2016 年熊本地震による地震動の推定と被災検証

佐藤 昌宏*・山田 雅行**・桒原 直範***・戎 健次***・幸福 辰己****・鬼童 孝*****・山本 修司*****

*(一財)沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員 ** 株式会社ニュージェック 技術開発グループ 地震・防災チーム *** 株式会社ニュージェック 港湾・海岸グループ 沿岸防災チーム ****** 元 国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 所長 ****** 国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 設計室 先任建設管理官 ****** (一財) 沿岸技術研究センター 参与

2016年熊本地震の被害は広域であったが、港湾施設の被害は軽微であった.本検討では、熊本地震の港湾施設への影響を把握するため、各施設に作用した地震動を推定した.また、静的解析および動的解析を行い、実際の岸壁の変状との比較を行った. キーワード: 2016年熊本地震、地震動の推定、作用震度、限界震度、被災検証

1. はじめに

2016 年熊本地震の本震は、マグニチュード(Mj)7.3 と大きく,被害範囲が広域であった.熊本県益城町で 震度7を記録した他,阿蘇地方も震度6強・6弱を記 録し、阿蘇大橋が落橋する大崩壊を始め、多くの斜面 崩壊が発生した 1). その一方で港湾施設の被害は,他 の社会基盤施設や家屋の被害と比較して軽微であった ことが報告されている²⁾.本震が発生した4月16日の 翌日の17日に,熊本港では、海上保安庁の巡視船「あ まぎ」による給水支援活動、大分港では、海上自衛隊 の輸送艦「しもきた」による支援物資等の輸送,八代 港では、海上自衛隊の輸送艦「おおすみ」による支援 物資等の輸送が行われた 3. また, 熊本港では応急復 旧により,地震から一週間後の22日よりフェリー航路, 23 日よりコンテナ航路の運航が再開されている 4. し かし,熊本港,八代港では地震観測が行われておらず, 港湾施設の地震時挙動の実態が明らかとは言えない.

本検討では、熊本地震の港湾施設への影響を把握す るため、各施設に作用した地震動を推定した.また、 静的解析および動的解析を行い、実際の岸壁の変状と 比較した.

2. 検討内容

2.1 検討対象施設と熊本地震に伴う施設変状

表-1に対象施設の概要(構造形式,設計年次,設計 基準,設計震度)を示す.被災の有無等を踏まえて, 本検討では,熊本港(夢咲島)の岸壁(-7.5m),別府港 (石垣)の岸壁(-10.0m)(耐震),八代港(外港)岸壁 (-10.0m)の3施設を選定した.施設の特徴として,構 造形式は,熊本港岸壁と別府港岸壁が重力式ケーソン, 八代港岸壁が控え直杭式矢板式である.設計基準は, 港湾の施設の技術上の基準・同解説(以下,技術基準と 呼ぶ)に準拠している.熊本港岸壁(-7.5m)と八代港岸 壁(-10.0m)は昭和54年版,別府港岸壁(-10.0m)(耐震) は平成11年版を用いており,安全率法および震度法で 設計している.別府港は,L2地震動対応の耐震強化施 設として設計されており,設計震度は0.25と上限値で あった.地盤性状として,熊本港はDL-40m付近まで軟 弱な有明粘性土層が厚く堆積している。その一方,別 府港は砂質土地盤であることが特徴である.

以下に当該地震に伴う各岸壁の被害状況について述 べる. 熊本港岸壁(-7.5m)は、クレーン基礎近傍で亀裂 や段差が生じ、岸壁のはらみ出しが確認された。地震 前後で基準点測量が実施されており、地震前の測量結 果(平成 25 年 10 月)と地震後の測量結果(平成 28 年 6 月)の相対変位は、南側(法線直角海側)に約12cm, 西側 (法線平行方向)に約3cmの移動であった⁵⁾.また,背 後の陸側クレーン基礎(海側)に7 cm 程度の段差が生じ ていることが確認された²⁾. 岸壁から離れた場所では 液状化が発生し,歩道で陥没等の被害が生じているが, 岸壁直背後では液状化が発生していない. 岸壁の変状 が比較的軽微で済んだ要因として,野津ら²によれば, 軟弱地盤対策として,ケーソン直下の沖積層全層にわ たり実施された SCP(改良率 80%) 改良による効果が大 きいと考察されている. また, 岸壁直背後は液状化対 策 SCP(改良率 15 %)の効果があったと言える.

