

3. 高松城天守台周辺の地盤特性

Geoengineering Characteristics around Takamatsu Castle Main Tower

山中 稔, 長谷川修一 (香川大学工学部), 石川照久 (香川大学大学院),
斎藤章彦 (株)四国総合研究所, 大嶋和則 (高松市教育委員会)

1. はじめに

高松市は瀬戸内海に面した日本三大海城の一つである高松城(玉藻城)を中心とした港湾都市であり、市の中心部は香東川による三角州扇状地に立地し、都心地域は沿岸部の三角州上にある干拓地、埋立地に広がっている。このため、高松市の中心都市部は、地震動の増幅や地震による地盤の液状化などの災害を受けやすい場所に立地している。

高松城は、天正 16 年(西暦 1588 年)に生駒親正により築造された、北方を海に面し南方を大手とした典型的な水際城である。この高松城の地は野原と呼ばれ、当時の香東川の河口部(三角州)の砂浜上に築城されている¹⁾。高松城の位置する三角州地盤は、一般的には液状化しやすいが、高さ 13m の高松城天守台がこれまでの地震により崩壊したとの記録はない。

本論文では、高松城が位置する地盤の液状化危険度の評価結果を述べ、天守台盛土による液状化危険度の低減効果について検討を行った。

2. 高松城の現状と地震災害史

写真-1 に、高松城天守台石垣を示す。天守閣は老朽化により 1884 年に取り壊され、石垣は現在、解体・復旧工事が進められている。

表-1 に、高松城築城以降の地震災害を一覧する。これらのうち、被害の大きかった地震災害は、宝永地震、安政南海地震、昭和南海地震の計 3 回である。特に宝永 4 年に発生した宝永地震では、五剣山の一部が崩壊したとの伝承がある。この宝永地震によって高松城内では、天守櫓の屋根瓦が落ち壁の損傷、城内石垣が所々崩壊、城内の家屋崩壊 19 軒等の被害があったと、幕府に報告されている²⁾。

表-1 高松城に関連する災害史(参考文献 3)より抜粋)

元号歴	西暦	高松城関連	地震災害	規模	被害の概要(香川県内)
天正 16 慶長 9	1588 1605	高松城築城開始	慶長地震	M7.9	
寛永 8 頃	1631 頃	(香東川を西の流れに一本化)			
正保元 寛文 2	1644 1662	高松城修築着手	(高松大地震)		
寛文 10	1670	天守閣の修築完了			
宝永 4	1707		宝永地震	M8.6	死者 28 人, 倒壊家屋 929 戸, 丸亀城破損, 五剣山崩壊
安政元	1854		安政南海地震	M8.4	死者 5 人, 倒壊家屋 2961 戸, 土蔵被害 157 戸, 塩浜石垣崩れ 3769 間
明治 17	1884	天守閣、老朽化のため取り壊す			
昭和 21	1946		昭和南海地震	M8.0	死者 52 人, 全壊家屋棟数 414 棟



写真-1 高松城天守台
(2007年9月19日撮影)

