

水城西門柱の基礎粘土の特性と役割に関する考察

佐賀大学理工学部 学 ○山田真一郎 低平地防災研究センター 正 林 重徳
佐賀大学大学院 学 秋田 賢一 低平地防災研究センター 正 日野 剛徳

1. はじめに

福岡県太宰府市と大野城市の市境に位置する特別史跡「水城」は、今から約 1330 年前にわずか 1 年という短期間で築造された我が国最大の土構造物の 1 つである¹⁾。最近の調査から、大野城の西門の門柱の基部には粘土が詰められ、その上に砂や粘土を混ぜた土を何層にも突き固める「版築工法」が施工されていることが確認された²⁾。この粘土層を設けた理由として、柱の先端部からの腐食防止、上部荷重の基礎への再配分、免震構造としての地震対策、等が考えられる³⁾。本研究では、門柱基部における粘土の地盤工学的役割を解明するために、物理・力学試験や地震応答プログラムを用いた解析を行った。

2. 門柱基礎粘土の発掘状況と土質試験の結果

九州歴史資料館の調査により水城の築堤当初の門柱の一部が出土した。図-1 に門柱跡の発掘状況を示す。門柱穴は柱の周囲約 4m 間隔で 2 つ検出されたことから、間口は約 4m と判明した。門柱穴は深さ約 2.0m で柱の周囲を版築で突き固められていた。1 つの穴には直径 50cm、高さ 30cm のスギの柱根が残っていた。このことから、当時すでに木杭等を水中に浸漬しておくことにより、極めて大きな耐久性を得ることを理解していたと推定される。また、2 本で門扉を支えていたこともわかった。門柱基礎粘土は深さ約 1.6m のところに 40cm ほどの高さに詰められていた⁴⁾。

次に門柱の発掘調査の際に採取された基礎粘土を用いて物理試験と圧密、及び三軸圧縮試験を実施した。その結果、この粘土は $\rho_s = 2.639 \text{ g/cm}^3$ 、 $w_L = 56.7\%$ 、 $w_P = 38.2\%$ 、 $I_P = 18.5$ の低塑性の火山灰質粘性土 (I 型) に分類された。また圧密降伏応力は、 $P_c = 10.0 \text{ kgf/cm}^2$ であった。

3. 西門の荷重推定と基礎部粘土の関係

まず門柱が支えていた荷重を推定する。木材の一般的性質として、木材の真比重は材種に関係なく 1.48 ~ 1.56 であるが、見掛け比重は細胞の状態、空隙の多少、含水量の多少、樹脂やそのほかの有機質の量によってかなり異なる。今回は、木材の真比重 (1.50)、気乾比重 (0.39) として、西門の各部材について荷重を推定した。門柱は縦の長さ 8m、横の長さ 5m、半径を 0.25m と仮定して計算を行い、門柱の高さを求めるに際し、敵の侵入を防ぐことはもちろん、人間が馬に乗っても楽に通ることができるよう考慮した上で 6m と定めた。その結果を表に示す。これより、門柱 1 本当たりにかかる重量は、最大で約 6.4tf、最小でも、約 2.7tf と推定され、柱の直径が約 50cm であるので、柱底面の応力は、約 $3.2 \text{ kgf/cm}^2 \sim 1.4 \text{ kgf/cm}^2$ 程度でしかない。従って、推定される門の荷重と、粘土の P_c を比較すると OCR (過圧密比) が 3 ~ 7 にも相当する。圧密降伏応力は先行荷重による応力履歴だけでなく、セメンテーションなどの時間的効果によって大きな値となるが、発掘された門柱の底端は、粘土中に浮いた状態にあり、施工当初から、門荷重より明らかに過圧密な硬質粘土を使用している。

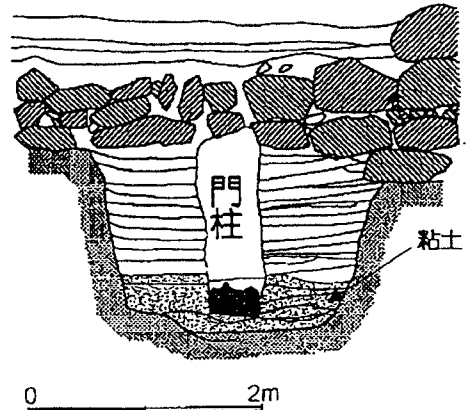


図-1 築堤当時の門柱穴跡図

表-1 西門の荷重の推定

	真比重 (1.50)	気乾比重 (0.39)
門柱の重量 (tf)	7.6	2.0
門扉の重量 (tf)	1.2	1.6
屋根の重量 (tf)	4.0	0.3
計 (tf)	12.8	5.3