港湾名	対象施設	構造 形式	設計 年次	設計基準	設計震
熊本港 (夢咲島)	岸壁(-7.5m)	重力式	昭和63年	港湾の施設の技術上 の基準・同解説 (昭和54年版)	0.15
別府港 (石垣)	岸壁 (-10.0m) (耐震)	重力式	平成12年	港湾の施設の技術上 の基準・同解説 (平成11年版)	0.25
八代港 (外港)	岸壁 (-10.0m)	控え 直杭式 矢板式	昭和62年	港湾の施設の技術上 の基準・同解説 (昭和54年版)	0.05

表-1 対象施設の概要

別府港岸壁(-10.0m)(耐震)は、変状が確認されなかった.耐震強化施設として、設計された効果と言える. 八代港岸壁(-10.0m)は、最大1cm程度のはらみ出しや 2cmの沈下、岸壁背後のアスファルト舗装にクラック が確認されたが、液状化は生じていない.

2.2 検討手順

図-1に検討フローを示す.

【手順1】では、2016年熊本地震に対して、各港湾施 設に作用した前震と本震の地震動を算定した. ここで は平成28年4月14日21:26(Mj6.5)の地震を「前震」, 4月16日1:25(Mj7.3)を「本震」と言う.次に、港湾 施設に作用した地震動の大きさを把握するため、推定 した地震動とL1 地震動およびL2 地震動を応答スペク トルで比較することで、地震動の大きさを定性的に評 価した.別府港では、強震観測点(別府-U)が存在する ため、その地震観測記録を用いて工学的基盤面での地 震動を算定した. 熊本港、八代港では、強震観測点が ないため,統計的グリーン関数法⁶およびサイト特性 置換法 ⁷⁾により地震動の推定を行った.既往の震源特 性(特性化震源モデル⁸⁹⁾)、既知の伝播経路特性,サイ ト増幅特性,余震記録によるサイト位相特性を用いて, 統計的グリーン関数法によって地震動を推定する.既 往の特性化震源モデルとして、波形インバージョンに よる破壊過程を参考に、周辺の観測記録が説明できる ようにチューニングされたモデルを用いる. サイト特 性置換法による地震動推定は、熊本港、八代港周辺の K-NET 観測点(熊本, 宇土, 八代)等において, 前震およ び本震の観測記録が得られている. 震源と伝播経路の 違いが小さいとみなせる場合、サイト特性置換法を適 用することができる. サイト特性置換法は、対象地点 近傍の地震動(既知)のサイト増幅特性およびサイト位 相特性を、対象地点のサイト増幅特性およびサイト位 相特性(余震記録)に置換する方法である。前震および 本震の実測記録が得られている地点にて、それぞれの 方法を用いた地震動の推定を行い、その結果を参考に 検証し、各港湾毎に最適な手法を選定した.

【手順2】では、液状化の検討を行った。手順1で設定した工学的基盤面位置の2E波を用い、SHAKEによる等価線形解析を実施し、N値が観測されている標高の等価加速度を求め、等価加速度と等価N値の関係より、液状化の有無を判定した。

【手順3】では,静的解析による検討を行った.現行 基準で採用されている静的解析法の妥当性を検証する ため,平成19年港湾基準の照査用震度式を用いて算定 した作用震度と限界震度の比較を行った.平成19年港 湾基準の照査用震度式を(1),(2)式に記す¹⁰.

