

和歌山県指定史跡水軒堤防の工学的機能性に関する研究

Engineering Performances of Suiken Dike Certified as a Heritage Site by Wakayama Prefecture

水谷夏樹¹・佐々木宏治²・金岡正信¹・松尾菜央³・玉野富雄⁴

Natsuki MIZUTANI, Kouji SASAKI, Masanobu KANAOKA, Nao MATSUO and Tomio TAMANO

This paper describes the engineering performances of Suiken Dike certified as a heritage site by Wakayama Prefecture. The dike was constructed by using excellent construction techniques in Edo period. Especially, the main part of the dike is covered with many rectangular solid stones like a stone wall of a Japanese castle. The soil part is attached with the stone part. However, a functional role of this composite structure is unknown. We carried out the FEM analyses to study interactive effects between these two parts against wave forces as a coastal dike. A Tsunami wave force and a violent wave force due to a typhoon were used as an external force. It was clarified that the soil part effectively functioned to restrain the stone part rotating to the back side.

1. 緒言

和歌山市西浜に位置する水軒堤防は、南北に約1.7kmの防潮堤防である。昭和34年4月23日に県指定文化財(史跡)として指定されたが、堤防全体が砂に覆われ地元以外には人々の記憶から長い間忘れ去られてきた。

平成17年の交差点改良工事に伴い堤防が再び出土し、この水軒堤防が国内でも最大級であり、有数の土木技術を駆使して築造された江戸時代の石堤であることが再発見された。これを受けて、和歌山県教育委員会では県指定史跡水軒堤防の全容解明調査が3カ年に渡って行われ、県指定史跡水軒堤防確認調査報告書(黒石ら, 2009)にまとめられた。

この報告書では、水軒堤防の地理的特性や歴史的背景、堤防の構成材料及構造などについて調査報告が行われたが、防潮堤防という海岸建造物に対し、波浪などに対する工学的機能性については検討されていない。また、この堤防は城の石垣を造るほどの精緻な石積み技術が駆使されているが、石堤の背後に土堤を組み合わせた構造でもあり、その力学的特性についてはよく分かっていないのが現状である。

そこで本研究では、この県指定史跡水軒堤防の工学的機能性について検討するため、過去に生じた歴史的な津波(安政および昭和南海地震津波)と第二室戸台風による暴浪に対して波力を求め、堤体の有限要素弾性解析を行って堤体の変形量と変形挙動について数値解析的な検討

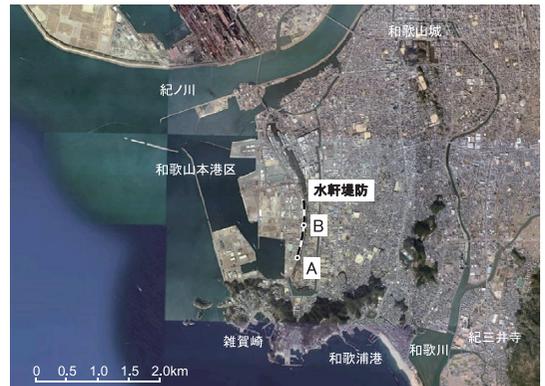


図-1 水軒堤防の位置 (Google Earthより)

を行う。

2. 水軒堤防の概要

(1) 地理的背景

水軒堤防は、図-1に示すように紀ノ川の河口南側に位置する南北に約1.7kmの石積みの堤防である。現在は、水軒堤防の西側前面は埋め立てられ、和歌山下津港和歌山本港区となっているが、埋め立て以前は水軒海水浴場として県民に親しまれてきた海岸である。

埋め立て以前の測量図を見ると、1/100勾配程度の緩勾配海岸であり、水軒堤防は紀ノ川から流出した土砂が堆積してできた海浜砂丘状地形の上に築造されたものである。

(2) 歴史的背景

堤防の築造時期については、発掘調査で18世紀後半に製造されたとされる出土遺物が多数見つかったことから、18世紀後半頃と考えられる。また、築造の目的は、一義的には堤防背面に展開されている農地の保全であると言えるが、誰の命によって築造されたかなどを含め築

| | | | |
|---|-----|------|----------------------------|
| 1 | 正会員 | 博(工) | 大阪産業大学 准教授 工学部都市創造工学科 |
| 2 | | | 和歌山県生涯学習局文化遺産課 主査 |
| 3 | | | 大阪産業大学大学院工学研究科 都市創造工学専攻 |
| 4 | 正会員 | 工博 | 大阪産業大学 教授 工学部都市創造工学科 |