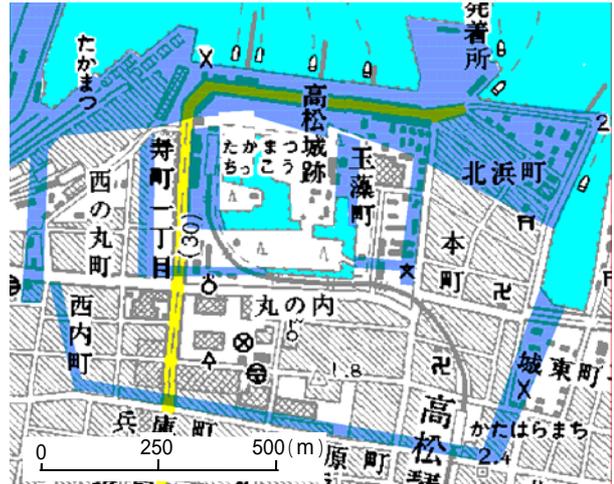


図-1 高松城周辺の当時の海岸線

3. 高松平野の地形地質概要

高松平野は、基盤岩の花崗岩類上に、最大 200m を超える厚さの三豊層群が分布し、その上部を段丘堆積物および沖積層が被覆している。高松平野の地質は、地形と密接に関係し、表層から 2~3m の地盤は、香東川の扇状地では砂礫がち堆積物、春日川・新川などによる氾濫平野では泥がち堆積物、河口部の三角州では砂がち堆積物となっている⁴⁾。

図-1 に、高松城周辺の地形図を示す。海際城として知られる高松城であるが、当時の海岸線や内堀・外堀のほとんどが現在は埋め立てられていることが分かる。

図-2 に、高松平野の南北断面(中央通り~空港線沿い)の地質想定断面図を示す。北から南に三角州帯から扇状地帯に位置しており、高松城が位置する海側には沖積層の分布が見られ上部は礫質土が被覆している。

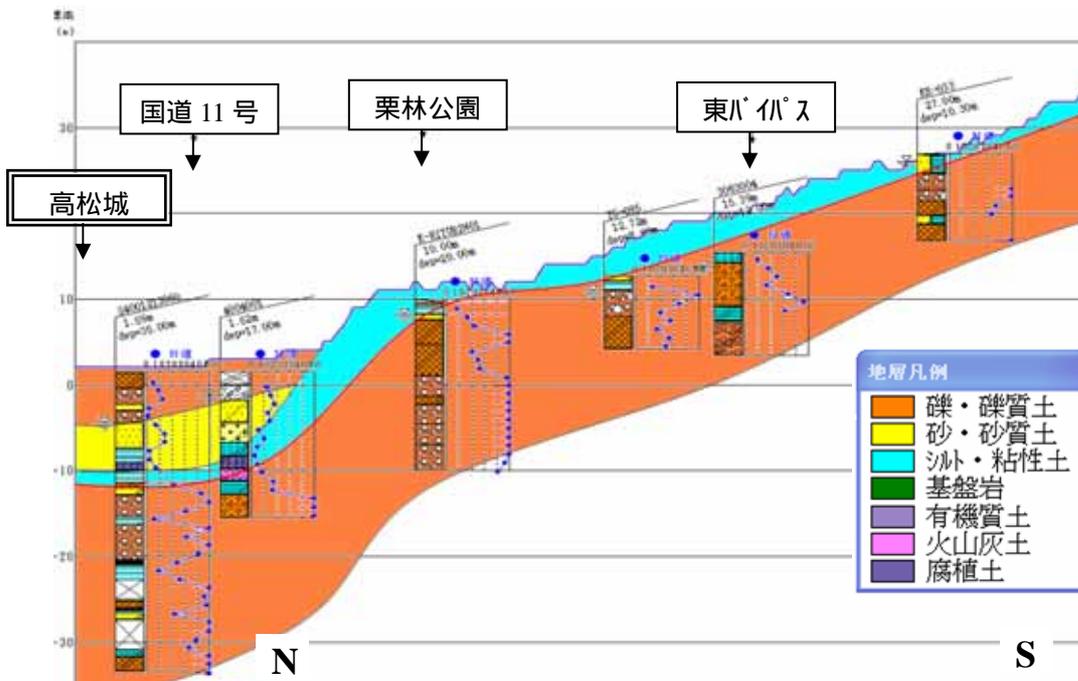


図-2 高松平野の南北断面図(中央通り~空港線沿い)(参考文献4)に加筆)

4. 高松城周辺地盤の液状化判定

4.1 液状化判定手法

本研究では、「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編（平成 8 年 12 月）」に準じて液状化判定を実施した。

