 鉄道, 建築, 港湾, パイルネット, 佐賀県の基準について比較検討した結果, 以下の考え方で設計を行う。

- a) 支持力式は、佐賀県と同様、底盤支持力の不足分を杭丸太の支持力で補う設計法で先端支持力は見込まず周面支持力のみとする。
- b) 安全率は、佐賀県と同様、1.5とする。

表-1 各設計基準の支持力式比較

支持力式比較表		道路橋 (2002)	鉄道 (2000)	建築 (2007)	港湾 (2007)	パイルネット (2000)	佐賀県 (2006)
先端支持力度 (kN/m <sup>2</sup> )	砂質土	100N	300N	300N	300N	300N	-
	粘性土		9c or 100N	6c			
周面支持力度 (kN/m <sup>2</sup> )	砂質土	2N	3N+30	2N	2N	3N+30	2N
	粘性土	c or 10N	c or 10N	c	c	c or 10N	c
それぞれのN 値について	先端支 持力度	杭先端地盤 の設計N値	杭先端地盤 の設計N値	杭先端から下に1d,上 に4d間の平均N値	杭先端位置でのN値と杭先端より上方へ杭径4 倍までの範囲内の平均N値との平均N値	杭先端地盤 の設計N値	-
	周面支 持力度	標準貫入試 験のN値	各層のN値	杭周面地盤の平 均N値	各層のN値	各層のN値	標準貫入試 験のN値

表-2 各設計基準のN値とcuの上限比較

(N値, cu)比較表		道路橋 (2002)	鉄道 (2000)	建築 (2007)	港湾 (2007)	パイルネット (2000)	佐賀県 (2006)
先端支持力度 (kN/m <sup>2</sup> )	砂質土	N<40	N<33.3	N<60	N<50	-	-
	砂礫		N<50	-	-	-	-
	硬質粘性土、軟岩		cu<2222.2, N<200	cu<3000	cp	-	-
周面支持力度 (kN/m <sup>2</sup> )	砂質土	N<50	N<40	N<50	N	N<66.7	N<50
	粘性土	N<15	cu<150, N<15	cu<100	ca	cu<50, N<50	0.3 γz<c

表-3 各計基準の安全率比較

安全率比較表	先端						周面					
	道路橋	鉄道	建築	港湾	パイルネット	佐賀県	道路橋	鉄道	建築	港湾	パイルネット	佐賀県
常時・長期・使用限界状態	3	3.33-2.5	3	2.5	2	-	4	3.33-2.5	3	2.5	2	1.5
損傷限界、地震時使用限界状態	2	1.66	1.5	1.51	1.43	-	3	1.66	1.5	1.51	1.43	-
地震時終局限界状態	-	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-

**3. 基礎工の設計**

**(1) 地盤調査**

設計に必要な地盤定数を得るため、施工場所付近においてボーリング調査(深さ 6.4m)およびスウェーデン式サウンディング試験(深さ 10m, 5m 間隔)を 5 箇所, 簡易動的

的コーン貫入試験(JGS 1433-2003)を 1 箇所(深さ 12m)行った。表-4 は、ボーリング調査結果を示す。土質構成は 4 層に区分される。第 1 層(表土)は、層厚 0.4m で暗茶灰色を呈する礫混りシルトよりなる耕土である。含水量は多く、草根及び腐植物が混入する。第 2 層(粘性土 1)は、層厚 3.8m で暗茶灰色を呈するシルト層よりなる。含水量は多く上層は微細砂分が少量混入するが、ほぼ均質で

ある。全体に少量の炭化した腐植物が点在する。第3層(粘性土 2)は、層厚 0.35m で暗灰色を呈する礫混りシルト層よりなる。含水量はやや多い。混入する礫は 2~15mm 程度の亜円礫主体で不均質である。第4層(粘性土 3)は、暗灰色を呈するシルト層よりなる。含水量はやや多い。所々に腐植物が少量点在している。更に表-4は、試料土の性状試験結果を示す。粒度は、シルト分 54.6%、粘土分 19.0%、砂分 26.1%、礫分 0.3%を含んだ細粒であり、地盤材料の分類では低液性限界の砂質シルト(MLS)に分類される。コンシステンシー指数(Ic)は 0 よりも小さい値(Ic=(32.37-40.04)/6.33=1.24)となり、不安定な状態であることを示しており、また液性指数(IL)も 1 よりも大きい値(IL=(40.04-26.04)/6.33=2.21)となり不安定な状態と言える。

