

ISSN 1346-7328
国総研資料 第1042号
ISSN 1345-7840
港空研資料 第1348号
平成 30 年 7 月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No. 1042

July 2018

港湾空港技術研究所資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No. 1348

July 2018

平成28年（2016年）熊本地震による港湾施設等被害報告

野津厚・伊豆太・佐々真志・小濱英司・大矢陽介・寺田竜士
小林孝彰・近藤明彦・長坂陽介・鈴木健之・坪川将丈
内藤了二・竹信正寛・福永勇介・鬼童孝

Damage to Port and Airport Facilities during the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence

Atsushi NOZU, Futoshi IZU, Shinji SASSA, Eiji KOHAMA, Yousuke OHYA
Ryuji TERADA, Takaaki KOBAYASHI, Akihiko KONDO, Yosuke NAGASAKA
Takeshi SUZUKI, Yukitomo TSUBOKAWA, Ryoji NAITO, Masahiro TAKENOBU
Yusuke FUKUNAGA, Takashi KIDOU

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management

Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,

Port and Aviation Technology, Japan

平成28年（2016年）熊本地震による港湾施設等被害報告

野津 厚¹⁾・伊豆 太²⁾・佐々 真志³⁾・小濱 英司⁴⁾・大矢 陽介⁵⁾・寺田 竜士⁶⁾
小林 孝彰⁷⁾・近藤 明彦⁸⁾・長坂 陽介⁹⁾・鈴木 健之¹⁰⁾・坪川 将丈¹¹⁾
内藤 了二¹²⁾・竹信 正寛¹³⁾・福永 勇介¹³⁾・鬼童 孝¹⁴⁾

要　旨

本資料は、平成28年（2016年）熊本地震の発生を受け、国土技術政策総合研究所と港湾空港技術研究所が九州地方整備局の支援の下に派遣した調査団による現地調査の結果を中心として、熊本地震による港湾・空港施設の被害状況をとりまとめたものである。なお、調査団による調査結果以外に、関係機関から寄せられた測量結果などの情報を加えている。また、港湾における強震記録や、強震記録の得られなかった地点での推定地震動についても記載している。

熊本地震による家屋や社会基盤施設への被害が全体として深刻なものであった中で、調査団が確認した港湾・空港施設の被害は比較的軽微であった。しかし、地震による施設の変状はある程度生じており、その情報は、将来の地震によって類似の施設に起こりうる被害を予測し、対策を考える上で重要な意味を持つと考えられる。

熊本港の重力式岸壁では、強い地震動が作用したと推定されるにも関わらず、岸壁法線の海側への変位は12cm程度にとどまった。その要因として、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施工されていた改良率80%のSCPの効果が考えられる。熊本港と別府港ではフェリー埠頭の可動橋に不具合が生じたが、その要因としては、海底地盤の傾斜に起因する地盤の変位や護岸の変位が考えられる。これらの事例は、港湾施設の耐震設計において、構造物のみに着目するのではなく、地盤-構造物の全体系をバランスよく見ていく必要があることを示している。

キーワード：2016年熊本地震、港湾、空港、被害、強震動

- 1) 地震防災研究領域長
- 2) 構造研究領域 空港舗装研究グループ長
- 3) 地盤研究領域 動土質研究グループ長
- 4) 地震防災研究領域 耐震構造研究グループ長
- 5) 地震防災研究領域 耐震構造研究グループ 主任研究官
- 6) 前・地震防災研究領域 耐震構造研究グループ 研究官
- 7) 前・地盤研究領域 動土質研究グループ 研究官
- 8) 地震防災研究領域 耐震構造研究グループ 研究官
- 9) 地震防災研究領域 地震動研究グループ 研究官
- 10) 前・国土技術政策総合研究所 沿岸海洋・防災研究部 沿岸防災研究室長
- 11) 国土技術政策総合研究所 空港研究部 空港施設研究室長
- 12) 国土技術政策総合研究所 沿岸海洋・防災研究部 主任研究官
- 13) 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 主任研究官
- 14) 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

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5058 Fax：046-844-0839 e-mail: nozu@pari.go.jp

Damage to Port and Airport Facilities during the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence

Atsushi NOZU¹⁾, Futoshi IZU²⁾, Shinji SASSA³⁾, Eiji KOHAMA⁴⁾, Yousuke OHYA⁵⁾, Ryuji TERADA⁶⁾, Takaaki KOBAYASHI⁷⁾, Akihiko KONDO⁸⁾, Yosuke NAGASAKA⁹⁾, Takeshi SUZUKI¹⁰⁾, Yukitomo TSUBOKAWA¹¹⁾, Ryoji NAITO¹²⁾, Masahiro TAKENOB¹³⁾, Yusuke FUKUNAGA¹³⁾, Takashi KIDOU¹⁴⁾

Synopsis

In response to the occurrence of the 2016 Kumamoto earthquake sequence, the National Institute for Land and Infrastructure Management and the Port and Airport Research Institute dispatched four reconnaissance teams to the affected area. With the cooperation of the Kyushu Regional Development Bureau, the teams investigated damage to port and airport facilities. This report presents the results of the reconnaissance activities by the teams. In addition, the report includes relevant information provided by regional authorities. The report also presents strong motion records and estimated ground motions at the ports and airports. In contrast to serious damage to some infrastructures, the damage to port and airport facilities was found to be generally minor. However, the teams did find damage due to the earthquakes, which could be informative for the future design of port and airport facilities. A gravity-type quay wall at the Port of Kumamoto suffered only slight damage with residual horizontal displacement of 12 cm, presumably because of the SCP improved ground with improvement ratio of 80% down to the bottom of the alluvial layers. At the Ports of Kumamoto and Beppu, movable bridges for the ferries were disabled, which could be attributed to the deformation of ground. Such cases indicate that, in the design of port facilities, not only the performance of the structure itself but also the performance of soil-structure system should be considered.