(1) 液状化の判定が必要な土層

沖積土層， 飽和砂質土層， 対象深度：GL±0～-20m， 平均粒径 D_{50} 10mm，
粒径： D_{10} 1 mm， 地下水位 GL-10m，
細粒分含有率 F_c 35%の土層，または $35\% < F_c$ でも塑性指数 I_p 15 の土層

(2) 地震動タイプ

地震動タイプは、南海地震を対象とするのでタイプ 地震動（発生頻度が低いプレート境界に生じる大規模な地震動）とした。

(3) 地盤種別

解析対象地盤は、種地盤（埋立地，三角州，自然堤防，旧河道，砂堆・河口州）とした。

(4) 標準設計水平震度

用いる標準設計水平震度は、タイプ 地震動かつ第 種地盤の条件から、0.40 を採用した。

(5) 地域別補正係数

高松市の地域区分は B であり、地域区分 B の補正係数 $C_z = 0.85$ を用いた。

(6) 物性値

液状化判定では柱状図に記載された土質に対して、平均的な土質定数⁵⁾を適用した。

(7) 液状化危険度

PL 値は、液状化抵抗率 (FL) を地盤深さに対して積分した液状化ポテンシャル (PL 値) であり、液状化検討対象層厚 20m の F 値の積分値である。PL 値の計算には、G-Cube の液状化判定プログラム⁵⁾を用いた。

$$P_L = \int_0^{20} F * (10 - 0.5z) dz$$

$$F_L < 1 \Rightarrow F = 1 - F_L, \quad F_L \geq 1 \Rightarrow F = 0$$

求めた PL 値は、表- 2 の判定表を用いて液状化危険度の判定を行った。

表- 2 液状化危険度判定表⁶⁾

PL値	ランク	液状化の判定
$15 < PL$	A	液状化危険度は、極めて高い。液状化に関する詳細な調査と液状化対策は不可避である。
$5 < PL \leq 15$	B	液状化危険度が高い。重要な構造物に対して、より詳細な調査が必要。液状化対策が一般的に必要。
$0 < PL \leq 5$	C	液状化危険度は低い。特に重要な構造物の設計に際しては、より詳細な調査が必要。
$PL = 0$	D	液状化危険度はかなり低い。液状化に関する詳細な調査は一般に不要。

4.2 高松城周辺地盤の液状化危険度評価値（PL 値）

図-3 に、玉藻公園内で実施された既往ボーリング調査報告書^{7),8)}による、天守台および周辺地盤における標準貫入試験結果を示す。天守台周囲の地盤は、上位から、沖積礫質土、沖積砂質土、沖積粘性土、そして洪積礫質土が堆積している。沖積層厚は川村（2000）によると約 10m であり、沖積礫質土および沖積砂質土ともに N 値は低いことが分かる。天守台からの柱状図からは、天守台盛土の N 値は概ね 10～20 であり、旧地盤線より下位の沖積礫質土および沖積砂質土の N 値は、天守台周囲の N 値と比較して大きい。この N 値が大きい理由として、上載荷重による拘束圧増加と圧密による効果もあるが、それ以上に、当時の築造場所の判断として、微地形を利用し少し高まりのある、すなわち礫分の多い（N 値の高い）場所を選択したのではないかとの推測ができる。

