

# 木柵支柱の傾きを利用した劣化診断対象の抽出手法の検討

今井 良

## Investigation of a method for identifying deterioration diagnosis targets based on the tilt of wooden fence posts

Makoto IMAI

キーワード：木柵，維持管理，点検手法，傾斜角，ピロディン

本研究は，帯広広尾自動車道に設置された立入防止柵の維持管理業務の負担軽減のため，支柱群の劣化傾向を把握し，優先的に点検すべき対象を効率的に抽出する手法の検討を行い，管理者の維持管理方針の検討に資することを目的とした。平成 17～19 年に設置された支柱のうち，3 本おきに抽出した計 400 本を対象としてピロディン調査と傾斜角測定を実施した。その結果，15 年経過した対象には約半数で地際部の劣化が認められ，人力で水平加力を与えた際に得られた傾斜角とピロディン打ち込み深さ (Pe 値) との相関関係が認められた。また，Pe 値と支柱柱脚部の回転剛性にも相関関係が認められたことから，水平加力した時の傾斜角で対象支柱の健全性を推定できる可能性が示された。

### 1. はじめに

屋外木質構造物の維持管理業務における定期点検は，人力に頼るため作業手間や実施コストの点で大きな負担となっており，より簡易な点検手法が求められている。特に，高規格道路の立入防止柵のような延長が数十キロにも及ぶ木柵の場合，全数を対象とした点検は現実的ではない。

立入防止柵の指定管理者への聞き取り調査によれば，道路構造物の点検業務は，主として徐行運転した車両からの目視で行われており，木柵に傾きやゆがみが認められた場合のみ，停車して目視や触診による異状確認が行われている。しかし，このような確認手法は経験則に基づいているだけで，確認した異状から定量的に劣化を評価するエビデンスはない。

著者は，高規格道路の立入防止柵の耐用年数推定に関する既往の研究<sup>1)</sup>において，柱脚部に顕著な劣化を有する支柱が傾斜する傾向があることを確認している。点検が必要な支柱を車上から抽出することができれば，効率的に点検業務を行うことが可能となる。

本稿では，支柱の傾斜角と劣化の関係を定量的に評価し，劣化診断すべき対象の抽出手法の構築を試みた。

### 2. 調査対象および試験方法

#### 2.1 屋外調査

##### 2.1.1 調査対象

調査対象は，高規格道路である帯広広尾自動車道の木材保存剤 (AZNA または ACQ) で注入処理されたカラマツ製立入防止柵 (第1図) の支柱とした。調査した支柱は，帯広市昭和町～幸福町の約7kmの範囲の上り線・下り線の両側へ平成17～19年の間に施工されたもので，施工年や施工箇所を満遍なくカバーするため，施工年ごとに連続する3本ごとに1本を対象とし，合計100本調査した。調査対象の一覧を第1表に示す。



第1図 帯広広尾自動車道の立入防止柵

第1表 調査対象一覧

施工年 /経過年	処理 薬剤	支柱		本数 ( )は傾斜角 測定数
		直径 (mm)	高さ (mm)	
H17/16年	ACQ	125	1500	100 (300)
H17/16年	AZNA	125	1500	100 (300)
H18/15年	ACQ	150	1500	57 (171)
H18/15年	AZNA	150	1500	43 (129)
H19/14年	ACQ	150	1500	100 (300)