Key Words: the 2016 Kumamoto earthquake sequence, port, airport, damage, strong ground motion

1) Director of Earthquake Disaster Prevention Engineering Department
2) Head of Pavement Group
3) Head, Soil Dynamics Group
4) Head of Earthquake and Structural Dynamics Group
5) Senior Researcher, Earthquake and Structural Dynamics Group
6) Former Researcher, Earthquake and Structural Dynamics Group
7) Former Researcher, Soil Dynamics Group
8) Researcher, Earthquake and Structural Dynamics Group
9) Researcher, Engineering Seismology Group
10) Former Head of Coastal Disaster Prevention Division, Coastal, Marine and Disaster Prevention Department, NILIM
11) Head of Airport Facilities Division, Airport Department, NILIM
12) Senior Researcher, Coastal, Marine and Disaster Prevention Department, NILIM
13) Senior Researcher, Port and Harbor Department, NILIM
14) Shimonoseki Research and Engineering Office for Port and Airport, Kyushu Regional Development Bureau
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5058 Fax : +81-46-844-0839 e-mail: nozu@pari.go.jp

目 次

1. はじめに	1
2. 地震の概要	1
3. 港湾の強震記録と港湾・空港の推定地震動	2
4. 熊本港の被害	17
5. 別府港の被害	23
6. 八代港の被害	35
7. 熊本空港の被害	40
8. まとめと今後の課題	46
謝辞	47
参考文献	47

1. はじめに

2016 年 4 月 14 日 21:26 ごろ熊本県熊本地方を震源として気象庁マグニチュード 6.5 の地震が発生し、熊本県益城町で震度 7 を観測した。つづいて 2016 年 4 月 16 日 1:25 ごろ熊本県熊本地方を震源として気象庁マグニチュード 7.3 の地震が発生し、益城町で再び震度 7 を観測するとともに、熊本県西原村でも震度 7 を観測した。この他にも最大震度 6 弱以上の地震が 4 月 14 日から 4 月 16 日までに 5 回発生している。気象庁はこれらを含む一連の地震活動を「平成 28 年（2016 年）熊本地震」と命名している¹⁾。本稿では、慣例にならい、特にことわらない限り、4 月 14 日 21:26 ごろ発生した M6.5 の地震を「前震」、4 月 16 日 1:25 ごろ発生した M7.3 の地震を「本震」と呼ぶ。

これらの地震を受け、国土技術政策総合研究所と港湾空港技術研究所は、港湾・空港の被害状況を把握するとともに、現地の担当部局に対して必要な支援を行うため、九州地方整備局の支援の下、第 1 次～第 4 次の調査団を派遣した。

第 1 次調査団は 4 月 15 日～4 月 17 日にかけて派遣され、熊本港と熊本空港（地下道のみ）の調査を行った。熊本空港の地下道の調査は本震前後に行っている。第 2 次調査団は 4 月 16 日～4 月 17 日にかけて派遣され、熊本空港の調査を行った。第 3 次調査団は 4 月 17 日～18 日にかけて派遣され、別府港の調査を行った。第 4 次調査団は 4 月 17 日～4 月 18 日にかけて派遣され、八代港の調査を行った。調査団のメンバーと担当した港湾・空港は第 8 章に示している。

熊本地震による家屋や社会基盤施設への被害が全体として深刻なものであった中で²⁾³⁾、調査団が確認した港湾・空港施設の被害は比較的軽微であった。しかし、地震による施設の変状はある程度生じており、その情報は、将来の地震によって類似の施設に起こりうる被害を予測し、対策を考える上で重要な意味を持つと考えられる。例えば、第 4 章以降で詳しく述べるように、熊本港と別府港ではフェリー埠頭の可動橋に被害が生じているが、これは従来あまり認識されていなかった被害である。また熊本港において SCP 改良された重力式岸壁の被害が軽微であった点も注目される。

そこで、本稿では、調査団による現地調査の結果を中心として、熊本地震による港湾・空港施設の被害状況をとりまとめる。なお、調査団による調査結果以外にも、関係機関から寄せられた測量結果などの貴重な情報を加えている。また、港湾における強震記録や、強震記録の得られなかつた地点での推定地震動も、被害についての理解を深

める上で必要な情報であるため、それについても掲載している。なお、第 4 章～第 7 章の各港湾・空港の被害に関する記述は、基本的に各々の港湾・空港に派遣された調査団のメンバーが執筆し、筆頭著者が全体の調整を行った。

2. 地震の概要

気象庁⁴⁾のまとめによると、前震では、熊本県益城町で震度 7、玉名市、西原村、嘉島町、宇城市及び熊本市で震度 6 弱を観測した。本震では、熊本県益城町及び西原村で震度 7、南阿蘇村、菊池市、宇土市、大津町、嘉島町、宇城市、合志市及び熊本市で震度 6 強を観測した。その後も活発な地震活動がつづき、9 月 30 日までに震度 1 以上の地震が 4068 回発生した。このうち最大震度 7 のものが 2 回、6 強のものが 2 回、6 弱のものが 3 回、5 強のものが 5 回、5 弱のものが 12 回である。一連の地震活動は熊本県熊本地方から大分県中部に及んだ。

地震調査研究推進本部⁵⁾によると、前震の発震機構は北北西～南南東方向に張力軸をもつ横ずれ断層型で、これと余震分布から、北北東～南南西方向に伸びる右横ずれ断層で発生した地震と推定された。一方、本震の発震機構は南北方向に張力軸をもつ横ずれ断層型で、これと余震分布から、北東～南西方向に伸びる右横ずれ断層で発生した地震（正断層成分を含む）と推定された。防災科学技術研究所の F-net⁶⁾によると、前震のモーメントマグニチュードは 6.1、本震のそれは 7.1 であった。

国土地理院による GNSS 観測⁷⁾によると、前震では電子基準点「城南」（熊本市南区）において北北東方向に約 20cm の地殻変動が生じた（これには 4 月 15 日 0:03 ごろ発生した M6.4 の地震による地殻変動が含まれる可能性がある）。一方、本震では電子基準点「長陽」（南阿蘇村）において南西方向に約 97cm の地殻変動が生じた。

一連の地震活動が生じた範囲内には日奈久断層帶、布田川断層帶、別府一万年山断層帶が存在している。地震調査研究推進本部⁵⁾は、前震は日奈久断層帶の高野～白旗区間の活動によると考えられた。また、本震は主に布田川断層帶の布田川区間の活動によると考えられた。

現地調査の結果によると、布田川断層沿いの約 28km、日奈久断層沿いの約 6km、合計約 34km にわたり地表地震断層が確認されている⁸⁾。特に益城町堂園では約 2.2m の右横ずれ変位が確認された⁸⁾。また、正断層成分をもつ地表地震断層も見つかっている⁹⁾。

消防庁¹⁰⁾のとりまとめによると、2017年10月13日現在、一連の地震による人的被害は死者249名、負傷者2790名、住家被害は全壊8,674棟、半壊34,563棟である。