4. 地震応答解析

解析には地震時の地盤—構造物の相互作用応答を解析するために開発されたプログラム、FLUSH を用いた。解析にあたっては、柱の基底部に粘土を入れた場合と入れない場合、さらに、現在の免震構造で使用されているゴムを入れた場合の 3 つのケースに分け、構造物モデルの加速度の時刻歴応答の比較を行った。解析モデルと用いたパラメータを図-2、表-2 に示す。モデルは 5 個の Beam 要素と 77 個の Solid 要素から成り立っており、地震波として Elcentoro-ns 波を基盤である地盤の最下層に入力した。西門はスギ材で立てられ、高さが 6m のラーメン構造とした。また地盤のメッシュの作成に関しては、過去のボーリング調査のデータを参考にして作成した。

5. 考察

門柱基底部における粘土の地盤工学的役割として、先に柱の先端部からの腐食防止を挙げたが、これは発掘状況でも既に述べたように実際にスギの柱根が残っていたことからその効果はあったと考えられる。次に、圧密試験結果より粘土の P_c が 10kgf/cm^2 と上部荷重よりはるかに大きいこと、及び柱底が粘土中に浮いた状態で発掘されていることから、当初から、過圧密な硬質粘土を意識して使用したものと考えられる。過圧密粘土は増加応力に対して、弾性的な挙動で、上部荷重の基礎への再配分を行っていたと考えられる。最後に免震構造としての地震対策としては図を参考にしてもらいたい。図-3、図-4 は、構造物の右端最上点の加速度の時刻歴応答を示す。これによるとゴムを入れた場合、最大 75gal の加速度の減少を示したが、粘土を入れた場合は最大で 15gal と若干の減少を示したにすぎなかった。それでも時間が経過するにつれ、両方とも加速度の振幅が小さくなっていくのがわかる。また地盤に着目すると構造物の真下、地下 2m の地点では粘土、ゴム共に加速度が大きくなっていることがわかった。これにより粘土やゴムが地盤中で加速度を吸収することにより、構造物の最上点での加速度を和らげているものと考えられる。

6. 結論

今回の研究で、門柱基礎粘土のもつ役割として、柱の腐食防止と共に、当初から、過圧密な硬質粘土を意識して投入しており、上部荷重の基礎への再配分を期待していたと考えられる。ただ地震応答解析については、今回粘土と比較するためにゴムを使用したのが、粘土の方はゴムに比べて加速度の減り方は小さかった。粘土を入れない場合と比べると、わずかではあるが免震効果があったと考えられる。

参考文献 (1)片岡真人, 林重徳: 特別史跡「水城」における土工量算定と濠への貯水能力に関する研究, 平成 8 年度土木学会西部支部講演概要集, pp548-549. (2)九州歴史資料館: 太宰府史跡, 平成 8 年度発掘調査概報, 1997. (3)土木学会西部支部: 九州土木紀行, 九州・沖縄の土木施設を訪ねて, pp80-81

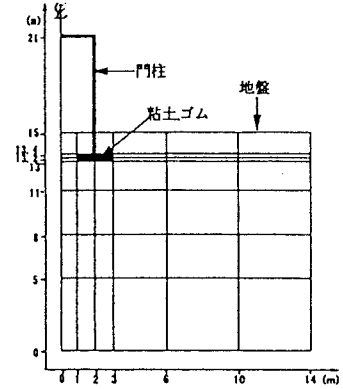


図-2 解析モデル

表-2 解析モデルの諸元

層	MAT TYPE	密度 (t/m^3)	せん断弾性係数 (t/m^2)	減衰定数
1	砂	1.800	4960.1	0.195
2	砂	1.800	4960.1	0.195
3	砂	1.800	4960.1	0.195
4	砂	1.800	5703.1	0.195
5	砂	1.800	5325.1	0.195
6	粘土	1.650	4824.8	0.147
7	砂礫	1.900	7752.8	0.195
	ゴム	1.100	60.0	0.170
	門柱基礎粘土	1.650	620.0	0.147
	木材	1.500	32000.0	0.050

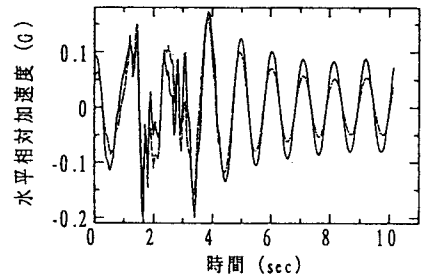


図-3 加速度の時刻歴応答(ゴム)

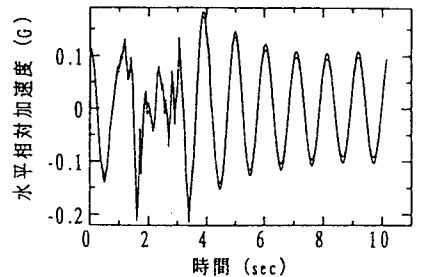


図-4 加速度の時刻歴応答(粘土)