### 学術調査

# Ⅱ 山形市の重要文化財「鳥居」の劣化に関する総合調査

石﨑武志 ISHIZAKI, Takeshi/文化財保存修復研究センター研究員・教授 小柴まりな KOSHIBA, Marina/芸術学部文化財保存修復学科 4年 澤田正昭 SAWADA, Masaaki/文化財保存修復研究センター長・教授

#### 1. 緒言

本研究での調査対象は、山形県山形市鳥居ヶ丘 の住宅地にある石鳥居である (図1)。周辺一帯 の地名から「元木の石鳥居」、「元木の鳥居」など の通称がある。鳥居は凝灰岩で作られ、大きさは 高さ351cm、左柱の径が97.1cm、右柱の径が 92.3cmである。元木石鳥居の正確な建立年代は不 明である。瀧山信仰の全盛期、天延年間(973-976年) に瀧山大権現へ奉納されたという言い伝 えがあり、明確に建立年代等を示す文献や記録は 不明であるが、様式が古いことから平安時代末期 であると推定されている。明神系鳥居といわれる この様式は、笠木の反りがわずかであり、木口が 垂直であることが特徴である。また柱間と貫下の 空間が横長である傾向が強い。これらは、特徴は 室町時代以前に多くみられたものであることから、 平安時代末期のものであると考えられている。石 造美術研究家 川勝政太郎によれば元木の石鳥居 は日本最古のものであり、大阪天王寺鳥居や大分 県の臼杵市深田の石鳥居よりも古いとされている。

元木石鳥居は1927年(昭和2年)に山形県の名勝として指定されたのち、1937年(昭和12年)に国宝指定の申請を行い、1952年(昭和27年)11月22日に国の重要文化財に指定された。重要文化財としての指定名称は「鳥居」である。所有者は小立地区で、文化財保護法第32条の2の規定に基づく重要文化財の管理団体として山形市が指定されている。



図1. 重要文化財「鳥居」の外観

2017年に、山形市より依頼を受け、重要文化財「鳥居」の劣化に関する総合調査を行った。ここでは、針貫入試験および音波トモグラフィーにより測定した石材の強度について以下に報告する。

# 2. 針貫入試験

調査対象となる石鳥居凝灰岩の現在の劣化強度を把握するために行った。丸東製作所製 軟岩ペネロペ計SH-70の針貫入試験機を使用した。基本強度は成形した未風化の成沢地区凝灰岩で測定した。石材表面の強度評価を行うために、柱部分で、東西南北の方向で、高さ1m、2m、2.8mのそれぞれ3カ所および貫部分、笠木部分で、針貫入試験を行った。測定場所を、図2に示す。また、測定点、B, C, D, H, I, Jの石材表面の状況を図3、4、5,6、7、8に示す。

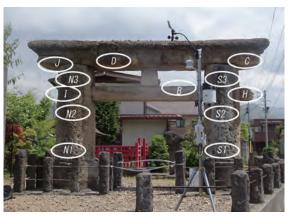


図2. 針貫入試験測定点



図3. 測定点 B の石材表面状況



図4. 測定点 C の石材表面状況



図5. 測定点Dの石材表面状況



図6. 測定点H(貫部分)の石材表面状況



図7. 測定点 I (貫穴部分) の石材表面状況



図8. 測定点 J (笠木剥ぎ石部分) の石材表面状況

これらの点で、針貫入試験を行い、得られた針貫入勾配より、一軸圧縮強度を求めた。針貫入勾配は、軟岩ペネロペ計の針を1mm貫入させるために、何ニュートン(N)の力が必要かという意味で、単位はN/mmで表示される。また、一軸圧縮強度は、100kN/㎡の単位で示される。これは、1kgf/c㎡に対応している。

表1に、南側柱の針貫入試験測定結果を示す。

表 1. 南側柱の針貫入試験測定結果

	東側		南側		西側		北側	
	針貫入公面	強度	針貫入公面	強度	針貫入勾配	強度	針貫入勾配	強度
	(N/mm)	100kN/m2	(N/mm)	100kW/m2	(N/mm)	100kW/m2	(N/mm)	100kWm2
1m高さ	22	85	29	111	24	93	33	129
	29	111	50	192	25	97	.20	78
	15	61	25	100	67	254	29	111
2m高さ	25	97	33	128	33	129	.21	81
	40	154	40	154	33	129	18	71
	50	192	20	78	50	192	24	93
2.8m高さ	50	192	67	254	50	192	38	1.48
	31	121	50	192	50	192	17	65
	12	47	50	192	40	154	67	254