この地震では特に益城町の中心部において木造家屋に顕著な被害が生じ²⁾¹¹⁾¹²⁾、全壊率が50%を超える地区も見られた¹²⁾。被害集中域から北に数百メートルほど離れた地点には防災科学技術研究所のKiK-net¹³⁾の強震観測地点があり（地点名：KiK-net 益城；KMMH16）、強震記録が得られている。図-2.1はKiK-net 益城の地表で観測された本震の地震動の加速度応答スペクトルを示したものである。成分としてはより振幅の大きいEW成分を示している。また参考のため、1995年兵庫県南部地震の際にJR鷹取駅で観測された地震動のNS成分の加速度応答スペクトルと、道路橋示方書¹⁴⁾タイプ2地震動（II種地盤）の加速度応答スペクトル（補正係数なし）を同時に示している。なおJR鷹取の記録は、兵庫県南部地震の際に観測された地震動のうち、構造物被害に直結する周期帯での振幅が最大のものである。KiK-net 益城の加速度応答スペクトルは、被害集中域で得られた記録でないにも関わらず、周期1s付近で鷹取の記録やタイプ2地震動（II種地盤）の加速度応答スペクトルを上回っている。従って、被害集中域の地震動は相当強いものであったと推察される。

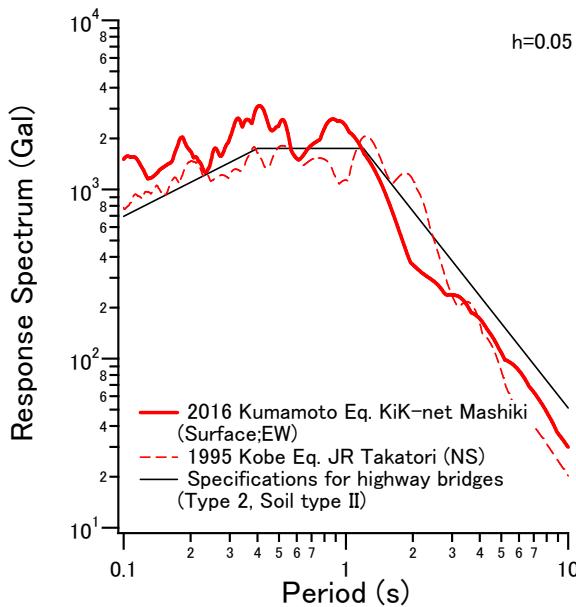


図-2.1 KiK-net 益城で観測された本震の地震動の加速度応答スペクトル（減衰定数5%）、縦軸：加速度応答スペクトル、横軸：周期、太実線：2016年熊本地震におけるKiK-net 益城の記録、破線：1995年兵庫県南部地震におけるJR鷹取駅の記録、細実線：道路橋示方書タイプ2地震動（II種地盤）

建物以外の社会基盤施設の被害としては、大規模な斜面崩壊の影響を受けた阿蘇大橋が落橋したほか、熊本県道28号線（俵山バイパス）沿いの橋梁の被害が顕著であったことが報告されている³⁾。

3. 港湾の強震記録と港湾・空港の推定地震動

本章では、まず、前震・本震の際に港湾で得られた強震記録について述べる。ただし、熊本地震による影響を受けた港湾のうち、震源に近く揺れが比較的大きかったと考えられる熊本港では、強震計が設置されていなかったため強震記録が得られていない。熊本港以上に震源に近かった熊本空港でも事情は同じである。そこで、熊本空港と熊本港については、被害の分析に資する目的で、断層モデルに基づく地震動の事後推定を行っているので、その結果についても本章で述べる。

3.1 港湾で得られた強震記録

前震（M6.5）の強震記録が得られた港湾を図-3.1に示す。同図に示すように前震では近畿以西の8港湾12地点で強震記録が得られた。ただしいずれも震源断層から離れた地点での記録であり、振幅は大きくなかった。最も大きい揺れを記録した細島港においても、最大加速度は41Gal（地表の東西成分）、PSI値は5cm/s^{0.5}（地表の南北成分）であった。別府港では最大加速度は16Gal（地表の東西成分）、PSI値は4cm/s^{0.5}（地表の南北成分）であった。

本震（M7.3）の強震記録が得られた港湾を図-3.2に示す。同図に示すように本震では東海以西の18港湾52地点で強震記録が得られた。規模の大きい本震は、より広範囲に強震動をもたらしたことがわかる。この中で最も大きい揺れを記録したのは別府港であり、最大加速度は290Gal（地表の東西成分）、PSI値は46cm/s^{0.5}（地表の南北成分）であった。

別府港の強震観測地点における地表（別府-U）と地中（別府-UB）での本震時の東西成分の加速度波形の比較を図-3.3に示す。また同じく速度波形の比較を図-3.4に示す。ここで速度波形は、観測された加速度波形を周波数領域で積分（0.1Hz以下をカット）して求めたものである。また地中の強震計はGL-16.3mに設置されている。強震観測地点における地盤条件等の詳細については文献¹⁵⁾を参照されたい。