図-2 水軒堤防南端部の全景 (海側から)



図-5 堤防背面の石積の様子



図-3 中央部堤防前面の石積と背後の土堤の様子



図-6 堤防法先の根固めの様子



図-4 堤防の断面の様子 (前面 (右側) が約40度、背面 (左側) が約53度の傾斜を持つ)

造のプロセスの詳細は今後の課題として残されている。

(3) 堤防の構造

図-2に水軒堤防南端部 (図-1のA点) の全景を示す。江戸期における外海に面した海岸堤防としては全国的にも他に例を見ない精緻で大規模な海岸堤防の構造である。また、図-3に中央部 (図-1のB点) の堤防断面を示す。

中央部石堤は、高さが約4m、天端幅が約3.8mである。海側の石積勾配は約40度で直方体形状に切石加工した和泉砂岩を布積みしている (図-4)。それに対し、陸側の石積みは約53度と急勾配で緑泥片岩と粗加工した和泉砂岩を交互に積んでいる (図-5)。さらに、この海岸堤防の最大の特徴として、この石堤の陸側背後に幅約14m以上で石堤の天端高よりも約1m高く山形に盛られた土堤が付

設されている。

石堤海側法面に貼られた石の表面形状は長辺で40～50cm、短辺で30～40cmであり、奥行き長さは70cm程度である。特に、のり稜線にほぼ直角に据え付けられており力学的に強固な構造となっている。石積み全体としてみれば、近世城郭石垣における切り込みはぎ・布積みの型式である。

堤防の法先は、ほぼT.P.±0mの高さであり、図-6に示すように、これより前面では杭によって基礎が固定され、石が敷き詰められた根固めが施工されている。また、全てを発掘できていないが、この杭と石による根固めは沖へ向かって3段程度続いており、前面の洗堀防止に対してもかなり配慮された施工となっている。

3. 南海地震津波のシミュレーション

(1) 計算手法の概要

堤体の有限要素解析のための作用波力を求める。ここではこの地を襲った昭和南海地震津波 (1946) と安政南海地震津波 (1854) に対して津波シミュレーションを行うが、観測記録が豊富な昭和南海地震津波に対して計算精度の検証を行い、より規模の大きい安政南海地震津波の際の水軒堤防に作用する最大波高を求め、作用波力を算出する。

計算手法はGotoら (1997) に準じており、一般的に用

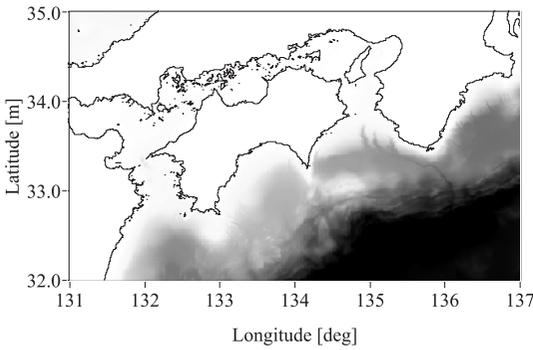


図-7 計算領域

いられる非線形長波方程式を用い差分化した。陸側境界は全反射とし、遡上は考慮しておらず、沖側境界は放射境界、海底面の摩擦はマンングの粗度係数に基づくモデルを用いた。

図-7に示すように、計算領域を東経131度～137度、北緯32度～35度の範囲とし、日本海洋データセンターから水深データを入手して、東西、南北ともに格子幅を1000m、格子数557×334に設定した。

津波の初期波形は、相田（1981）の断層パラメータを用いてManshinha and Smylie（1971）の方法によって作成した。断層変形に伴う加速度は本研究では考慮していない。