この表で、強度は、一軸圧縮強度、また、100kN/㎡は、0.1MPaでkgf/c㎡に対応している。 南側柱の針貫入勾配は、 $12\sim67$ N/mmの範囲で、これから計算される一軸圧縮強度は $47\sim254*100$ kN/㎡であった。

表2. 北側柱の針貫入試験測定結果

	東側		南側		西側		北側	
	針貫入勾配	強度	針貫入公面	強度	針貫入勾配	強度	針貫入勾配	強度
	(N/mm)	100kN/m2	(N/mm)	100kW/m2	(N/mm)	100kN/m2	(N/mm)	100kN/m2
1m高さ	20	78	50	192	33	129	20	78
	14	56	36	138	12	48	24	93
	33	129	26	102	12	47	50	192
2m高さ	40	154	33	129	33	129	26	102
	50	192	50	192	12	47	36	138
	25	97	31	121	33	129	22	87
2.8m高さ	50	192	25	97	24	93	33	129
	24	93	25	97	24	93	33	129
	33	129	17	65	25	97	25	97

北側柱の針貫入勾配は、12~50N/mmの範囲で、これから計算される一軸圧縮強度は47~192 \*100kN/㎡であった。

表3. 貫B点の針貫入試験結果

B-1		B-2	7	B-3		B-4	
針貫入勾配強度		針貫入公配	強度	針貫入勾配	強度	針貫入勾配強度	
(N/mm)	100kN/m2	(N/mm)	100kN/m2	(N/mm)	100kW/m2	(N/mm)	100kN/m2
33	129	8	33	6	25	7	29
20	78	7	29	4	17	50	192
15	61	50	192	6	25	14	56

貫 B 点の針貫入勾配は、 $4 \sim 50 \text{N/mm}$ の範囲で、これから計算される一軸圧縮強度は $17 \sim 192*100 \text{kN/m}$ であった。

表4. 笠木C点の針貫入試験結果

C-1		C-2		C-3		C-4	
針貫入勾配強度 針貫入勾配強度			針貫入勾配強度 針貫入勾配強度				
(N/mm)	100kN/m2	(N/mm)	100kW/m2	(N/mm)	100kW/m2	(N/mm)	100kW/m2
40	154	36	138	25	97	50	192
33	129	50	192	50	192	67	254
33	129	25	97	40	154	36	138

笠木 C 点の針貫入勾配は、25~67N/mmの範囲で、これから計算される一軸圧縮強度は97~254 \*100kN/m°であった。

表5. 笠木D点の針貫入試験結果

D-1		D-2		D-3		D-4	
針貫入勾配強度 針貫入勾配			強度	針貫入勾配	針貫入勾配強度		
(N/mm)	100kN/m2	(N/mm)	100kN/m2	(IV/mm)	100kW/m2	(N/mm)	100kW/m2
22	87	36	138	33	129	25	97
25	97	17	65	12	47	40	154
26	102	21	81	20	78	40	154

笠木D点の針貫入勾配は、12~40N/mmの範囲で、これから計算される一軸圧縮強度は47~154\*100kN/m²であった。

表 6. 測定点H(貫部分)の針貫入試験結果

H-1	1000	H-2		H-3		H-4		H-5		
針貫入勾面強度針		針貫入公理	針貫入公面強度		針貫入勾配強度		針貫入公路強度		針貫入勾盾強度	
(N/mm)	100kW/m2	(N/mm)	100kN/m2		100kW/m2	(N/mm)	100kWm2	(N/mm)	100kW/m2	
50	192	12	48	22	87	25	.97	25	97	
10	40	22	87	50	192	15	61	25	97	
20	78	25	97	33	129	10	40	20	78	
H-6		H-7		H-8		H-9		H-10		
針貫入勾配	強度	針貫入公	強度	針貫入公路	強度	針貫入公理	強度	針貫入勾配	強度	
(N/mm)	100kW/m2	(N/mm)	100kN/m2	(N/mm)	100kN/m2	(N/mm)	100kW/m2	(N/mm)	100kN/m2	
100	378	29	111	50	192	20	78	50	192	
200	744	22	87	40	154	20	78	33	129	
200	744	- 20	78	50	192	22	87	67	254	

