

高知城の城郭石垣の地震時安定性評価に関する研究

(株)技研製作所 正会員 ○弘瀬寛

高知高専 正会員 岡林宏二郎

1. はじめに

本研究の目的は、多大なる被害を与え続けている南海地震に対して、高知城跡三の丸石垣の安定性について検討することである。高知城三の丸石垣は、現在石垣修復のための解体及び修復工事が行われているが、安政の南海地震では城の北側の石垣が崩れたと聞いている。この石垣は、その高さや形状から見ても第一級の文化財であり、伝統技術によって修復することが必要なのはもちろんであるが、それと同時に工学的な面からの安定性についての評価も重要である¹⁾。本研究では、基礎部の安定性評価として高知城周辺を、MDMモデルを用いた詳細判定法で液状化判定を行い、その後 FLUSH による二次元動的 FEM 解析により高知城の城壁石垣の地震時安定性について検討した。

2. MDMモデルを用いた詳細法による液状化判定

本研究では、四国地盤情報 DB(CD-ROM)²⁾を用いて地層構造メッシュを作成し地層毎の非線形モデルをパラメータとし、せん断剛性とひずみ依存性を取り入れた MDM(Momentary Deformation Modulus)モデルを用いて解析を行った。基盤層における加速度波形は、東南海・南海地震公開データ(CD-ROM 版 平成 16 年 10 月内閣府)のうち南海・高知県データの高知城周辺の波形を入力した。図-1 に高知城周辺の加速度波形を示す。最大加速度は 352gal である。地盤地震応答解析では逐次非線形解析を行い、この結果を用いて液状化判定を行った。

2. 1 液状化判定法

地震波の増幅や減衰を考慮し精度の高い、MDMモデルを用いた液状化判定による地震応答解析から液状化の詳細判定を行った。地層毎の液状化は、液状化に対する抵抗値 F_L を式(1)より算出し、 F_L が 1.0 を下回る土層は液状化するとみなし、また平面的な液状化は P_L 値により判定した。

$$F_L = R/L \quad \dots(1)$$

この解析では N 値 50 以上の工学的基盤を最下層とし、それ以深は半無限基盤であると考えエネルギーの逸散を考慮した。図-2 に高知城周辺 G845 地点の地層構成と液状化判定結果を示す。なお、 P_L 値は 5 であった。

2. 2 MDM による液状化判定結果

高知城周辺 5 地点の液状化判定結果を図-3 に示す。図-3 より、高知城の西側では危険度が低いが、東側では液状化の危険度が高く、東側の南北方向でも液状化の危険度が極めて高いことが分かった。

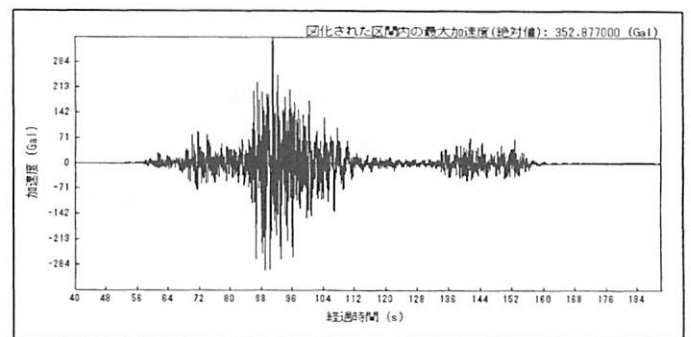


図-1 高知城周辺の加速度時刻歴波形

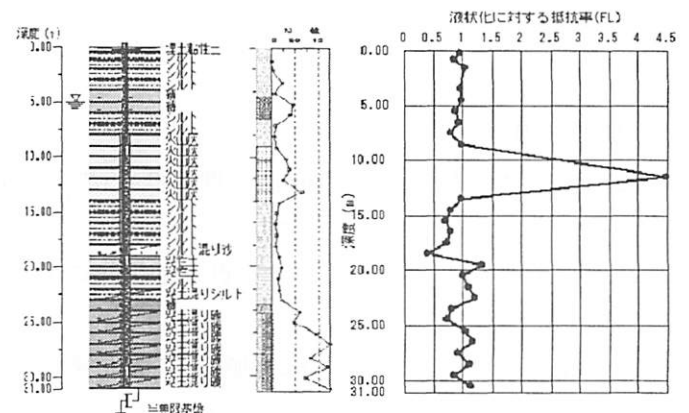


図-2 液状化判定結果

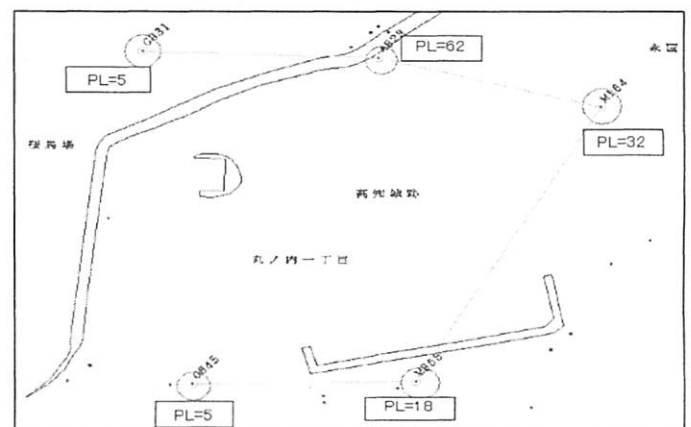
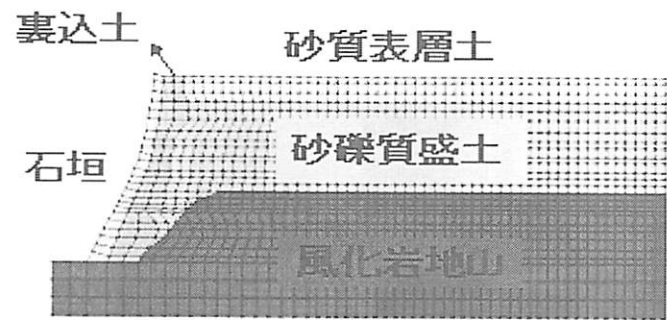