### 2.1.2 ピロディン調査

支柱は土中に直接建て込まれた掘立て構造で、腐朽劣化は主に土壌に接した地際部で生じていた。このことから、地際部を対象にピロディン（富士テック(株)製フジピロディン6J）調査を行い（第2図）、ピロディン打込み深さ（Pe値）を測定した。測定部位は木柵の正面側と裏側、両横側の4点とした。Pe値は40mmまで読み取ることができるが、読み取り限界を超えた場合には一律42mmとして記録した。得られた4点の平均Pe値を求め、平均Pe値から推定断面欠損深さDを式(1)<sup>2)</sup>より算出し、式(2)から断面二次モーメントIを算出した。

$$D = Pe_a - 14.5 \quad \dots (1)$$

$$I = \pi(r - D)^4 / 4 \times 10^{-4} \quad \dots (2)$$

ここで、D：推定断面欠損深さ(mm)、 $Pe_a$ ：平均Pe値(mm)、I：断面二次モーメント( $cm^4$ )、r：元の断面半径(mm)である。

### 2.1.3 傾斜角度測定

調査対象の支柱は、高さ1100mmの位置に傾斜角時計を当て、非加力時の支柱の傾斜角を測定した（第3図）。また、支柱は水平部材で連結されていることから、両脇の支柱の傾斜角も合わせて測定した。4点のPe値の平均値が30mmを超えた支柱について、高さ1100mmの位置でナイロンスリングとフォースゲージを用いて水平方向へ人力により250Nを加力し、その時の傾斜角を測定した（第4図）。

人力（250N）で水平加力した時に測定した傾斜角から式(3)で柱脚の回転剛性Kを求めた。柱脚の回転剛性は、外力を受けた支柱に生じるモーメントに対して、柱脚部がどの程度回転を抑えられるかを示す

指標で、一般に構造力学で定義される。

$$K = \Delta M / \Delta \theta \quad \dots (3)$$

ここで、K：回転剛性 ( $kN \cdot m / rad$ )、 $\Delta M$ ：モーメント変化量 ( $kN \cdot m$ )、 $\Delta \theta$ ：回転角変化量 (rad) である。



第2図 ピロディン調査の様子（支柱の地際部）



第3図 非加力時の支柱の傾斜角測定の様子



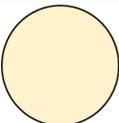
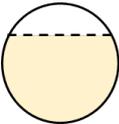
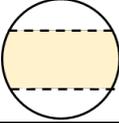
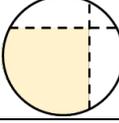
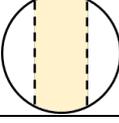
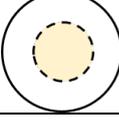
第4図 水平方向への人力による加力の様子

## 2.2 強度試験

### 2.2.1 試験体

立入防止柵と同じ直径120mmのカラマツ円柱加工材（長さ1800mm）に対して、強度試験機による支柱の引き倒し試験を行った。試験体には腐朽被害により強度を負担できない欠損部が生じていると仮定し、第2表に示す6パターンに柱脚部を切削加工した。加力方向をX軸とし、X軸に欠損が1面あるパターンをパターンA、2面あるパターンをパターンB、X軸とY軸に1面ずつあるパターンをパターンC、Y軸に2面あるパターンをパターンD、4面（全周）欠損しているパターンをパターンEとし、対照として健全な支柱を想定した無切削をパターンNとした。いずれも切欠きの長さは120mmで、深さは15mm、25mm、35mmの3種類とした。試験体数は各3体としたが、パターンAを除くパターンB～Eの切欠き深さ25mmは各1体とした。なお、カラマツ円柱加工材は、事前に縦振動法により動的ヤング係数 $E_H$ でグレーディングし、パターンごとに $E_H$ が偏らないように分配した。