測定点H(貫部分)の針貫入勾配は、 $10\sim200$ N/mmの範囲で、これから計算される一軸圧縮強度は $40\sim744*100$ kN/㎡であった。

表7. 測定点I(貫穴部分)の針貫入試験結果

I-1		I-2		I-3		I-4	
針貫入勾配	強度	針貫入公理	強度	針貫入勾配	強度	針貫入勾盾強度	
(N/mm)	100kW/m2	(N/mm)	100kW/m2		100kN/m2	(N/mm)	100kW/m2
167	622	50	192	50	192	50	192
4	17	25	97	100	378	17	65
200	744	25	97	45	175	33	129
I-1		I-2		I-3		I-4	
針貫入勾配	強度	針貫入公理	強度	針貫入勾面	強度	針貫入勾配	強度
(N/mm)	100kN/m2	(N/mm)	100kN/m2	(N/mm)	100kN/m2	(N/mm)	100kW/m2
29	114	33	129	50	192	29	111
11	44	33	129	25	97	29	111
50	192	67	254	14	56	25	97

測定点 I (貫穴部分)の針貫入勾配は、 $4\sim200\mathrm{N/mm}$ の範囲で、これから計算される一軸圧縮強度は $17\sim744*100\mathrm{kN/m}$ であった。

表8. 測定点J(笠木剥ぎ石部分)の針貫入試験結果

J-1		J-2		J-3		J-4	
針貫入勾盾強度		針貫入公理強度		針貫入勾面	強度	針貫入勾配強度	
(N/mm)	100kN/m2	(N/mm)	100kN/m2	(N/mm)	100kWm2	(N/mm)	100kW/m2
50	192	67	254	200	744	200	744
29	111	67	254	200	744	29	111
29	111	67	254	200	744	100	378

測定点 J (笠木剥ぎ石部分)の針貫入勾配は、 $29\sim200N/mm$ の範囲で、これから計算される一軸圧縮強度は $111\sim744*100kN/m$ であった。

また、重要文化財「鳥居」の石材に使用されていると考えられる、劣化度の低い成沢地区凝灰岩試料を、図 9 に示すように、直径 5 cm、高さ 3 cmの円柱に成形し、ラベルで表示した部分の針貫入試験を行った。これを表 9 に示す。結果は、針貫入勾配は、 $25\sim200\mathrm{N/mm}$ の範囲で、これから計算される一軸圧縮強度は  $97\sim744*100\mathrm{kN/m}$ となり、ばらつきはあるものの、高い強度を示した。

また、図10に示したように、表面が劣化していると考えられるラベルで表示した部分の針貫入試験を行った。これを表10に示す。結果は、針貫入勾配は、 $20\sim67N/mm$ の範囲で、これから計算される一軸圧縮強度は $78\sim254*100kN/m²$ となり、表9のものより、低い強度を示した。



図9. 劣化度の低い成沢地区凝灰岩試料の石材表面



図10. 劣化度の高い成沢地区凝灰岩試料の石材表面状況

#### 表9. 劣化度の低い成沢地区凝灰岩試料の針貫入試験結果

S-1		S-2		S-3		S-4	
針貫入勾配	強度	針貫入公配	強度	針貫入勾配	強度	針貫入勾面	強度
(N/mm)	100kN/m2	(N/mm)	100kW/m2	(N/mm)	100kN/m2	(N/mm)	100kWm2
40	154	100	378	67	254	200	744
100	378	25	97	67	254	200	744
56	212	200	744	100	378	67	254

表10. 劣化度の高い成沢地区凝灰岩試料の針貫入試験結果

A-1		A-2		A-3		A-4	
針貫入勾配強度 針貫入			強度	針貫入公配	強度	針貫入勾配強度	
(N/mm)	100kN/m2	(N/mm)	100kWm2	(N/mm)	100kW/m2	(N/mm)	100kWm2
25	97	33	129	20	78	67	254
50	192	33	129	50	192	50	192
50	192	50	192	33	129	22	87