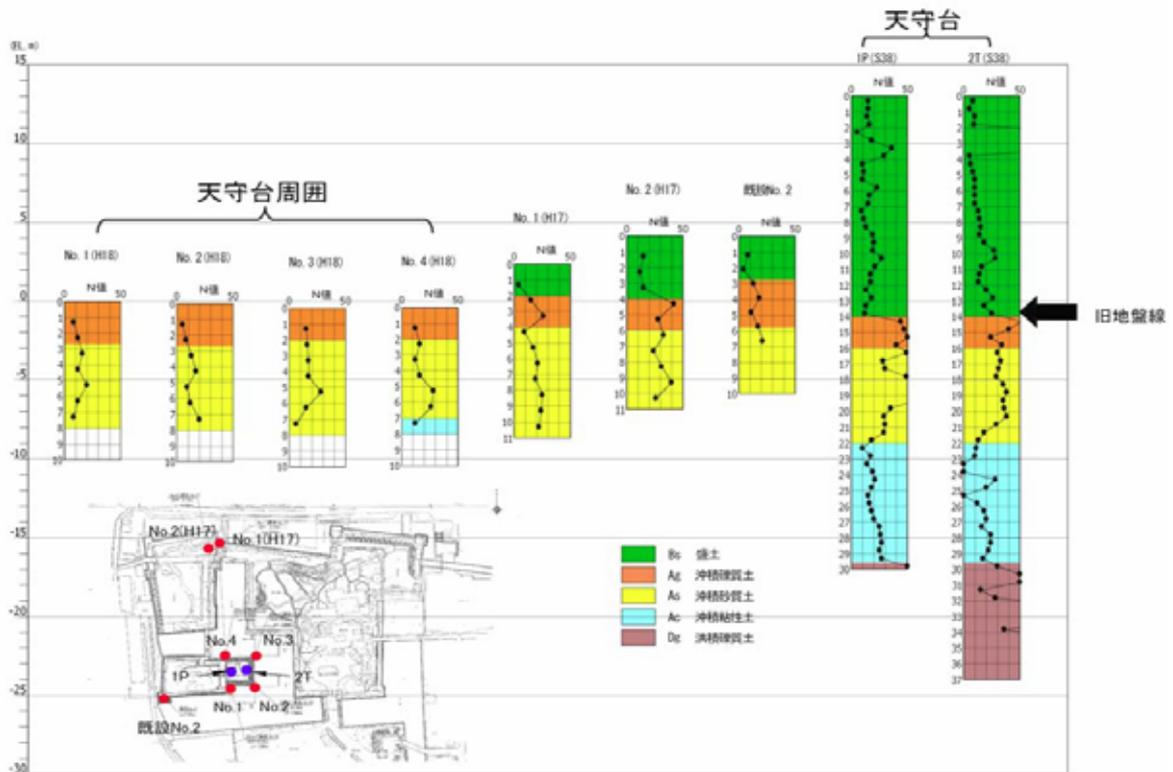


図-3 高松城周辺（玉藻公園内）の地質柱状



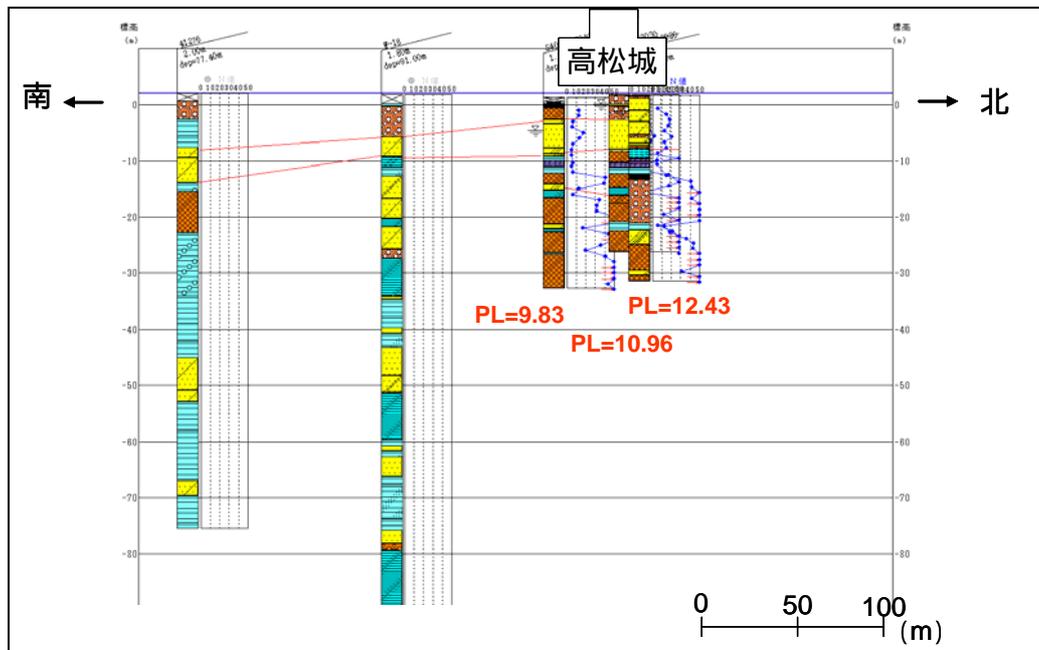
(a) 南北方向

(b) 東西方向

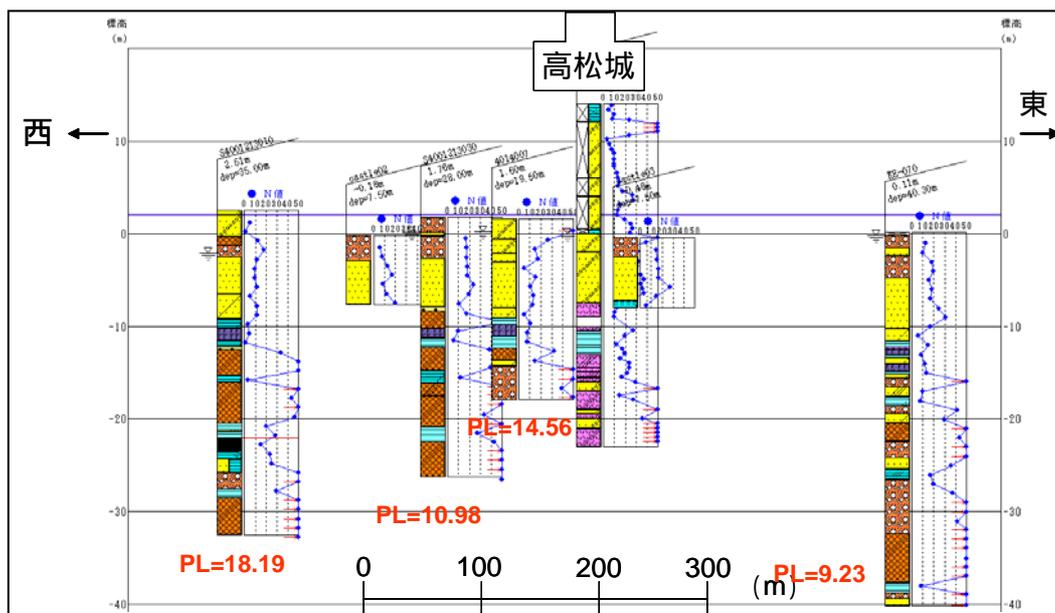
図-4 液状化判定を実施した断面

四国地盤情報活用協議会が取りまとめているボーリングデータ¹⁰⁾を用いて、高松城天守台近傍の地盤の液状化判定を実施した。

図-4に、液状化判定を実施した断面線（南北方向と東西方向）をそれぞれ示す。図-5(a), (b)は、図-4に示した各断面線におけるボーリングデータにより求めた液状化危険度評価値 PL 値を併記している。高松城周辺地盤の PL 値は概ね 10~15 であり、液状化危険度ランクは B（液状化危険度は高い）と判定される。



(a) 南北方向



(b) 東西方向

図-5 液状化危険度評価値 (PL 値)

4.3 天守台盛土による液状化危険度低減効果

天守台直下は、天守台盛土が上載荷重となり、液状化危険度が低下すると考えられる。そこで、条件 1；天守台盛土があり（地盤物性は変更なし）条件 2；盛土なし（地盤物性は変更なし）条件 3；盛土なし（ N 値を 75%に、土の湿潤密度 ρ_t を 90%に低減）の 3 条件での液状化危険度判定を行った。