図-3 液状化判定結果平面図

3. FLUSH を用いた全応力解析法

全応力法による二次元動的 FEM 解析には、地盤－構造物連成系モデルの相互作用解析プログラムの「SuperFLUSH/2D for Windows」を用いた。このプログラムは地盤と構造物の動的相互作用解析における様々な問題点に対し有効性を持つ。解析モデルとした高知城城壁の断面と材料区分を図－4 に、材料定数を表－1 に、有限要素分割図を図－5 に示す。モデルの左側面は 3m，右側面は 20m のエネルギー伝達境界とし、底面は粘性境界とした。入力地震波は液状化判定で用いたデータと同一のものを使用した。



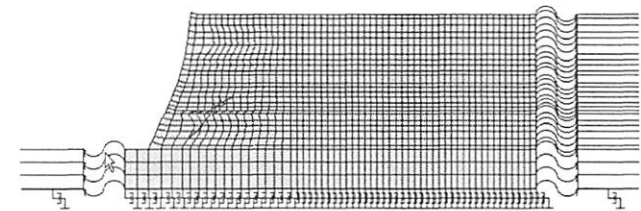
図－4 高知城城壁の断面(材料別表示)

表－1 材料定数一覧表

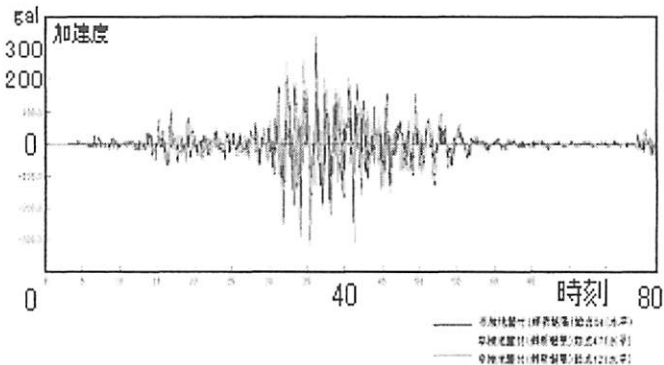
材料名	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)	せん断弾性係 数(kN/m ²)	減衰定数(%)
石垣	0.4	25	300000	2.5
裏込土	0.45	20	100000	3
砂質表層土	0.47	16.7	40000	4
砂礫質盛土	0.48	15.8	20000	4.2
風化岩地山	0.42	17	180000	3

4. 全応力解析法による解析結果及び考察

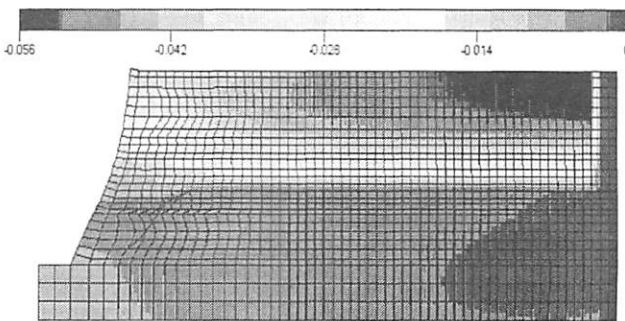
図－6 に石垣の上部、中部、下部における加速度波形を示す。石垣上側の波形が少し大きいですが、最大値で約 350gal 程度と入力波と比較してあまり増幅していないことが分かった。図－7 は解析結果の最大水平変位分布図を示す。相対変位を断面的に表し変形量を色別に表示してある。本研究の対象となった石垣は水平変位分布図左端の湾曲した部分全てであり、最大変位分布図から、石垣の上から深さ 4.0m までの範囲で、約 4.0 cm の相対変位が見られ、下部にいく程変位が小さくなった。また、鉛直応力、せん断応力分布から、石垣中央の変曲点周辺や底部の法尻付近で値が大きくなることが明らかとなった。石垣上部では土圧が低く作用力も小さいが、拘束圧が低く石垣間の摩擦力も小さいため抵抗力も小さくなることから、変位が大きくなると考えられる。本解析では、石垣に作用する地震力に着目したが、石垣の崩落を検討するには個別要素法などにより詳細な検討が必要であると考えられる。



図－5 有限要素分割図



図－6 石垣上部、中部、下部における加速度波形



図－7 水平変位分布図

5. 参考文献

1)西田一彦：高知城三の丸石垣 F 面の安定性の検討報告書、2006。
2)四国地盤情報活用協議会：四国地盤情報データベース、CD-ROM 版、2004.10。