第2表 試験体の加工パターン

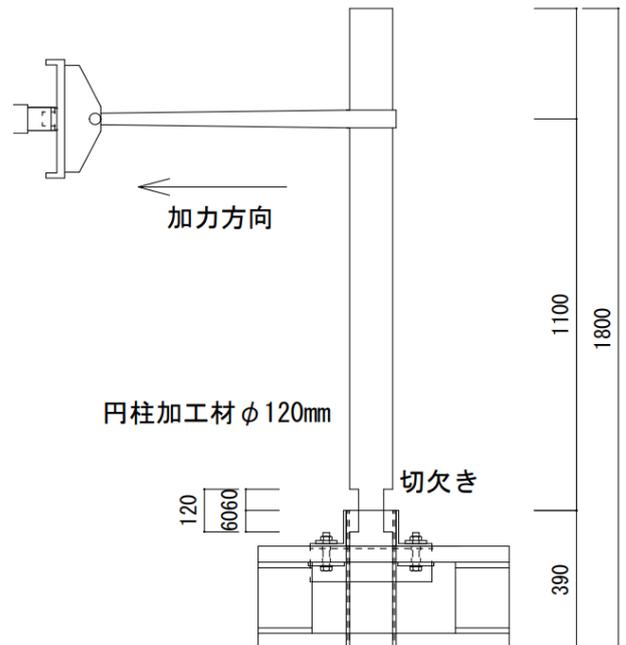
パターン	切欠き内容	断面図 ※加力方向は上から下	切欠き深さ (mm)	試験体数
N	無切削		0	3
A	加力方向 1面欠損		15	3
			25	3
			35	3
B	加力方向 2面欠損		15	3
			25	1
			35	3
C	加力1面 直交1面 欠損		15	3
			25	1
			35	3
D	直交方向 2面欠損		15	3
			25	1
			35	3
E	4面欠損		15	3
			25	1
			35	3

### 2.2.2 試験方法

試験は繰り返し試験機（(株)岩崎製、容量200kN）を用いた。支柱は、地盤を模した基礎鉄骨に鉛直に設置し、高さ1100mmの部位にナイロンスリングを掛けて、ナイロンスリングを介した引き方向の単調加力を加え、支柱が破壊するまで加力した（第5図）。

ロードセルにより荷重値を、ワイヤー式変位計（(株)共和電業製、容量500mm）により高さ1100mmの水平変位を測定し、高さと水平変位より算出した支柱の傾斜角と荷重の関係を得た。

強度試験機による試験に先立ち、2.1.3と同様に人力による加力（250N）を行って傾斜角を測定した（第6図）。



第5図 支柱の引き倒し試験（単位:mm）



第6図 屋内での人力による加力試験

### 3. 結果と考察

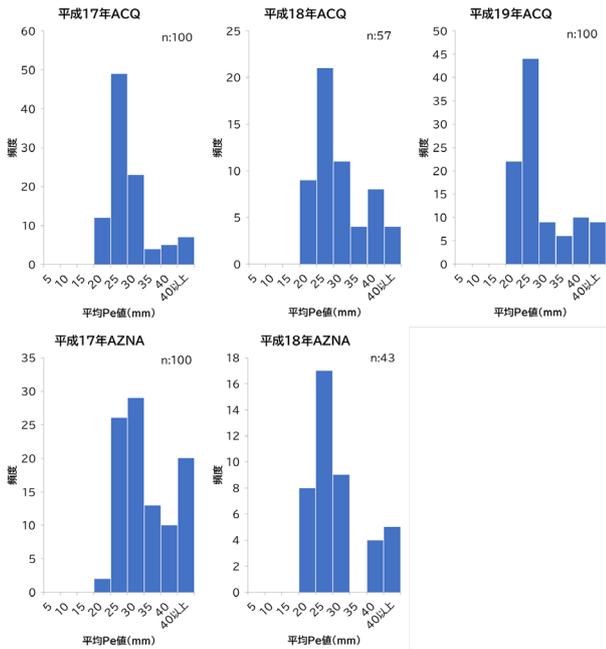
#### 3.1 屋外調査結果

##### 3.1.1 ピロディン試験

調査エリアごとに支柱の平均Pe値のヒストグラムを示す(第7図)。健全なカラムツのPe値は15mm<sup>1),3)</sup>程度で、地際部のため高含水率条件となり2~5mm増大した値が示されている<sup>3),4)</sup>と想定すると、20mm以下の平均Pe値は健全であると考えられる。平成17年の支柱では平均Pe値20mm以下の個体は非常に少なく、特にAZNA処理された支柱では2%程度であった。また、腐朽による劣化が確実に認められる30mm以上の平均Pe値の割合がすべての調査エリアで10%以上確認された。平成17年のAZNA処理された支柱では、約半数が30mm以上の平均Pe値であり、エリア全体で早急な劣化診断や交換措置等が必要と考えられる。