表-5は、土留式自由勾配側溝およびボックスカルバートの設計に用いる N 値および粘着力を示す。

土留式自由勾配側溝の N 値および粘着力は、スウェーデン式サウンディング試験により求めた。平均 N 値は 2.2、平均一軸圧縮強度(qu)は 31.7kN/m<sup>2</sup>であった。この値を用いて粘着力(c)を求めると 8N より 17.6、qu/2=31.7/2より 15.9となり安全側の 15.9を用いる。

ボックスカルバートの N 値および粘着力は、簡易動的コーン貫入試験により求めた。平均 N 値は 5.3 で粘着力(c)は 8N より 42.4を用いる。

表-4 ボーリング調査結果

深さ(m)		1.60~2.40	3.60~4.40	5.60~6.40
一般	湿潤密度 ρt(g/cm <sup>3</sup> )	1.946	1.820	1.700
	乾燥密度 ρd(g/cm <sup>3</sup> )	1.466	1.300	1.117
	土粒子の密度 ρs(g/cm <sup>3</sup> )	2.707	2.674	2.655
	自然含水比 wn(%)	32.9	40.04	52.20
	間隙比 e	0.85	1.06	1.38
	飽和度 Sr(%)	104.7	101.27	100.65
	土の含水比試験 w(%)	30.54	38.94	51.51
粒度	礫分(2~75mm) (%)	0.00	0.30	0.00
	砂分(75μm~2mm) (%)	12.00	26.10	5.50
	シルト分(5~75μm) (%)	58.60	54.60	74.70
	粘土分(5μm未満) (%)	29.40	19.00	19.80
テコンシス ティクス	液性限界 wL(%)	28.54	32.37	44.00
	塑性限界 wp(%)	19.95	26.04	29.74
	塑性指数 Ip(%)	8.59	6.33	14.26
分類	分類名	砂混り粘土	砂質シルト	砂混りシルト
	分類記号	CL-S	MLS	ML-S

表-5 N 値および粘着力

構造物	平均 N 値	粘着力(c)
土留式自由勾配側溝	2.2	15.9
ボックスカルバート	5.3	42.4

## (2) 基礎工選定

福井県小浜市内の県道拡幅工事において、軟弱地盤のため土留式自由勾配側溝(B=0.3m,H=0.7~1.2m,L=80m)基礎およびボックスカルバート(B=1.8m,H=1.1m,L=9.7m)の支持力が不足していることから、基礎工の検討を行った。

表-6は、道路規格を示す。基礎工形式の選定は、基礎工設計マニュアル<sup>9)</sup>に従った。表-7は、計画地における基礎工法の評価である<sup>9)</sup>。従来の工法選定では、杭丸太は直接基礎として検討されるため不経済、支持層が不明との理由で工法選定の対象にならない。ここでは、土留式自由勾配側溝基礎については、石灰安定処理工法で行うことで現場にて土のサンプリングを行い配合試験