(2) 昭和南海地震津波の計算結果

相田（1981）に倣い、計算結果と観測結果の比較を行った。図-8に細島（宮崎）の結果を、図-9に堺（大阪）の結果を示す。

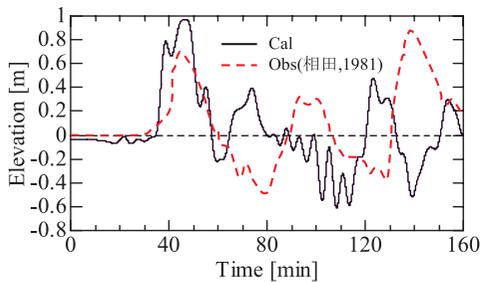


図-8 細島（宮崎）における計算結果と観測結果の比較

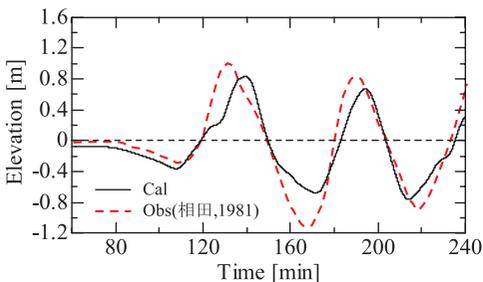


図-9 堺（大阪）における計算結果と観測結果の比較

細島の結果は、第二波目と第三波目の位相が、観測データに比べ計算結果の方が20分程度先行しているものの、第一波から第三波までの波高を概ね再現していると思われる。また堺の結果は、第一波目の前の引き波から位相、波高ともにはば再現できており良好な結果といえる。

計算結果における水軒堤防沖の最大波高は、 $H_{\max}=1.17\text{m}$ であった。この値は水深 $h=7\text{m}$ での波高であることから、推定来襲津波波高はグリーンの法則（岩垣・榎木、1979）を用いて、 $H_t=H_{\max}\cdot h^{1/4}=1.90\text{m}$ となる。羽鳥（1980）によれば、水軒堤防付近の浸水高は、和歌浦から紀三井寺間で2m程度であったとされていることから、本研究の計算結果は妥当なものとして推定できる。

(3) 安政南海地震津波の計算結果

安政南海地震津波の初期波形を相田（1981）の断層パラメータを用いて作成し、シミュレーションを行った。その結果、水軒堤防の沖での最大波高は $H_{\max}=1.73\text{m}$ であり、推定来襲津波波高は、 $H_t=2.81\text{m}$ となった。羽鳥（1980）によれば安政南海地震時には、紀三井寺で3m程度の浸水高が記録されており、本研究の計算結果の妥当性が裏付けられている。

(4) 堤体への作用波力の算出

シミュレーションで求められた波高に対し、谷本ら（1984）に従って津波が直立壁に作用する場合の波力分布を求め、堤体の有限要素解析に用いた。現代の設計基準においては水軒堤防のような斜め壁を持つ海岸堤防に対する波力の算定基準が著者らの知る限り存在しない。そこで本研究では鉛直壁に対する波力分布をそのまま斜め壁にも適用した。

4. 第二室戸台風時の暴浪について

1961年9月16日の第二室戸台風は和歌山県にも大きな被害を及ぼし、図-10のように水軒堤防も一部に被災している。本研究では津波による波力に加えて、この第二



図-10 第二室戸台風によって被災した水軒堤防（堤防の天端上に船が打ち上げられている）

室戸台風時における暴浪に対しても同様の検討を行う。

まず台風来襲時における最高潮位を調べたところ、和歌山港での観測記録により、T.P.+2.51mであったことが分かった。次に波高と周期および波向きについては、観測記録は存在しないものの水軒堤防の前面に造られた木材港の外防波堤を設計する際、第二室戸台風を想定して波浪推算が行われており、その推算値が、 $H_{1/3}=7.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}=10.5\text{s}$ 、波向きSWであった。本研究ではこの値を沖波の値として採用し、浅水変形等を考慮して堤体に作用する波高を求めた。

その結果、最高潮位時の作用波高は $H=2.1\text{m}$ となり、この結果に基づいて津波波高と同様に、谷本ら(1976)に基づいて、合田式による直立壁に作用する波力を算出した。

5. 堤体の有限要素法解析

(1) 有限要素弾性解析の概要

有限要素解析は、市販ソフトのLusasを用い、最大波力によって平衡状態に達した場合の弾性変形解析を行った。

解析モデルは断面2次元解析とし、堤体内部と堤体下の基礎地盤の条件は現地ボーリングデータのN値より決定した(玉野ら, 2004)。なお、堤体載荷のない周辺地盤のN値についてもほぼ同じ値であり、当時のN値も同様であったと推定される。また、堤体に用いられる石材の材料定数は、実際の石材と同様の砂岩のデータを使用した。表-1に入力した材料定数の一覧を、図-11に解析モデルを示す。

水軒堤防は、高さが約4mで天端幅が約3.8mの精緻な石積みの堤防であると同時に背後に土堤が組み合わされている。本解析ではこの土堤の役割を解明するため、石堤のみの場合と石堤+土堤の場合の二通りの解析を行った。なお、石材と石材の間および石材と内部の土との間