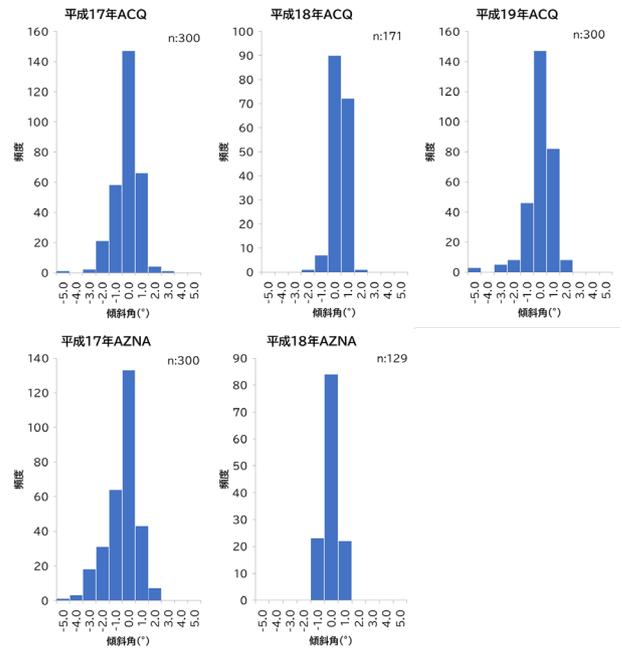
##### 3.1.2 非加力時の傾斜角測定結果

支柱の傾斜角の測定結果を、ヒストグラムで示す(第8図)。木柵の前方に傾いているものはマイナスで、後方に傾いているものはプラスで傾斜角を示した。平成18年、19年ではおおむね±1度の範囲に収まったが、平成17年は±2度以上傾いた支柱が13%程度確認され、特にAZNA処理された支柱で顕著(約17%)であった。

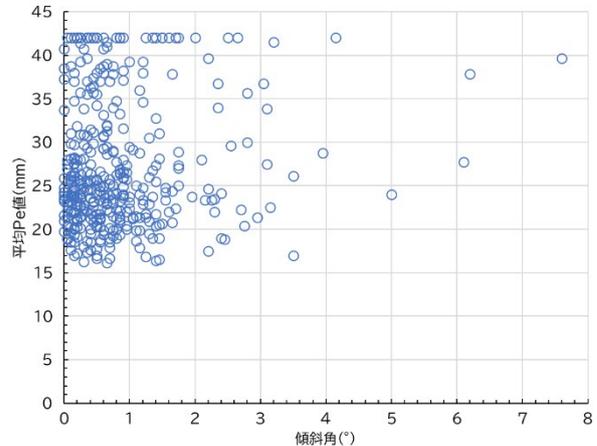


第7図 支柱の平均Pe値のヒストグラム

得られた傾斜角と平均Pe値の関係を第9図に示す。傾斜角が2°以上でも平均Pe値が16~17mm程度のもの、平均Pe値が42mm以上(ピロディン測定限界)でも傾斜していないものなどが多数確認でき、明確な関係性は見いだせなかった。これは施工当初の木柵支柱の傾斜角が0°であったという確証がなく、施工当初から既に傾斜していた可能性も考えられる。つまり、外力を与えていない非加力時の傾斜角を用いて支柱の異常を発見するには、施工当初から現時点までの傾斜角の変動量を見る必要があり、初期の傾斜角データを備えておくことが必須であると考えられる。