# 3. 音響トモグラフィーによる鳥居の構造調査

この方法は、石材中の音波の伝搬速度を測定することにより、内部の石材の強度を評価する手法である。石材が、劣化していると音波の伝搬速度は遅くなり、健全であると音波の伝搬速度は速くなる。ここでは、図11に示した位置の、音波の伝搬速度を測定した。また、劣化度の低い成沢地区凝灰岩試料の音波の伝搬速度を測定し、鳥居での測定結果との比較を行った。測定場所は、北側柱、南側柱において、地面より、130cm、190cm、250cmの高さの部分である。



図11. 音波の伝搬速度測定場所

本調査で用いた測定システム(ドクターウッズ)は音響波を用いた樹木内部診断システムである。計測対象物の表面に設置した発振・受信兼用のセンサを用いて、各センサ間の間で縦波を発振・受信する。縦波の到達時間と各センサ間の距離から伝播速度を計算し、逆計算と呼ばれる手法で各メッシュの速度を求める。調査原理と計測フローを図12、図13に示す。

#### 【計測原理】

計測対象物の表面に設置した発振・受信兼用のセンサを用いて、各センサ間の間で縦波を発振・受信する。縦波の到 達時間と各センサ間の距離から伝播速度を計算し、逆計算 と呼ばれる手法で各メッシュごとの速度を求める。