○重力式岸壁

$$k_{h_k} = 1.78 \left(\frac{D_a}{D_r}\right)^{-0.55} \frac{\alpha_c}{g} + 0.04$$
 (1)

○控え直杭式矢板岸壁

$$k_{h_k} = 1.91 \left(\frac{D_a}{D_r}\right)^{-0.69} \frac{\alpha_c}{g} + 0.03 \tag{2}$$

K_{bk}: 照査用震度の特性値

- Da : 許容される係船岸天端における変形量
 重力式岸壁 (=10cm),
 控え直杭式矢板式岸壁 (=15cm)
- Dr : 基準変形量 (=10cm)

 α_c :補正加速度最大值 (cm/s²)

g : 重力加速度(=980cm/s²)

「作用震度 < 限界震度」であれば無被災と予測し、 「作用震度 > 限界震度」であれば被災と予測した. 計算により求めた被災の有無と,現場での変位の有無 との照合を行った.ここに、「作用震度」は、対象とす る施設に対して、熊本地震を踏まえて本検討で推定し た地震動(または、観測した地震動)を基に震度算定式 により算出した震度とする.また、「限界震度」は、対 象とする施設に対して、重力式岸壁では、滑動・転倒・ 支持力のいずれかの破壊モードの安全率が 1.0 になっ た時の震度として定義した.

【手順4】では、岸壁全体の動的解析を二次元有効応 力計算プログラム「FLIP」を用いて行った.計算によ る変位結果と、現場での変位量との照合を行った.



図-1 検討フロー

3. 検討結果

3.1 地震動の検討(L1, L2 地震動との比較)

熊本港は統計的グリーン関数法(非線形効果有),八 代港はサイト特性置換法で求めた地震動を採用した. 各港の近傍観測点を統計的グリーン関数法(非線形効 果有,無)で再現した結果,熊本港では再現性が良好で あったことより当手法を採用した.八代港は,K-NET 八代の統計的グリーン関数法(非線形なし)と観測記録 の差の傾向が,八代港の統計的グリーン関数法とサイ ト特性置換法の差の傾向と類似していることより,サ イト特性置換法を採用した.図-2に熊本港,図-3に八 代港の工学的基盤面における推定地震動の加速度時刻 歴を示す.次に,推定地震動とL1,L2 地震動の比較に ついて述べる. 熊本港の推定地震動は,前震が NS 成 分,EW 成分ともに,L1 地震動に近い値を示した(図-4 a)).本震が NS 成分についてL1 地震動に近い傾向を示 し,EW成分についてL1 地震動に近い傾向を示 し,EW成分についてL1 地震動より大きくL2 地震動よ りやや小さい傾向を示した(図-4 b)).

別府港の観測地震動は、前震がNS成分、EW成分とも に、L1 地震動より小さい値を示した(図-5a)).本震が、 NS成分、EW成分ともに、周期が短い0.1~1.5(s)では、 L2 地震動に近い傾向を示し、1.5(s)より長周期成分で は、L1 地震動に近い傾向を示した(図-5 b)).

八代港の地震動は,前震がNS成分,EW成分ともに, 周期が短い0.1~0.3(s)では,L1地震動に近い傾向を 示し,0.3(s)より長周期成分では,L1地震動より小さ い値を示した(図-6 a)). 本震が,NS成分,EW成分と もに,周期が短い0.1~0.3(s)では,L2地震動に近い 傾向を示し,0.3(s)より長周期成分では,L1地震動に 近い傾向を示した(図-6 b)).

以上より,対象とした3施設において,前震はL1地 震より小さい値,または近い値を示した.本震は周期 により異なるがL1とL2地震動の間の値を示した.当 地点において発生するものとして想定される地震動の うち,L1地震動の定義が「地震動の再現期間と当該施 設の設計供用期間との関係から当該施設の設計供用期 間中に発生する可能性の高いもの」,L2地震動の定義が 「最大規模の強さを有するもの」¹⁰⁾であることを踏ま

えると、大きな地震動が施設に作用したと言える.