を行った。その結果、一軸圧縮試験の目標強度(200kN/m<sup>2</sup>)を得るためには固化材添加量が 1,050kg/m<sup>3</sup>必要と推定されたため、石灰安定処理工での施工は経済的に困難と判断し、佐賀県のマニュアル<sup>7)</sup>に基づき杭丸太の周面支持力のみで安全率 1.5 で設計した。底盤の支持力は、道路橋<sup>2)</sup>に従い、安全率 3 とした。その結果、丸太直径 15cm、長さ 3m の杭丸太は、土留式自由勾配側溝 1m あたり 2 本必要であることがわかった。次にボックスカルバート基礎についてこま型基礎と杭丸太を比較検討する。石灰安定処理工法が経済的には最も良いが、ボックスカルバートについては、石灰安定処理工法では必要な支持力が得られないため、こま型基礎工法を選定した。しかしながら、佐賀県のマニュアル<sup>10)</sup>の支持力式および安全率を用いて杭丸太を設計すると経済的にも環境的にも良いと考えられたため再検討することとした。その結果、丸太直径 15cm、長さ 3m の杭丸太は、ボックスカルバート 1.1m あたり 2 本必要であることがわかった。また、杭丸太を用いた方が約 50 万円程度(直接工事費)安くなることがわかった。

表-6 道路規格

道路規格	3種3級
設計速度	50km/h
幅員構成	車道 3.0m (2車線)
	路肩(歩道なし) 0.75m
	路肩(歩道有り) 0.50m
	歩道 2.5m
	路上施設帯(両側) 0.5m
合計	10.75m

表-7 基礎工法の評価

工法	評価
置換工法	△
プレミックス工法	×
セメント安定処理工法	×
石灰安定処理工法	◎
締固め工法	×
重錘落下締固め工法	×
こま型基礎工法	○
シート・ネット・グリッド工法	△
杭基礎	×

## (3) 杭丸太基礎の設計

基礎コンクリート下面に作用する荷重は、土留式自由勾配側溝およびボックスカルバート本体の安定計算結果とモルタルおよび基礎コンクリートの自重を考慮した。基礎地盤の許容鉛直支持力は、道路橋<sup>2)</sup>の基礎地盤の鉛直支持力計算による。本設計では、佐賀県と同様に杭丸太一底盤系基礎の支持力計算により行った。杭丸太一底盤系計算では、簡便的に杭丸太周面支持力と底盤支持力がそれぞれに極限支持力を発揮しているものと考え、それぞれの極限支持力を重ね合わせて求めた。基礎地盤の支持力不足を杭丸太の周面摩擦力により補完すると考え、まず底盤支持力を計算し、不足支持力を杭丸太の周面支持力で補った。安全率は、底盤地盤支持力 3、杭丸太の周面支持力 1.5 にて設計した。基礎地盤の水平支持力は、基礎コンクリートと地盤との間に働くせん断抵抗力に対



して安全率 1.5 を確保した。せん断抵抗力は、道路橋示方書<sup>2)</sup> 下部構造編 p.280 の(10.3.2)式を準用し(2)式で求めた。本設計では、鉛直支持においては底盤の許容鉛直支持力の不足分を木杭基礎が分担していることから、底盤の許容支持力は 100%発揮されていると考える。このため底盤下面のせん断抵抗力算出においては、底盤の許容鉛直支持力を用いた。

$$R_{Hb} = C_B \cdot A_e + R_{vba} \cdot \tan \phi_B \quad (2)$$

ここで、

$R_{Hb}$ : 基礎底面と地盤との間のせん断抵抗力(kN)

$C_B$ : 基礎底面と地盤との間の付着力(kN/m<sup>2</sup>)

$A_e$ : 有効載荷面積(m<sup>2</sup>)

$R_{vba}$ : 基礎地盤の許容鉛直支持力(kN)

$\phi_B$ : 基礎コンクリート底面と地盤との間の摩擦角(°)

図-1 は、ボックスカルバートの断面図、図-2 は、土留式自由勾配側溝を示す。どちらも杭丸太の杭頭は、基礎コンクリートに 5cm 根入れしているだけのため杭丸太と基礎コンクリートの結合状態はヒンジ結合とした。