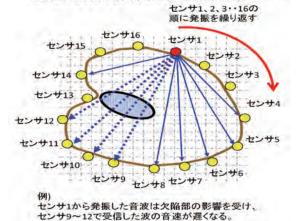


図12. 音波の伝搬速度測定原理

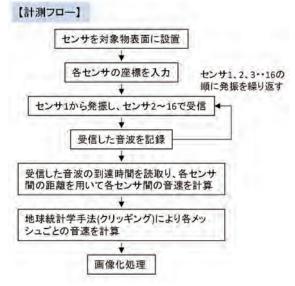


図13. 音波の伝搬速度測定原理

本調査で用いた測定システム(ドクターウッズ) の計測機器の写真を図14に示す。



図14. 音波の伝搬速度測定システム

音波の発信・受信兼用センサーは、図15に示したように、測定部分の周囲に、均等な間隔で、16個設置した。



図15. 音波の発信・受信兼用センサーの設置

音波の発信・受信兼用センサーの拡大写真を図 16に示す。センサーと石材との間に、粘土を挟み 込み、音波がスムーズに伝わるように工夫がなさ れている。

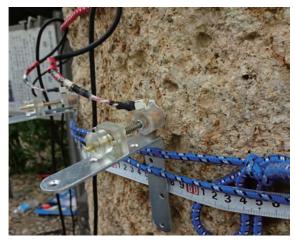


図16. 音波センサー設置部分の拡大写真

図11に示した、北側柱の地面より、130cm、190cm、250cmの高さの部分で測定結果を、以下の図17、図18、図19に示す。

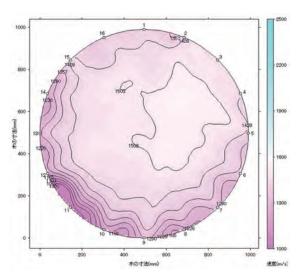


図17. 北側柱の地面より130cm高さの測定結果

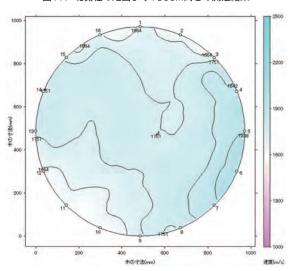


図18. 北側柱の地面より190cm高さの測定結果

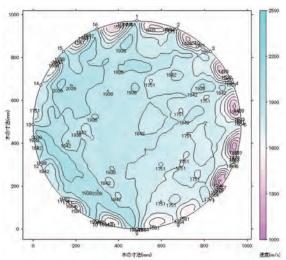


図19. 北側柱の地面より250cm高さの測定結果

図11に示した、南側柱の地面より、130cm、190cm、250cmの高さの部分で測定結果を、以下の図20、図21、図22に示す。

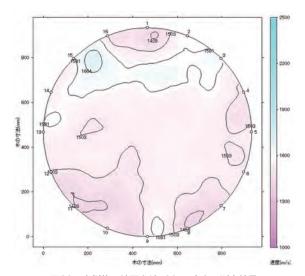


図20. 南側柱の地面より130cm高さの測定結果

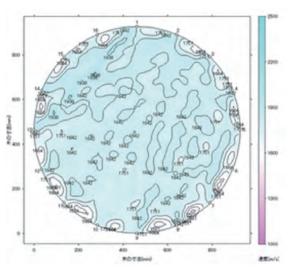


図21. 南側柱の地面より190cm高さの測定結果

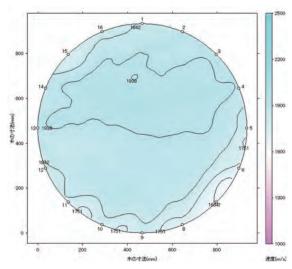


図22. 南側柱の地面より250cm高さの測定結果

これらの値と比較するため、劣化度の低い成沢 地区凝灰岩試料の音波伝搬速度を測定した。測定 の様子を図23に示す。

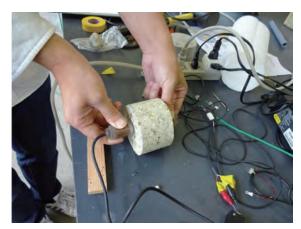


図23. 劣化度の低い成沢地区凝灰岩の音波伝搬速度の測定をして いる様子

この測定結果から、劣化度の低い成沢地区凝灰 岩試料の音波伝搬速度は、1,560m/sの値が得られた。

図17の北側柱の地面より、130cm高さの測定結果では、柱周囲では、1,000m/sの値を示すところが見られたが、柱内部では1,400~1,500m/sの値が見られ、内部は、劣化度の低い成沢地区凝灰岩の音波伝搬速度とほぼ同じ値が得られた。

図18の北側柱の地面より、190cm高さの測定結果では、柱内部では1,600~1,700m/sの値が見られた。

図19の北側柱の地面より、250cm高さの測定結果では、柱周囲では、1,300m/sの値を示すところが見られたが、柱内部では1,700~1,800m/sの値が見られた。

図20の南側柱の地面より、130cm高さの測定結果では、柱内部では1,400~1,500m/sの値が見られた。

図21の南側柱の地面より、190cm高さの測定結果では、柱内部では1,500~1,800m/sの値が見られた。

図22の南側柱の地面より、250cm高さの測定結果では、柱内部では1,600~1,900m/sの値が見られた。

これらの測定結果から、柱の周囲部分では、音 波伝搬速度が低く、強度が低下している部分が見 られるものの、柱内部では、劣化度の低い成沢地 区凝灰岩試料の値より大きな音波伝搬速度が見ら れ、強度が強い状態に維持されていると評価され る。

# 4. まとめ

2017年に、山形市より依頼を受け、重要文化財「鳥居」の劣化に関する総合調査を行った。調査の中で、石材の強度を把握するために、針貫入試験を行い、石材表面の強度を評価すると共に、音波トモグラフィーにより、石材内部の強度の評価を行った。

針貫入試験の結果から計算された一軸圧縮強度に関して、貫(B点)部分の表面の劣化度の大きい部分では、1.7MPa程度の低い部分があることが分かった。またその近傍では、25.4MPaの値が得られるなど、強度のばらつきが見られた。また、南側柱の表面強度は、4.7~25.4MPa、北側柱の表面強度は、4.7~19.2MPaと計算された。

音波トモグラフィーによる測定結果からは、柱 表面近くで、音波伝搬速度が低く、強度が低下し ている部分が見られるものの、柱内部では、劣化 度の低い成沢地区凝灰岩試料の値より大きな音波 伝搬速度が見られ、強度が強い状態に維持されて いると評価された。

なお、本研究は山形市からの受託業務、重要文化財「鳥居」詳細調査(第二次調査)により行ったものである。調査にあたっては、山形市社会教育青少年課の皆様にご協力をいただき実施することができましたことを、ここに記し感謝申し上げます。