図-6 推定地震動とL1,L2 地震動の比較(八代港)

3.2 液状化の検討

熊本港岸壁(-7.5m)は、背後地(岸壁法線から約 37m の位置)にて埋立土の情報を含めた柱状図や土質試験 結果があることより、そのボーリング4地点について 液状化判定を行った. その結果, 前震では3箇所が 「I:液状化する」,1地点が「Ⅱ:液状化する可能性 が大きい」、本震では4地点全てが「I:液状化する」 と判定された. 岸壁から離れた歩道ではあるが, 液状 化の発生を確認していることより,液状化判定結果と 現場での状況は概ね一致したと言える. 図-7 a) に熊本 港における前震(EW), b)に本震(EW)での等価 N 値と等 価加速度による判定結果の一例を示す. 前震, 本震と もに、判定Iから判定IVに分類され、判定Iが連続し ていることから, 液状化すると判定した. 別府港岸壁 (-7.5m)(耐震)は、埋立土の情報を含めた柱状図が存在 しない. また, 隣接する岸壁(-12m)はボーリングデー タはあるが河川を挟んだ位置であるため、本報告では 省略する. 八代港岸壁(-7.5m)は, 埋立土の情報を含め た柱状図が存在しない. そこで, 隣接する八代港岸壁 (-14m)の背後地のボーリング3地点(岸壁法線から約 20mの位置)を活用した.しかしながら、液状化判定を する際に必要となる細粒分含有率の情報が少ないため, 液状化判定が困難であった. そのため、ここで現場で は液状化は生じていなことより、液状化しないと判断 される境界の細粒含有率をトライアルにより求めた. その結果、細粒分含有率は20%となった.



図-7 等価N値と等価加速度による判定結果(熊本港)

3.3 静的解析検討(作用震度と限界震度の比較)

熊本港の岸壁(-7.5m)は、「作用震度(0.17) < 限界 震度(0.20)」となり計算上は無被災と予測したが、実 現象では十数 cm の変位(*D*年10cm 以上)であった(被災 と判定).限界震度算定の決定要因は滑動であった.

別府港の岸壁(-10m)(耐震)は、「作用震度(0.25) < 限界震度(0.29)」となり計算上は無被災と予測し、実 現象でも変状が確認されなかった(無被災と判定).限 界震度算定の決定要因は滑動であった.

八代港の岸壁(-10m)は、昭和54年版に準拠し根入長 照査をフリーアースサポート法、断面力計算を仮想ば り法で設計している.当時の設計法を用いた限界震度 は0.17となった.現行の設計基準は、根入部を弾性支 承として解くロウの方法が記載されている.そこで、 ロウの方法で根入長を算定したところ、限界震度は 0.05以下になった.現地の状況から根入不足による変 形モードは発生していないと考え、断面力の算定のみ についてロウの方法を採用した.その際の限界震度は 0.07となった.以上を踏まえると「作用震度(0.14) > 限界震度(0.07)」となり計算上は被災と予測したが、 実現象では10mm 程度の変位(*D*年15cm 以下)となった (*D*年15cm 以下より無被災と判定).控え直杭式矢板式岸 壁の限界震度を算出する際には、設計年度や設計方法 に留意する必要がある.

図-8 に, 福永らが作成した被災判定グラフ図(被災検 証)¹¹⁾に検討結果を赤三角の記号で加筆した.縦軸に限 界震度を横軸に作用震度を取り,「作用震度 > 限界震 度」となる右下の領域(灰色の領域),「作用震度 ≦ 限 界震度」となる左上の領域(白色の領域)は,前者が被 災,後者が無被災の計算上の判定範囲である.

実現象が被災であれば上向きの正三角形(▲),無被 災であれば下向きの正三角形(▽)のプロットマーカー の種類で表現している.計算結果と実現象の「合致」, 計算が「危険判定」であったのか、あるいは「安全判 定」であったのかが視覚的に判断できる特徴がある. 設計計算上の被災予測と実現象による被災判定結果が いずれも被災あるいは無被災となる場合、即ち合致す る場合,その構造物について被災判定は良好であり, 評価を「合致」とする. 設計計算上の被災予測が無被 災、実現象で被災となったものは、設計計算で求めた 作用震度が限界震度より小さかったにもかかわらず実 現象では被災していたことになるので、作用震度を過 小評価している可能性があるため、評価を「危険」と する.一方,設計計算が被災,実現象が無被災となっ たものは、設計計算で求めた作用震度が限界震度より 大きかったにもかかわらず実被害の観点では被災して いなかったことになるので、作用震度を過大評価して いる可能性があるため、評価を「安全」とする11.