第8図 支柱の傾斜角のヒストグラム

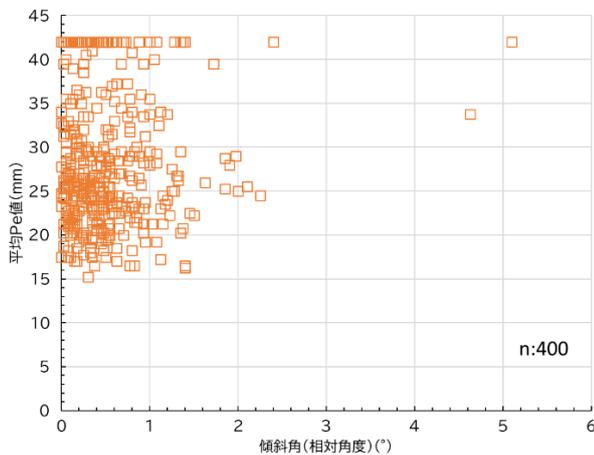


第9図 支柱の傾斜角(絶対角度)と平均Pe値の関係

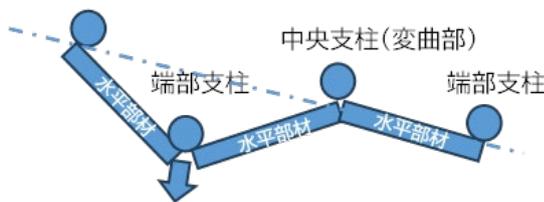
次に、測定対象支柱に隣接する左右の支柱の傾斜角を用いて、第10図のように上から見た場合の支柱頂部の位置関係が「への字」状で、かつ変曲部（への字の頂点）の角度 $\theta$ が相対的に大きくなる支柱に異状が存在するという仮説を立てた。この仮説に基づいて、両隣の支柱の傾斜角の平均値と中央の傾斜角の差分を傾斜角（相対角度）と定義した。平均Pe値と相対角度の関係を第11図に示す。相対角度が $2^\circ$ 以上の対象には何らかの劣化が生じている可能性は示唆されたが、明らかな傾向は見いだせなかった。今回は支柱3本の位置関係で検討したが、実際には「への字」の端部の支柱が最も傾斜（第12図）している可能性もあり、より多くの支柱を対象に相対角度を見るべきであることが示唆された。また、任意のタイミングで得られる傾斜角のみで異状を判断できる



第10図 木柵の上面図イメージ（への字）



第11図 傾斜角（相対角度）と平均Pe値の関係

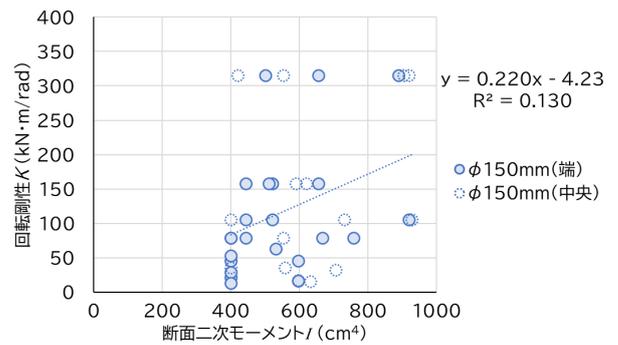
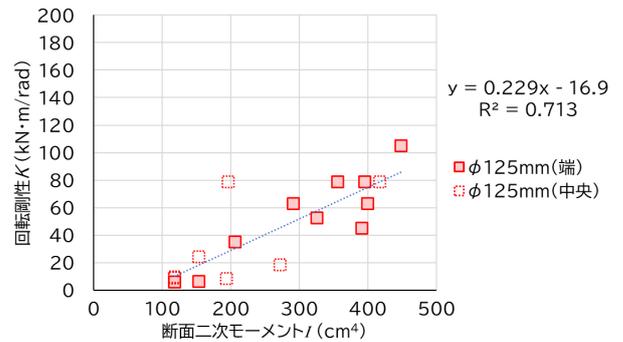