地表と地中における波形は比較的類似しており、特に速度波形においてその傾向が著しい。ただし振幅は地表

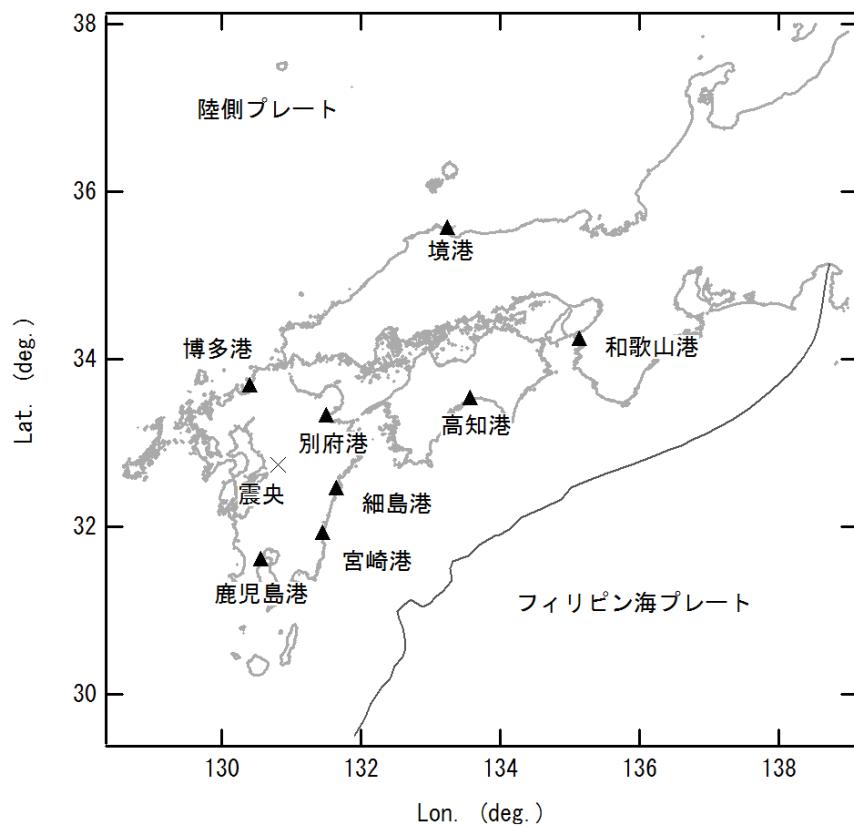


図-3.1 前震の強震記録が得られた港湾

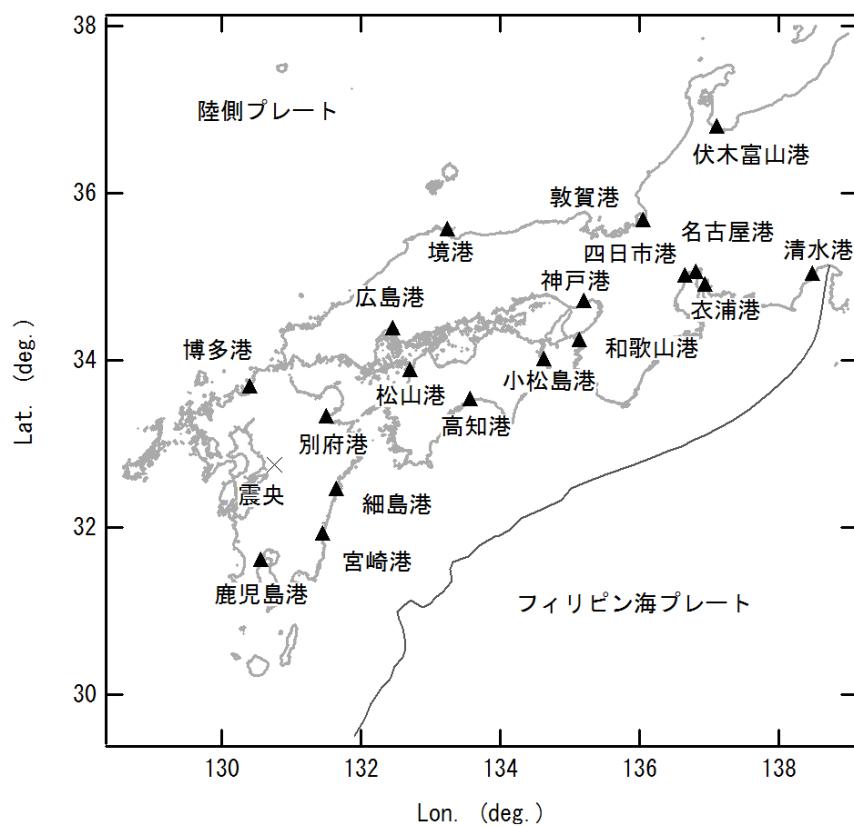


図-3.2 本震の強震記録が得られた港湾

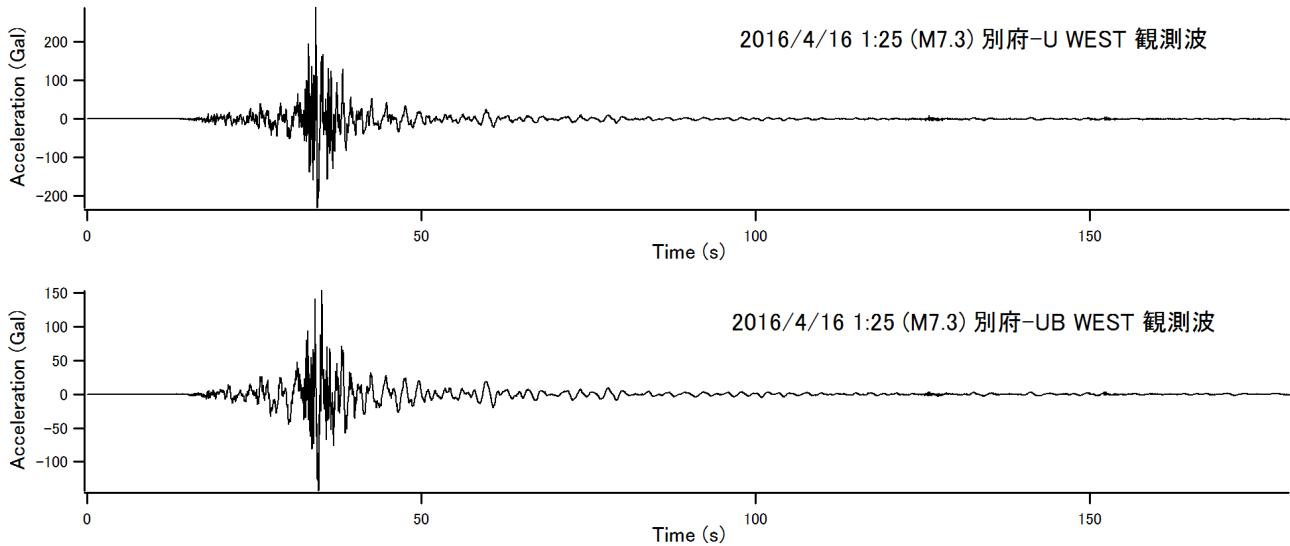


図-3.3 本震時における別府港強震観測地点の地表（上）と地中（下）における東西成分の加速度波形の比較

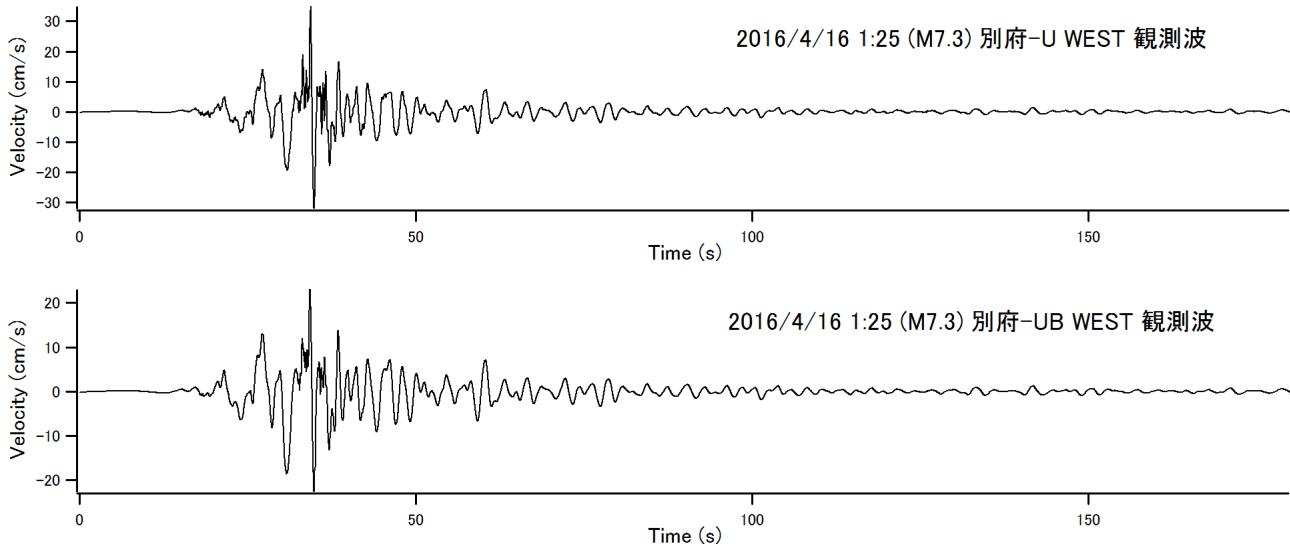


図-3.4 本震時における別府港強震観測地点の地表（上）と地中（下）における東西成分の速度波形の比較

の方が大きい。

なお、本震による強震動の継続時間中には大分県湯布院付近において誘発地震が発生したことが指摘されており¹⁶⁾、これが別府港において最大加速度の大きな揺れが観測された理由であると考えられる。震央付近における断層の破壊と別府港における最大加速度との間には直接の因果関係はない。

3.2 港湾・空港の推定地震動

熊本空港と熊本港における地震動の推定には、文献¹⁷⁾で作成した特性化震源モデルを用いた。特性化震源モデルとは、断層面上に一つまたは複数の長方形のアスペリティ（断層面上で特に強い地震波を出す部分）を置いたモデルである。