表-1 材料定数

| 材 料 | 石材 | 砂地盤 (N=20) | 土堤 (N=10) |
|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 要素特性 | 弾性 | 弾性 | 弾性 |
| 弾性係数 E (kN/m ²) | 2.0×10^7 | 1.3×10^4 | 9.0×10^3 |
| ポアソン比 | 0.15 | 0.3 | 0.3 |
| 単位体積重量 (kN/m ³) | 26 | 18 | 17 |

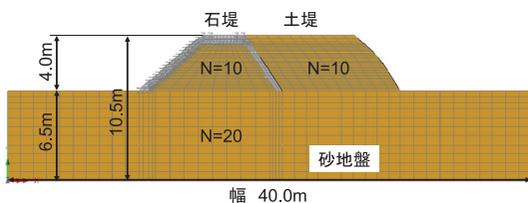


図-11 解析モデル (土堤ありの場合)

にはjoint要素を設けて石材が移動できるよう設定した(玉野ら, 2004)。

(2) 安政南海地震津波による解析結果

図-12に土堤なしの場合の水平方向の変位量分布を示し、図-13に土堤ありの場合について示す。また、同様に鉛直方向の変位量分布について土堤なしの場合を図-14に、土堤ありの場合を図-15にそれぞれ示す。

水平方向の変位量を見ると、土堤の有無に関わらず天端上で最大変位を取る。土堤なしの場合、最大変位は約6.4cm、土堤ありの場合で約5.5cmとなり、最大水平変位量で見れば土堤の付設によって14%程度の低減が見られる。水平変位量の分布は天端から下へ行くほど変位量は

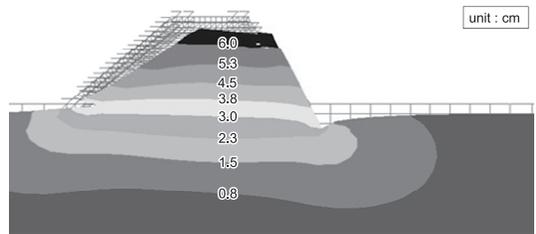


図-12 水平方向の変位量分布 (土堤なしの場合)

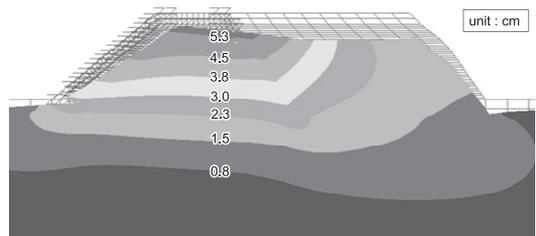


図-13 水平方向の変位量分布 (土堤ありの場合)

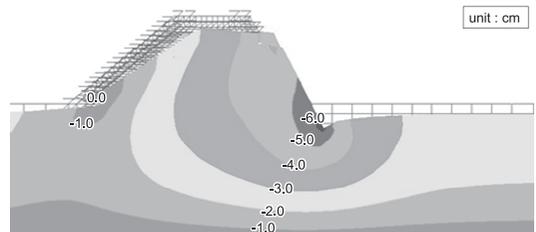


図-14 鉛直方向の変位量分布 (土堤なしの場合)

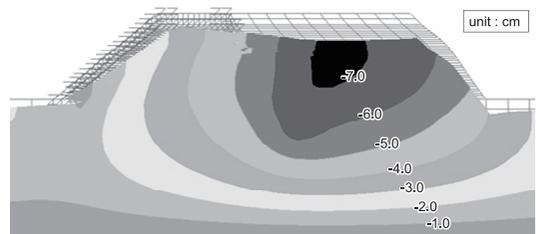


図-15 鉛直方向の変位量分布 (土堤ありの場合)

小さくなるが、どちらの場合も法先の高さで3cm程度の変位量を示している。

土堤の機能について見れば、図-13から、石堤と土堤の接合部分で不連続な変化を示しており、土堤は石堤ほど水平方向に変位していないため、外力に対し石堤を背後から支える機能を果たしていると言える。

次に鉛直方向の変位量について見ると、土堤なしの場合は、石堤の背後の法先で最大鉛直変位を取り、下方に約6.3cm、土堤ありの場合は、土堤天端中央部付近が凹むように約7.2cmとなっている。水平方向の変位量と併せて見れば、外力が作用した際、堤防全体に時計回りの回転力が作用したと考えられ、土堤は前面の石堤の時計回りの回転とは逆向きに変形しようとした結果、相対的に弱い材料である土堤部分の天端上で凹状の分布となったのではないかと推測できる。