第12図 端部支柱が最も傾斜した上面図イメージ

ケースは限定的であったことから、時間経過による傾斜角の変動データ、つまりは初期値の重要性が示唆された。

### 3.1.3 水平加力時の傾斜角測定結果

支柱の断面二次モーメントと回転剛性 $K$ の関係を第13図に示す。直径125mmの支柱では、多少のばらつきはあるものの概ね相関関係が認められた。一方で直径150mmの支柱では、回転剛性が約 $315\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ の7体が全体の傾向から大きく外れる結果となった。帯広広尾自動車道の木柵の仕様上、隣り合う支柱同士を連結する水平部材が、支柱3本（2スパン分）にまたがって取り付けられているため（第14図）、中央部に該当する支柱の結果には水平部材の曲げ剛性が加算されているためと考えられた。しかし、水



第13図 支柱の断面二次モーメントと回転剛性の関係（上図： $\phi 125\text{mm}$ ，下図： $\phi 150\text{mm}$ ）



第14図 1本で2スパン分の水平部材

平部材の端部にあたる支柱のデータのみ抽出して再検討したが、直径125mmではやや相関が向上した一方で、直径150mmでは明確な変化は見られず、端部の支柱にも外れ値が存在していることがわかった。このことから、今回の水平加力（250N）では、直径150mmの支柱に十分な曲げ変形を生じさせることができず、得られた傾斜角の数値が地盤の緩みなどによる誤差の影響を強く受けたと考えられる。また、直径150mmの支柱における断面二次モーメントが約400cm<sup>4</sup>の7対象については、平均Pe値が42mmでピロディンの測定限界を超えていたため、実際には42mm以上の深いPe値が得られるほどの劣化が生じていた可能性があり、断面二次モーメントが過大評価された結果であると考えられる。

直径125mmと150mmの回帰式の傾きが約0.22と近似した。これは、片持ち梁の支点の回転角度 $\theta$ の理論式(4)より、回転剛性 $K$ の式(3)から曲げヤング係数 $E$ と加力点高さ $L$ の関係式(5)が導かれ、 $K$ と $I$ の関係式の傾き $a$ は式(6)で与えられるため、直径が異なっても $a$ は断面二次モーメント $I$ の影響を受けず、個体差はあっても近似した値になるのは自明なためである。

$$\theta = FL^2/2EI \quad \dots (4)$$

$$K = M/\theta = FL/(FL^2/2EI) = 2EI/L \quad \dots (5)$$

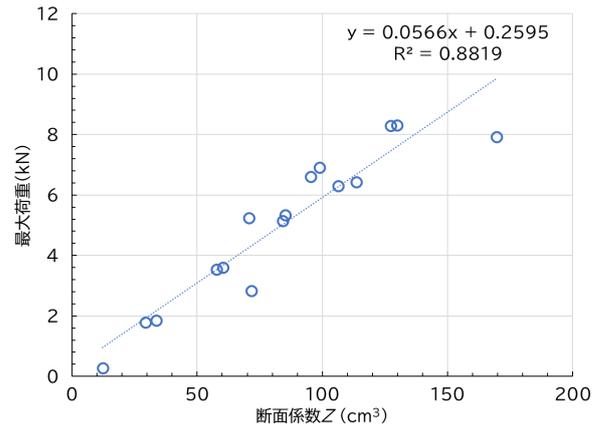
$$a = K/I = 2E/L \quad \dots (6)$$

ここで、 $\theta$ :片持ち梁の支点の回転角(rad)、 $F$ :水平荷重(N)、 $L$ :加力点高さ(m)、 $E$ :弾性係数(kN/mm<sup>2</sup>)、 $I$ :支柱の断面二次モーメント(cm<sup>4</sup>)、 $K$ :支柱地際部の回転剛性(kN・m/rad)である。