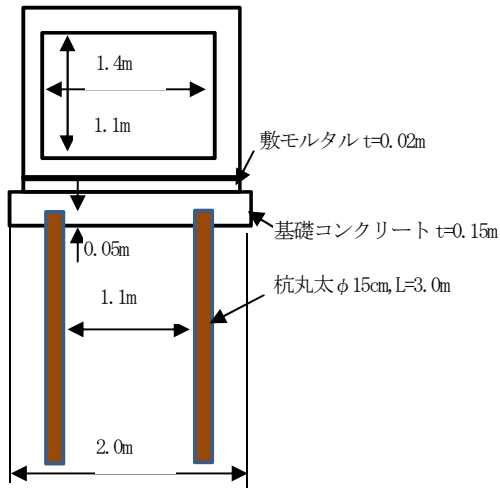


図-1 ボックスカルバート断面図

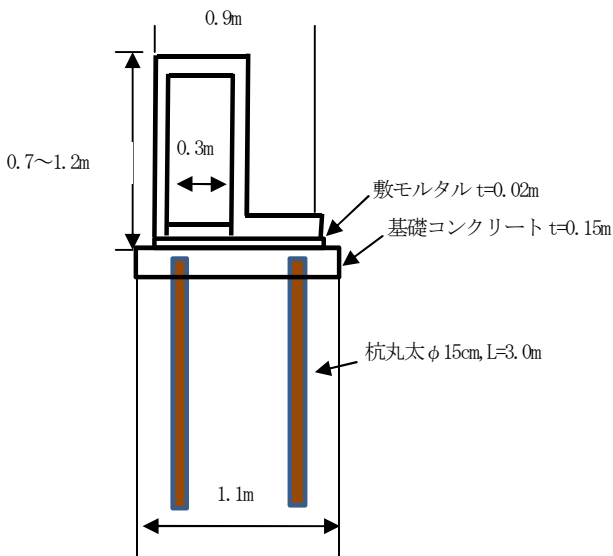


図-2 土留式自由勾配側溝断面図

#### 4. 基礎工の施工およびモニタリング調査

##### (1) 基礎工の施工

拡幅する道路を横断するボックスカルバート基礎に、杭丸太( $\phi 15\text{cm}$ ,  $L=3\text{m}$ )を 18 本打設した(写真-1)。使用する杭丸太は、福井県産スギ間伐材を用いた。土留式自由勾配側溝基礎に、杭丸太( $\phi 15\text{cm}$ ,  $L=3\text{m}$ )160 本打設した(写真-2)。施工機械は、専用のアタッチメントを取り付けたバックホウ(0.7m<sup>3</sup>)を用いた(写真-3)。施工上、特に問題となることはなかった(石灰安定処理工法では、降雨の影響で施工できないこともあるが杭丸太基礎では降雨の影響はなかった)。

##### (2) モニタリング調査

図-3 は、道路供用開始(11月中旬)から約 1ヶ月経過後、約 3ヶ月経過後、約 4ヶ月経過後の土留式自由勾配側溝およびボックスカルバートの定点(1箇所)の表面沈下量を示す。縦軸はベンチマークからの高さを示す。土留式自由勾配側溝およびボックスカルバートの表面は、全く沈下していないことがわかった。写真4、写真5 は、6ヶ月経過後の土留式自由勾配側溝およびボックスカルバートの状況を示す。目視確認の結果、沈下によるひび割れや漏水等はなかった。

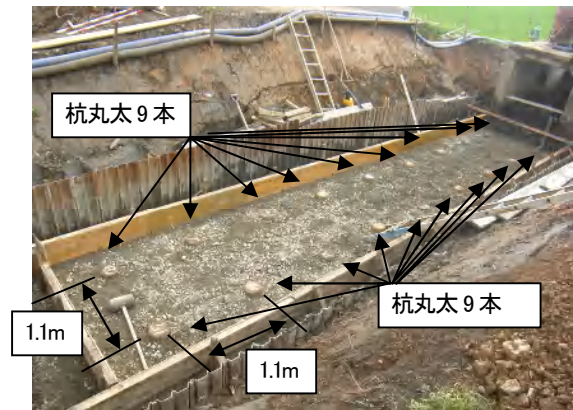


写真-1 ボックスカルバート基礎(全景)



写真-2 土留式自由勾配側溝基礎(一部分)