る。文献¹⁷⁾の特性化震源モデルは、前震と本震に対して作成されており、特に熊本空港と熊本港における地震動の事後推定を念頭におき、これらに近い強震観測地点での地震動を適切に再現できるように設定されているため、これらの地点における地震動の事後推定に適していると考えられる。

（1）熊本空港における前震の推定地震動

図-3.5 に前震の震源断層と熊本空港の位置関係を示す。同図に示すように、熊本空港は防災科学技術研究所の強震観測点である KMMH16 と KMM005 に挟まれるような位置にあるため、熊本空港における地震動の事後推定に用いる震源モデルは、これらの地点における地震動を適切に再現できることが重要である。

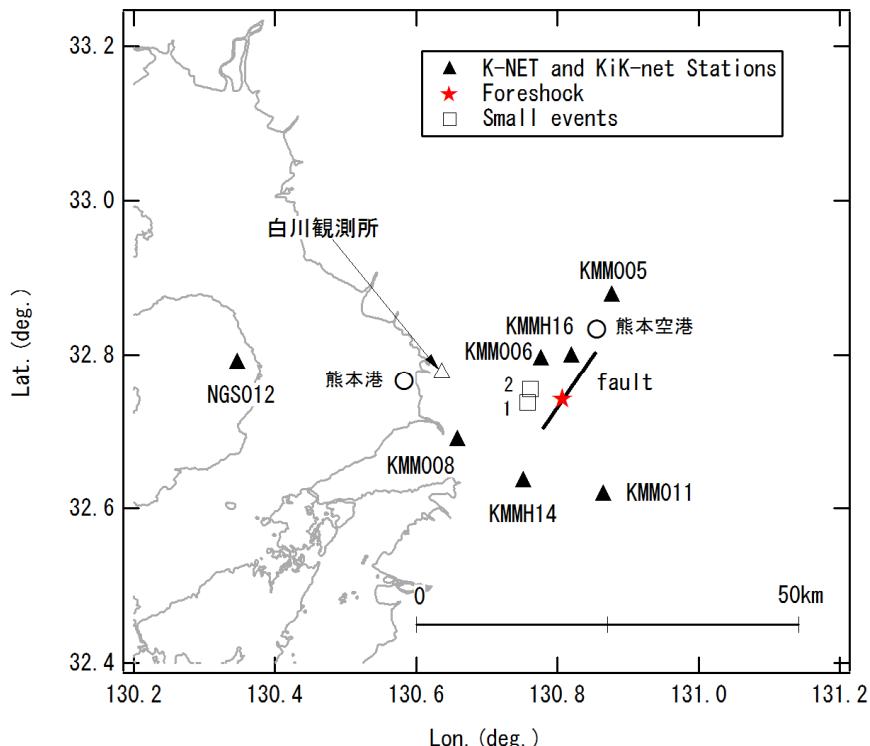


図-3.5 前震の震源断層と熊本空港および熊本港の位置関係. ★は前震の震央 (気象庁), □は地震動の推定に用いた小地震の震央 (気象庁), ▲は震源モデルの作成に用いた強震観測地点をそれぞれ示す.

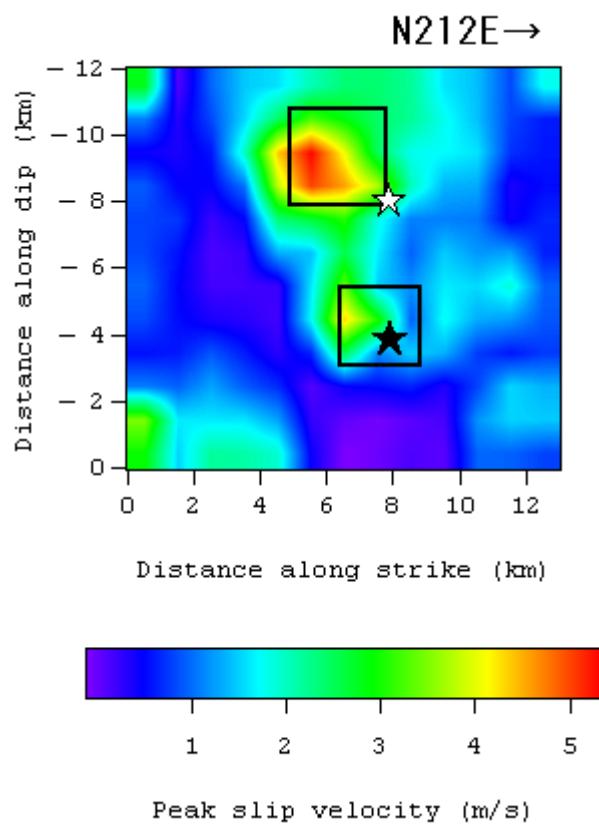


図-3.6 前震の特性化震源モデル¹⁷⁾. コンターは断層面上の各部分のすべり速度の大きさを表しており, 特性化震源モデルではこれを単純化して長方形の部分 (2箇所) から強震動が生成されるとしている.