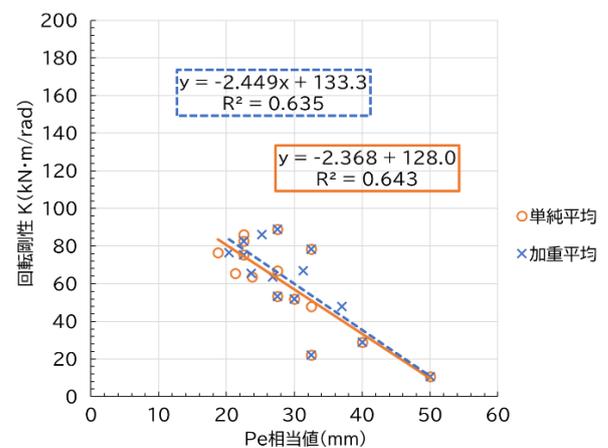
例えば、カラマツ円柱加工材の曲げヤング係数 $E$ を12 kN/mm<sup>2</sup>であると仮定した場合、傾き $a$ は0.22 kN・m/cm<sup>4</sup>となり、回帰式の傾きにはほぼ合致する。このことから、直径150mmの支柱には様々な誤差の要因が含まれた結果であることが明らかである。

### 3.2 強度試験結果

最大荷重と断面係数 $Z$ の関係を第15図に示す。各パターン(N,A15,A25,A35,B15,...E35)の値は1~3体の平均値で示した。全周切り欠いたEについては、深さ35mmの試験体(E35)が人力による250N加力で1体破壊したため、ここには2体分の平均値で示している。最大荷重と断面係数には一定の相関が認められた。



第15図 最大荷重と断面係数の関係



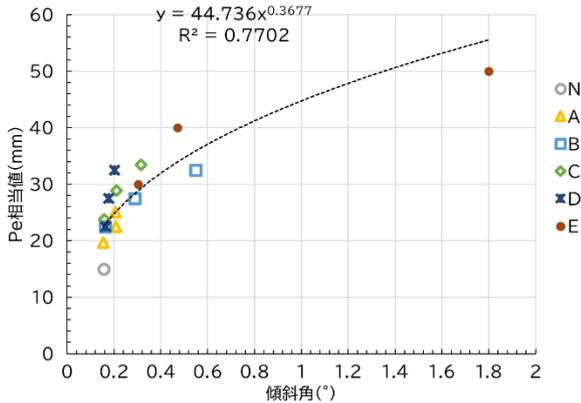
第16図 回転剛性とPe相当値の関係

次に、柱脚部の回転剛性とPe相当値の関係を第16図に示す。Pe相当値は切欠き深さを断面欠損深さ $D$ とみなして2.1.2の式(1)より算出した。また、4点の単純平均値 $Pe_a$ と、断面二次モーメントが断面の加力方向の長さを3乗していることから考案した式(7)により加力方向のPe値を加重した加重平均値 $Pe_w$ を示した。

$$Pe_w = \sqrt[4]{((Pe_1 + Pe_3)/2)^3((Pe_2 + Pe_4)/2)} \quad \dots (7)$$

ここで、 $Pe_w$ :加重平均値(mm)、 $Pe_1, Pe_3$ :加力方向のPe相当値(mm)、 $Pe_2, Pe_4$ :加力と垂直方向のPe相当値(mm)である。

$Pe_a, Pe_w$ のいずれも回帰直線の当てはまりが良く、回転剛性と強い相関があるといえる。加力方向のPe値を加重平均した方が、回転剛性と相関が高くなると想定していたが、今回の結果からは単純平均した結果との差異は認められなかった。



第17図 Pe相当値と250N加力時傾斜角の関係  
(凡例の記号は表2参照)