図-8 a)は、福永らが求めた H19 基準照査用震度式に

基づく重力式岸壁(水深-7.5m~-14.6m)全 41 施設の変 形量許容値別被災安定グラフ(Dæ10cm は重力式岸壁の Da の標準値), b)は, 控え直杭式矢板岸壁(水深-7.5m ~-14.6m)全 8 施設の変形量許容値別被災安定グラフ (Dæ15cm は矢板式岸壁の Da の標準値)を示している.

重力式の熊本港岸壁(-7.5m)は、計算結果と実現象が 合致せず「危険判定」であった.他施設の判定結果で は、危険判定率が7.3%(3施設)であった.別府港岸壁 (-10m)(耐震)は、計算結果と実現象が「合致」した. 他施設の判定結果では、合致率が90.2%(37施設)であ った.控え直杭式矢板式の八代港岸壁(-10m)は、計算 結果と実現象が合致せず「安全判定」であった.他施 設の判定結果では、安全判定率が12.5%(1施設)、合 致率が50.0%(4施設)であった.控え直杭式矢板式岸 壁は、データ数が少ないため、データを蓄積し評価を する必要がある.



3.4 動的解析検討(変形量等の算出)

表-2 に、動的解析により求めた岸壁の上端と下端の 変位に着目した結果を示す. 熊本港岸壁(-7.5m)は、本 震終了時の岸壁水平変形量は 0.28m、岸壁下端水平変 形量では 0.19m、岸壁下端と天端の相対変位は 0.09m となった. 水平変形量は、ケーソン直下の基盤地盤の 変形で約65%を占めた.また、残留時の傾斜角は約0.45 度であった. 現場での変位は海側に約 0.12m の変形が 生じていることから、概ね被災状況に近い計算結果と なったと言える. 図-9 にケーソンを中心とした変形図 の一部を示す.

別府港岸壁(-10m)(耐震)は、本震終了時の岸壁水平 変形量は0.21m、岸壁下端水平変形量では0.15m、岸壁 下端と天端の相対変位は約0.06mとなった.水平変形 量は、ケーソン直下の基盤地盤の変形で約70%を占め た.また、残留時の傾斜角は約0.25度であった.現場 では変状が確認されなかったことを踏まえると変形量 の試算結果は大きめであったと言える.岸壁天端水平 変形量のうち、約60%は基礎地盤のせん断変形による ものであり、ケーソンのロッキングの影響や若干なが らの地盤の液状化が影響しているものと考えられる.

八代港岸壁(-7.5m)は、粒度試験から得られる細粒含 有率の情報が少ないため、液状化判定の際に算定した 細粒分含有率20%を用いて液状化パラメタを設定し、 動的解析を実施した.本震終了時の岸壁水平変形量は 0.15mとなった.岸壁直背後では矢板に作用している土 圧により変形が生じており、背後地盤では液状化層で 変形が生じていることを確認した.ただし、せん断ひ ずみの結果より、液状化の影響による背後地盤のせん 断強度およびせん断剛性の低下傾向は大きくないと考 察した.

	対象施設	地震動	計算箇所 岸壁	水平変位 ^m	鉛直変位 m
(-1	熊本港岸壁	統計的グリーン 関数法	上端	0.28(海側)	0.11(下側)
	(-7.5m)		下端	0.19(海側)	0.11(下側)
	別府港岸壁	地震観測記録 (別府-U)	上端	0.21(海側)	0.01(下側)
	(-10.0m) (耐震)		下端	0.15(海側)	0.01(下側)
Л	八代港岸壁	サイト特性 置換法	上端	0.15(海側)	0.11(下側)
	(-7.5m)		下端	0.00(海側)	0.04(下側)

表2	動的解析に	よる変	位計算結果
----	-------	-----	-------



4. まとめ

本検討では2016年熊本地震における港湾施設への影響評価を熊本港岸壁(-7.5m),別府港岸壁(-10.0m)(耐震),八代港岸壁(-10.0m)の3施設で実施した.以下に得られた結果を述べる. 今後の岸壁を計画する際の一助になれば幸いである.