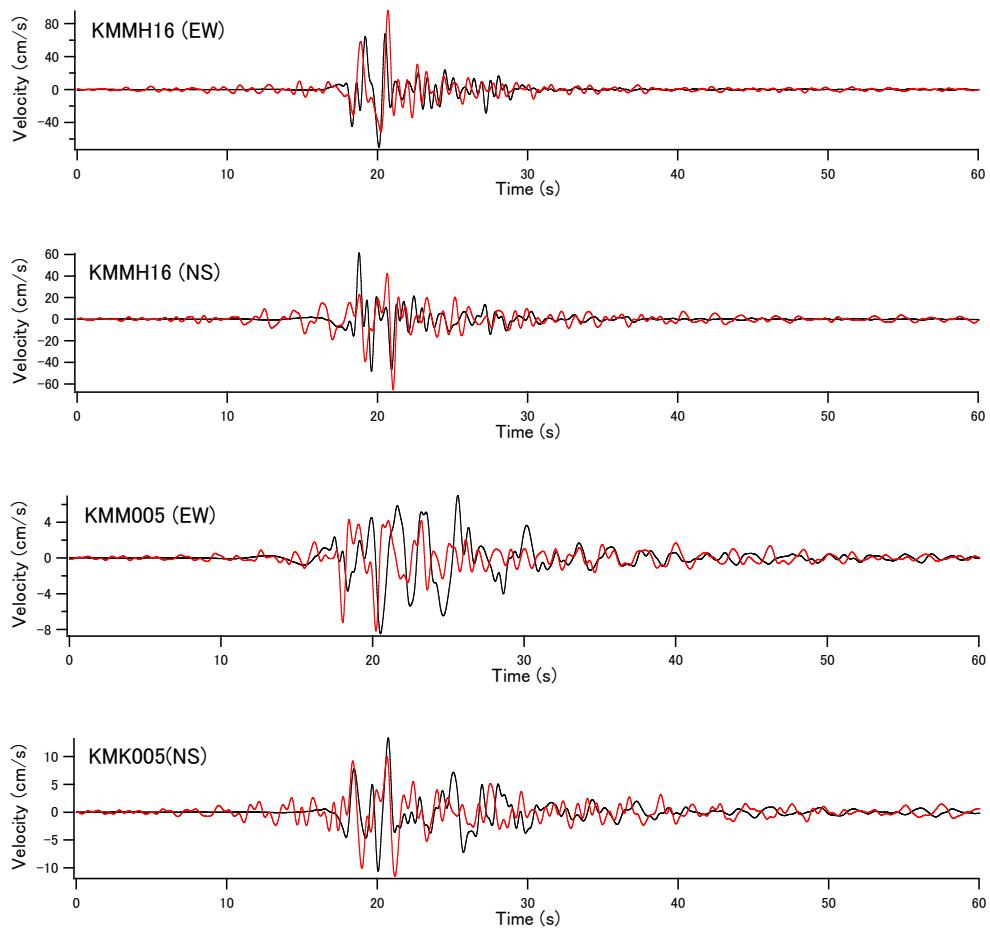


図-3.7 前震の特性化震源モデルによる KMMH16 と KMM005 における速度波形 (0.2-2Hz) の再現結果. 縦軸: 速度, 横軸: 時間, 黒: 観測結果, 赤: 計算結果.



写真-3.1 熊本空港における地震計設置状況 (2010 年) (その 1)



写真-3.2 熊本空港における地震計設置状況（2010 年）（その 2）



写真-3.3 熊本空港における地震計設置状況（2010 年）（その 3）

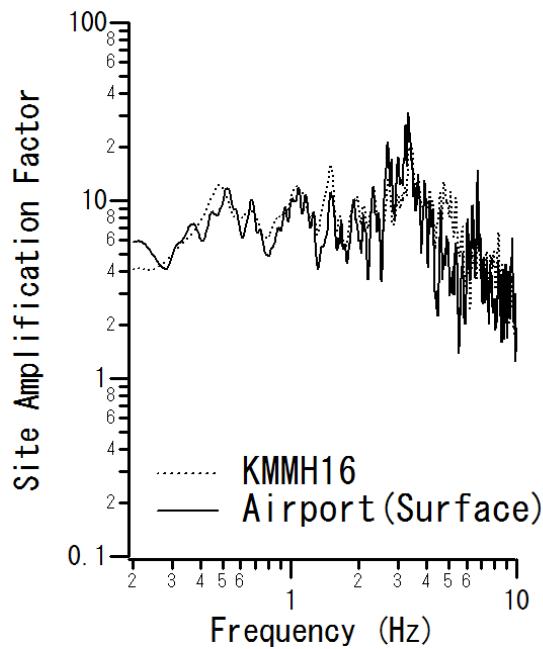


図-3.8 熊本空港におけるサイト增幅特性（地震基盤～地表）（実線）とKMMH16地点におけるサイト增幅特性（地震基盤～地表）¹⁸⁾（破線）の比較、縦軸：サイト增幅特性、横軸：周波数