最後にPe相当値と250N加力時傾斜角の関係を第17図に示す。線形近似でも高い相関があったが、累乗近似することでより回帰式の当てはまりが向上した。回帰式では傾斜角の0.3677乗となっているが、 $0.3677 \approx 1.1/3$ であり、これはほぼ3乗根に等しく、 $0.2^\circ \sim 2^\circ$ の範囲での誤差は5%未満である。回帰式の指数を1/3と置き換えて、両辺を入れ替えると式(8)のように変形することができる。

$$TA = 1.117Pe^3 \times 10^{-5} \quad \dots (8)$$

ここで、 $TA$ は傾斜角( $^\circ$ )である。

この関係式より、 $Pe$ 値の3乗と傾斜角との間に比例関係が成立することが示唆される。 $Pe$ 値の3乗は、加力方向の断面欠損長さを3乗することに相当し、断面二次モーメントに関連する量である。したがって、断面二次モーメントと密接に関係する部材剛性と変形角との比例関係を考慮すれば、本結果は力学的にも整合する。

#### 4. 結論

本研究では、限られた予算や時間の中で効率的に木柵構造物の定期点検を行うことを目的とし、劣化した対象を優先的に抽出する手法の開発を試みた。そのため、木柵支柱の傾斜角に着目し、実用可能性の検討を行った。

その結果、以下の知見が得られた。

- ・設置後15年以上経過した木柵では、支柱地際部の約半数で平均 $Pe$ 値が30mmを超えていた。
- ・木材保存剤の種類によって平均 $Pe$ 値に差がみられ、

ACQよりもAZNAを使用した支柱で $Pe$ 値が高い傾向が示された。

- ・加力していない支柱の傾斜角（絶対角度・相対角度）は平均 $Pe$ 値と相関せず、初期傾斜角からの変化量を評価する必要があることが示唆された。
- ・人力による水平加力で得られた傾斜角と、 $Pe$ 値から推定した断面欠損深さをもとに算出した断面二次モーメントは、直径125mmの支柱では相関関係を示したが、直径150mmの支柱では250Nの水平加力では不十分であることが明らかとなった。
- ・切欠きパターンごとに推定した $Pe$ 値と、引き倒し試験から算出した回転剛性との間に強い相関が認められ、 $Pe$ 値から推定する断面欠損深さの妥当性が裏づけられた。
- ・ $Pe$ 値の3乗と加力時の傾斜角との間に比例関係が成立する可能性が示唆された。

これらの結果から、支柱を水平加力した傾斜角を測定することで地際部の $Pe$ 値や残存強度を推定できる可能性が示された。本研究で得られた知見は、劣化した対象を優先的に抽出するための新たな診断手法として活用できることを示唆している。

一方で、加力を行わない支柱の傾斜角の活用には、初期値との関係性を明らかにする必要がある。今後は新設木柵の初期傾斜角を記録し、経年劣化との関係を追跡することで、UAV（ドローン）や走行車両からの目視点検による抽出手法の構築を目指す。また、異なる木柵構造物を対象に、加力時の傾斜角を利用した診断手法の実証と精度検証を行い、点検業務の効率化および木柵構造物の需要拡大に資する実用的手法の確立を図る。

#### 参考文献

- 1) 今井良, 小林裕昇, 宮内輝久, 伊佐治信一, 平間昭光, 戸田正彦, 藤原拓哉, 前田典昭, 笠間聡: 保存処理木材を用いた高規格道路用木製立入防止柵の劣化調査. 日本木材学会大会研究発表要旨集(完全版)(CD-ROM), **67**, N18-P2-12(2017).
- 2) 今井良, 小林裕昇, 笠間聡: 北海道の高規格幹線道路に設置されたカラマツ材製立入防止柵の耐用年数推定. 木材利用研究論文報告集, **18**, 25-33(2019).

- 3) 山田昌郎, 森満範: 木材の含水率とピロディン打込み深さの関係. 土木学会第 70 回年次学術講演集, 771-772 (2015). 木材学会大会研究発表要旨集(完全版)(CD-ROM), 68, N15-P-12(2018).
- 4) 今井良, 小林裕昇: インサイジングが含水率とピロディン打ち込み深さに与える影響. 日本  
一性能部 構造・環境グループ  
(原稿受理: 2025.12.03)