図-6 に、FL 値の深さ方向分布を示す。どの深さとも条件 1 が FL 値は最も高いことが分かる。

表-3 に、3 条件での液状化危険度判定結果を示す。条件 1 の PL 値が最も低く、危険度ランクは C（液状化危険度は低い）である。すなわち、天守台盛土荷重により、天守台直下地盤は周辺地盤よりも、液状化危険度が低下していることが確認できた。

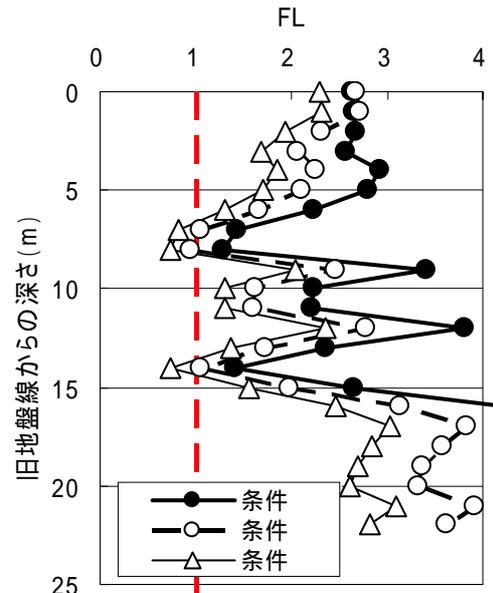


図-6 FL 値の深さ方向分布

表-3 3 条件での液状化危険度判定結果

条件	地盤物性	PL 値	液状化危険度判定
盛土あり	変更なし	1.3	C 液状化危険度は低い
盛土なし	変更なし	4.4	C 液状化危険度は低い
盛土なし	N 値と ρ_t を低減	7.7	B 液状化危険度は高い

5. まとめ

高松城天守台は、現在、石垣のずれやはらみによる崩壊を防ぐために、石垣の解体・修復工事が進められている。本論文では、これまでの南海地震の地震動に対して、なぜ高松城天守台が耐えてきたかを、地盤の液状化判定から検討した。今後は、石垣および内部盛土の構造的側面からも、地震時の天守台石垣の安定性を評価したいと考えている。

参考文献：

- 1) 香川県歴史博物館：海に開かれた都市，平成 19 年度特別展「海に開かれた都市～高松 - 港湾都市 900 年のあゆみ～」図録，2007.
- 2) 木原溥幸：地域にみる讃岐の近世，美巧社，2003.5.14.
- 3) 高松市歴史資料館：第 34 回特別展「高松城と栗林園」冊子，2003.10.
- 4) 長谷川修一，山中 稔，太田 均，斎藤章彦：高松平野の地盤と液状化特性，香川の地盤，地盤工学会四国支部・香川県地盤工学研究会，pp.180-201, 2007.3.
- 5) 中央開発（株）：G-Cube for Windows 標準マニュアル.
- 6) 建設省土木研究所：地震時における砂質地盤の液状化判定方法と耐震設計への適用に関する研究，土木研究所資料第 1729 号，1981.
- 7) 高松市都市開発部公園緑地課，（株）空間文化開発機構：史跡高松城天守台石垣解体工事実施設計業務委託，地耐力調査報告書，平成 18 年 12 月.
- 8)（株）日建土木工務所：玉藻城天守閣敷地土質調査報告書，昭和 39 年 1 月
- 9) 川村教一：香川県高松平野における沖積層の層序と堆積環境，第四紀研究，Vol.39, No.6, pp.489-504, 2000.
- 10) 四国地盤情報活用協議会：四国地盤情報データベース，平成 19 年度版，CD-ROM.