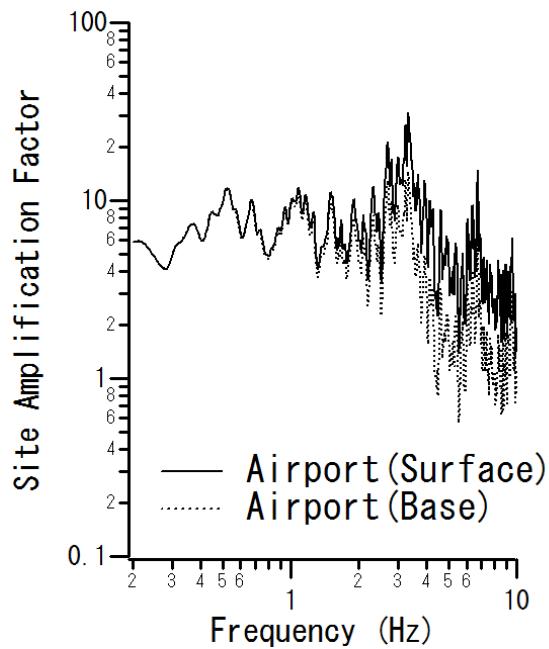


図-3.9 熊本空港におけるサイト增幅特性（地震基盤～工学的基盤）（破線）とサイト增幅特性（地震基盤～地表）（実線）の比較、縦軸：サイト增幅特性、横軸：周波数

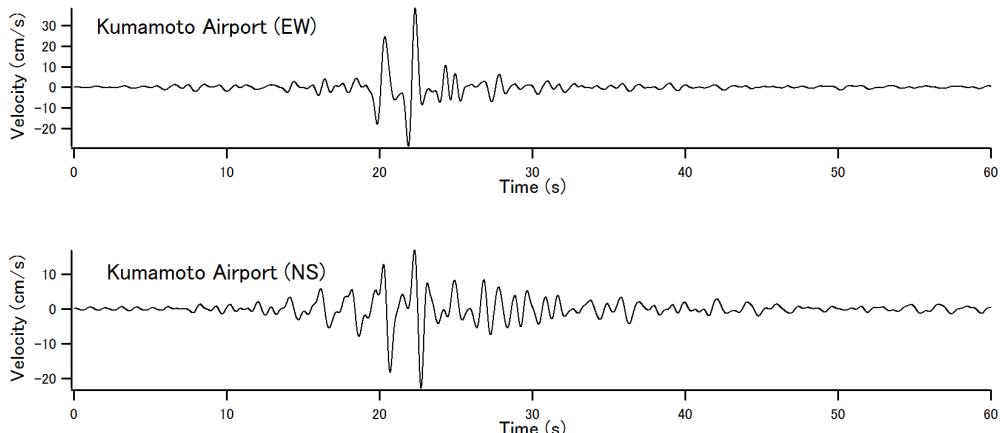


図-3.10 前震の特性化震源モデルによる熊本空港の工学的基盤（S波速度450m/s）における速度波形（0.2-2Hz）の推定結果。縦軸：速度、横軸：時間。

図-3.6に前震の特性化震源モデル¹⁷⁾を示す。同図に示すように、破壊開始点付近と、破壊開始点より3kmほど北東側の浅い位置にアスペリティを有する特性化震源モデルが得られている。この震源モデルによるKMMH16とKMM005における速度波形（0.2-2Hz）の再現結果を図-3.7に示す。なお、これらの計算では、各々の地点における経験的なサイト增幅特性と位相特性を考慮している。計算手順の詳細は文献¹⁷⁾を参照されたい。図-3.6の震源モデルにより、熊

本空港を挟む位置にあるKMMH16とKMM005では、波形の振幅や経時特性がうまく再現されている。したがって、この震源モデルにより熊本空港における地震動を精度良く推定できることが期待できる。その際、アスペリティから対象地点までの距離の違いの影響も考慮できる。そこで、この震源モデルを用いて、熊本空港における前震の地震動の推定を行った。

熊本空港における地震動の推定には、経験的サイト增幅

特性と位相特性が必要である。このうちサイト增幅特性については、九州地方整備局が 2009 年 12 月～2010 年 6 月にかけて熊本空港で地震観測を行い、その結果に基づいてサイト增幅特性を推定しているので、ここではその結果を用いた。写真-3.1～写真 3.3 に地震計設置状況を示す。地震計は九州地方整備局事務所の車庫内に設置された。観測の結果、25 地震の記録が得られ、このうち 2010 年 1 月 25 日大隅半島東方沖の地震（M5.4）、2010 年 2 月 27 日沖縄本島近海の地震（M7.2）および 2010 年 5 月 13 日大分県北部の地震（M4.7）の 3 地震の記録が、SN 比などの観点でサイト增幅特性の評価に適した記録として抽出された。そこで、これらの記録について KMMH16 地点とのフーリエスペクトル比をとり、その対数平均を KMMH16 地点におけるサイト增幅特性¹⁸⁾に乘じることにより、熊本空港におけるサイト增幅特性（地震基盤～地表）が評価されている（図-3.8）。そして、地盤モデルに基づく工学的基盤～地表の伝達関数でこれを割ることにより、熊本空港におけるサイト增幅特性（地震基盤～工学的基盤）が評価されている（図-3.9）。これを熊本空港における地震動の推定に用いた。なお、ここで言う工学的基盤は S 波速度 450m/s の地層である。参考までに図-3.8 では熊本空港におけるサイト增幅特性（地震基盤～地表）と KMMH16 地点におけるサイト增幅特性（地震基盤～地表）の比較を行っているが、これらは大きく異なるものとはなっていない。

位相特性については、熊本空港における地震観測記録は限られていること、熊本空港におけるサイト增幅特性と KMMH16 地点におけるサイト增幅特性が大きくは異なることから、KMMH16 で観測された中小地震記録を KMMH16 における地盤モデルで工学的基盤に引き戻し、その位相特性を用いた。KMMH16 での検層結果を用い、S 波速度 500m/s の地層まで地震波を引き戻した。使用したのは、KMMH16 と KMM005 での地震動の再現にも用いた 2016 年 4 月 15 日 0:50 の地震（図-3.5 の番号 1 の地震）の記録である。

以上のほか、熊本空港における前震の地震動の推定における条件として、地震動の水平 2 成分の振幅比を決めるための係数である PRTITN は、KMMH16 における地震動の再現計算に準じ、EW 成分に対し 0.80、NS 成分に対し 0.60 とした。座標は（32.8367N, 130.8542E）とした。

前震の特性化震源モデルによる熊本空港における速度波形（0.2-2Hz）の推定結果を図-3.10 に示す。KMMH16 での観測波（図-3.7）と同様、アスペリティの破壊に起因するパルスが見られるが、アスペリティからの距離の違いの影

響により、パルスの振幅は KMMH16 よりも小さくなっている。PSI 値は EW 成分が 34cm/s^{0.5}、NS 成分が 26cm/s^{0.5} となつた。

（2）熊本空港における本震の推定地震動

図-3.11 に本震の震源断層と熊本空港の位置関係を示す。図-3.12 に本震の特性化震源モデル¹⁷⁾を示す。同図に示すように、破壊開始点より 5km ほど北東側にアスペリティ 1 とアスペリティ 2、破壊開始点より 15km ほど北東側にアスペリティ 3 の計 3 つのアスペリティを有する特性化震源モデルが得られている。この震源モデルによる KMMH16 と KMM005 における速度波形（0.2-2Hz）の再現結果を図-3.13 に示す。これらの計算では、前震と同様、各々の地点における経験的なサイト增幅特性と位相特性を考慮している¹⁷⁾。図-3.12 の震源モデルにより、熊本空港を挟む位置にある KMMH16 と KMM005 では、KMMH16 における水平 2 成分の小さい方である NS 成分を除けば、波形の振幅や経時特性がうまく再現されている。したがって、この震源モデルを用いれば、熊本空港における本震の地震動を精度良く推定できると考えた。