写真3 専用アタッチメントでの打設

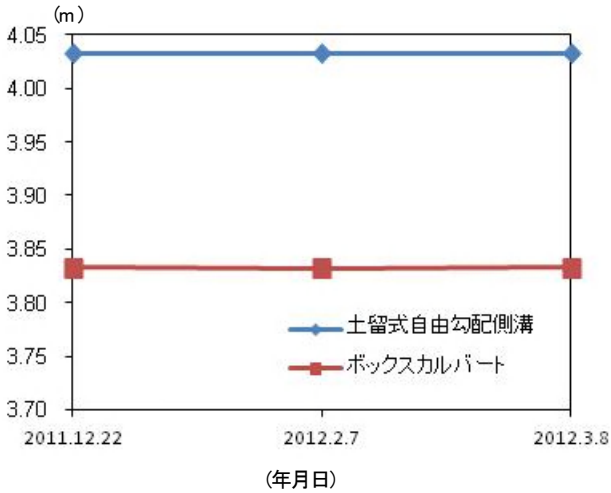


図3 土留式自由勾配側溝およびボックスカルバートの沈下量



写真4 土留式自由勾配側溝の状況(6ヶ月経過)



写真5 ボックスカルバートの状況(6ヶ月経過)

## 5. まとめ

全国版基準の考え方や佐賀県のローカルルールの方を整理し、杭丸太の特性を活かした設計方法を提案した。また、その設計方法に基づき土留式自由勾配側溝基礎およびボックスカルバート基礎の設計を行い、現場施工を実施した。施工後のモニタリング調査を行い設計方法の妥当性について検討した。具体的には以下のとおりである。

- (1) 福井県小浜市の県道拡幅工事において、木杭周面支持力と底盤支持力がそれぞれに極限支持力を発揮しているものと考え、スギ杭丸太の周面支持力は安全率1.5で設計した。
- (2) ボックスカルバート基礎および土留式自由勾配側溝基礎の軟弱地盤対策にスギ杭丸太(φ15cm,長さ 3m)を使用して施工したが施工性に問題はなかった。
- (3) 道路供用開始から約4ヶ月経過後、ボックスカルバートおよび土留式自由勾配側溝の表面沈下量を測定した結果、全く沈下していないことがわかった。6ヶ月経過後、目視確認の結果、沈下によるひび割れや漏水等はなかった。

以上のとおり、周面支持力のみ安全率1.5にて設計・施工し安全率・施工の妥当性について検討した結果、実務上問題ないことがわかった。長期的な安定性の検討は、今後必要である。

**謝辞:** 本研究を行うにあたり、福井県嶺南振興局小浜土木事務所および(株)下前産業にご協力いただきました。また、福井大学名誉教授 荒井克彦先生、佐賀大学名誉教授 三浦哲彦先生、(独)土木研究所 堤祥一研究員、飛鳥建設技術研究所 沼田淳紀氏、佐賀県木材利用研究会 宮副一之氏および福井県木材利用研究会の皆様にご指導、御助言をいただきました。

本研究は、科学研究費助成事業(研究種目: 基礎研究C, 課題番号: 22560504, 研究代表者: 吉田雅穂)の助成を受けて行いました。ここに記して感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 三浦哲彦: 軟弱粘土地盤における木杭基礎～ローカルルール作りの歩み～(2010), 木材利用シンポジウム in 福井講演概要集, pp33-36
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説(2002)
- 3) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説(2000)
- 4) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針(2007)
- 5) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(2007)
- 6) 鉄道総合技術研究所: 杭網(パイルネット)工法設計・施工の手引き(2000)
- 7) 佐賀県土木建築技術協会: プレキャスト L型擁壁(H=2m以下)の木杭-底盤系基礎(佐賀県)-設計マニュアル第1版~(2006)
- 8) 京福コンサルタント株式会社: (県単)道路改良工事 測量調査設計業務委託 栗田その1(2010)
- 9) 福井県土木部: 基礎工設計マニュアル(2000)
- 10) 佐賀県土木建築技術協会: 水路用ボックスカルバートの木杭-底盤系基礎~設計マニュアル(第1版)~(2005)