(3) 第二室戸台風時の暴浪による解析結果

第二室戸台風時の暴浪による解析を行った結果、水平、鉛直方向の変位量分布はともに安政南海地震津波の解析とほぼ同等の結果を得た。そこで最大変位量のみを表-2に比較として示す。

表から分かるように、第二室戸台風時の暴浪に対しては、どのケースも津波よりも変位量が少ない。しかし土堤ありの場合の鉛直変位量は津波でも台風でもほとんど変化がなく、水平外力が異なるにも関わらず、このような結果となることから、これらは外力に関係なく水軒堤防が持つ固有の構造から生じる特徴であると考えられる。

図-16は、図-1のB点で発掘された堤防断面のうち、土堤部分を示すものである。解析結果の図とは左右逆であり、右端に石堤の背面が見える。図から分かるように、

表-2 最大変位量の比較

| 解析対象 | 土堤なし | | 土堤あり | |
|----------|-------|--------|-------|--------|
| | 水平 | 鉛直 | 水平 | 鉛直 |
| 安政南海地震津波 | 6.4cm | -6.3cm | 5.5cm | -7.2cm |
| 第二室戸台風暴浪 | 3.9cm | -5.7cm | 3.4cm | -7.1cm |



図-16 中央部堤防における土堤部分の断面図

土堤部分は石堤の天端よりも1m程度高くなっており、石堤の天端に向かって緩やかにつながっている。元々この形状で築造したとは考えにくく、築造後の自重による変形や天端の摩耗、繰り返しかかる波浪外力などによって最終的にこのような形になったものと考えられ、本研究の解析結果が示す形状と類似するものとして推測することも可能である。なお、基礎地盤および堤体内部の詳細な調査から地震による変形や地盤の液状化の痕跡は認められず、地震による変形はなかったものと判断した。また堤体は砂に埋もれていたものの、その一部は露出する程度で上載荷重として作用するほどのものではなかった。

6. 結語

本研究は、和歌山市西浜で新たに発掘された県指定史跡水軒堤防の工学的機能性について検証するため、歴史的な津波外力および第二室台風による波浪外力を求め、有限要素弾性解析を行って、その変形特性について明らかにした。以下に主な結論を示す。

- (1) 津波外力に対し、石堤に付設された土堤によって水平方向の最大変位量が約14%低減することが分かった。
- (2) 外力によって、石堤全体に時計回りの回転力が作用し、それを抑えるように土堤が機能し、結果として土堤天端上で最大鉛直変位を示すことが分かった。
- (3) 波浪外力が津波外力に比べて相対的に小さく、水平方向の最大変位量が外力に伴って小さくなったが、土堤天端上での最大鉛直変位量はどちらも変わらないことから、堤防が持つ固有の構造から生じる変形ではないかという推論に至った。

参考文献

- 相田 勇 (1981)：南海道沖の津波の数値実験，地震研究所彙報，Vol.56，pp.713-730。
- 岩垣雄一・榎木 亨 (1979)：海岸工学，共立出版，p.216。
- 黒石哲夫・藤井幸司・佐々木宏治 (2009)：県指定史跡水軒堤防確認調査報告書，和歌山県教育委員会，p.32。
- 谷本勝利・本 浩司・石塚修次・合田良實 (1976)：防波堤の設計波力算定式の検討，第23回海岸工学講演会論文集，pp.11-16。
- 谷本勝利・鶴谷広一・中野 晋 (1984)：1983年日本海中部地震津波における津波力と埋立護岸の被災原因の検討，第31回海岸工学講演会論文集，pp.257-261。
- 玉野富雄・西田一彦・B. Shrestha・金岡正信・森本浩行 (2004)：城郭石垣構造の力学安定，材料，Vol.53，No.1，pp.5-8。
- 羽島徳太郎 (1980)：大阪府・和歌山県沿岸における宝永・安政南海道津波の調査，地震研究所彙報，Vol.55，pp.505-535。
- Goto, C., Y. Ogawa, N. Shuto and F. Imamura (1997): Numerical method of Tsunami Simulation with the Leap-frog scheme, IUGG/ICC time project, UNESCO, 97p.
- Manshinha, L. and D. Smylie (1971): The displacement fields of inclined faults, Bulletin of The Seismological Society of America, Vol.61, No.5, pp.1433-1440.