①推定した地震動とL1 地震動とL2 地震動の比較では, 前震はL1 地震動より小さい値,または近い値を示した. 本震は周期により異なるがL1 とL2 地震動の間の値を 示した.大きな地震動が各施設に作用したと言える. ②静的解析による検討の作用震度と限界震度の比較で は,重力式の熊本港岸壁(-7.5m)は,計算結果と実現 象が合致せず「危険判定」であった.別府港岸壁 (-10m)(耐震)は,計算結果と実現象が「合致」した. 控え直杭式矢板式の八代港岸壁(-10m)は,計算結果と 実現象が合致せず「安全判定」であった.

③動的解析による変形量等の算出では、熊本港岸壁 (-7.5m)は、概ね被災状況に近い計算結果となった.別 府港岸壁(-10m)(耐震)は、現場では変状が確認されな かったことを踏まえると、変形量の計算結果は大きめ であった.八代港岸壁(-7.5m)は、細粒分含有率の情報 が少ないため、実際の現象と同様に液状化しない条件 でトライアル計算を行ったところ、概ね被災状況に近 い変状に合わせることができた.

謝辞

本稿は、国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技 術調査事務所発注の「平成28年度 管内技術課題検討 業務」の成果の一部を取りまとめたものである.業務 実施にあたっては、検討会等で善功企委員長、松田泰 治座長、大谷順委員、一井康二委員、野津厚委員、宮 田正史委員、及び関係各所から貴重なご意見、ご指導 をいただいた.ここに厚く御礼申し上げます.

参考文献

- 28 年熊本地震
 28 年熊本地震
 に起因した斜面災害に関する現地調査報告,地盤工学会
 誌, No. 711, pp. 8-11, 2017.
- 野津厚・小濱英司:2016年熊本地震による港湾施設の被害について、地盤工学会誌、No.711, pp. 36-39, 2017.
- 3) 国土交通省港湾局:平成28年熊本地震における港湾の 被害と対応について,港湾,公益社団法人日本港湾協会, Vol.93, 2016.
- 4) 針谷雅幸:平成28年熊本地震に係る港湾の復旧状況と 被災地支援について,港湾、公益社団法人日本港湾協会, Vol.94,2016.
- 5) 国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調查事務 所:平成28年度 管内技術課題檢討業務,平成29年3月.
- 6) 社団法人 日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・ 同解説(上巻), pp. 357-360, 平成 19 年 7 月.
- 7) 秦吉弥・一井康二・常田賢一・野津 厚・横田聖哉・金 田和男:サイト特性置換手法に基づく 2011 年東北地方太

平洋沖地震とその最大余震における盛土被災地点での地 震動の推定,土木学会論文集A1(構造・地震工学) Vol. 68 No. 4, pp. I_315-330, 2012.

8) 野津厚:2016 年熊本地震の前震(M6.5)の特性化震源モデル,海上・港湾・空港技術研究所港湾空港技術研究所ウェブサイト,2016.

http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/s ourcemodel/somodel_2016kumamoto_z.html

9) 野津厚:2016 年熊本地震の本震(M7.3)の特性化震源モデル,2016.

http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/s ourcemodel/somodel_2016kumamoto.html

- 10) 社団法人 日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・ 同解説,平成19年7月.
- 11) 福永勇介・竹信正寛・宮田正史・野津厚,小濱英司: 重力式および矢板式岸壁を対象とした被災検証による照
 □ 用震度式の妥当性の評価,国土技術政策総合研究所資料, No. 920, 2016.

検討対象施設の標準断面図を図-10~図 12 に示す.



図-10 熊本港(夢咲島) 岸壁 (-7.5m)







図-12 八代港(外港) 岸壁 (-10.0m)