熊本空港における地震動の推定には、経験的サイト增幅特性と位相特性が必要である。このうちサイト增幅特性は前震と同様のものを用いた。位相特性についても、前震と同様、KMMH16 で観測された 2016 年 4 月 15 日 0:50 の地震（図-3.11 の番号 1 の地震）の記録を KMMH16 の地盤モデルで工学的基盤に引き戻したものを用いた。震源モデルの作成でも KMMH16 に対してこの地震の記録を用いている。以上のほか、熊本空港における本震の地震動の推定における条件として、地震動の水平 2 成分の振幅比を決めるための係数である PRTITN は、KMMH16 における地震動の再現計算に準じ、アスペリティ 1, 2 に対しては EW 成分が 0.90、NS 成分が 0.44、アスペリティ 3 に対しては EW 成分、NS 成分ともに 0.71 とした。座標は（32.8367N, 130.8542E）とした。

本震の特性化震源モデルによる熊本空港における速度波形（0.2-2Hz）の推定結果を図-3.14 に示す。KMMH16 での観測波（図-3.13）と比較すると、振幅は小さめとなつていて、また、アスペリティ 1, 2 の影響が相対的に小さくなつておらず、アスペリティ 3 の影響が相対的に大きくなっている。PSI 値は EW 成分が 53cm/s^{0.5}、NS 成分が 41cm/s^{0.5} となつた。

（3）熊本港における前震の推定地震動

前震の震源断層と熊本港の位置関係を図-3.5 に示す。前震の特性化震源モデル（図-3.6）の作成においては、震源

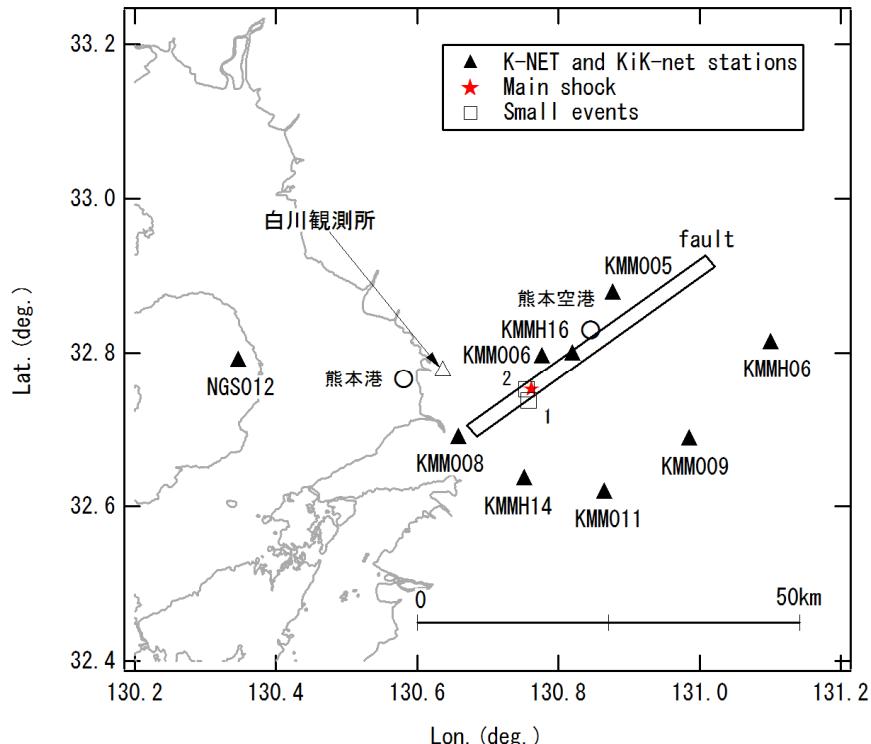


図-3.11 本震の震源断層と熊本空港および熊本港の位置関係. ★は本震の震央（気象庁）, □は地震動の推定に用いた小地震の震央（気象庁）, ▲は震源モデルの作成に用いた強震観測地点をそれぞれ示す.

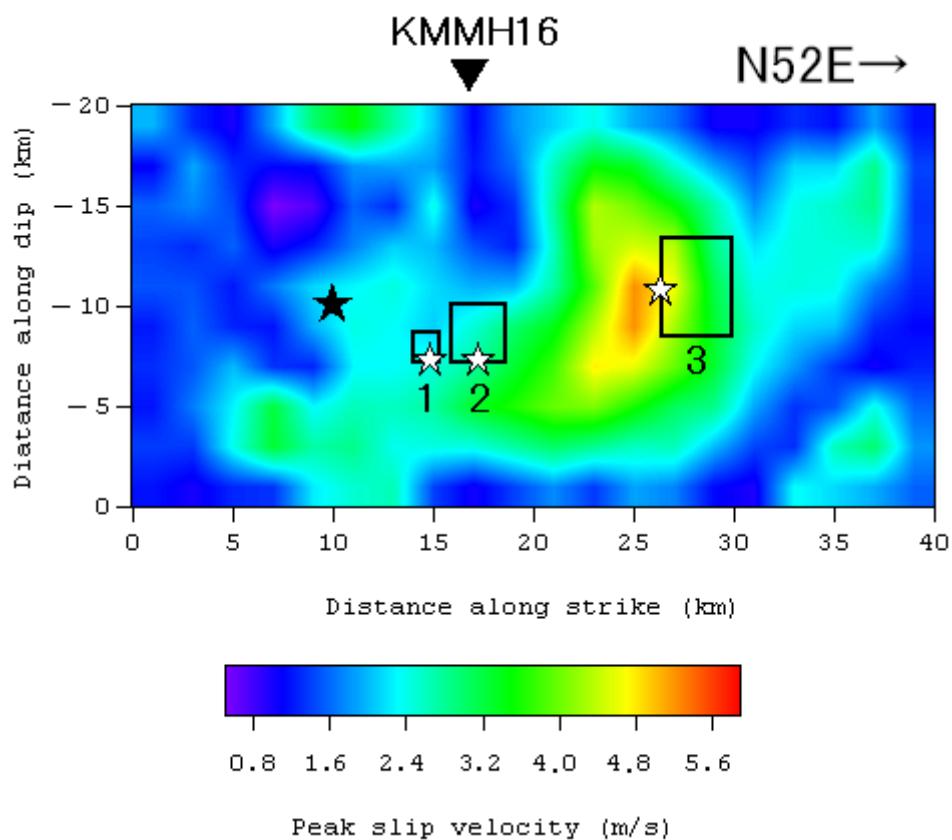


図-3.12 本震の特性化震源モデル¹⁷⁾. コンターは断層面上の各部分のすべり速度の大きさを表しており, 特性化震源モデルではこれを単純化して長方形の部分（2箇所）から強震動が生成されるとしている.

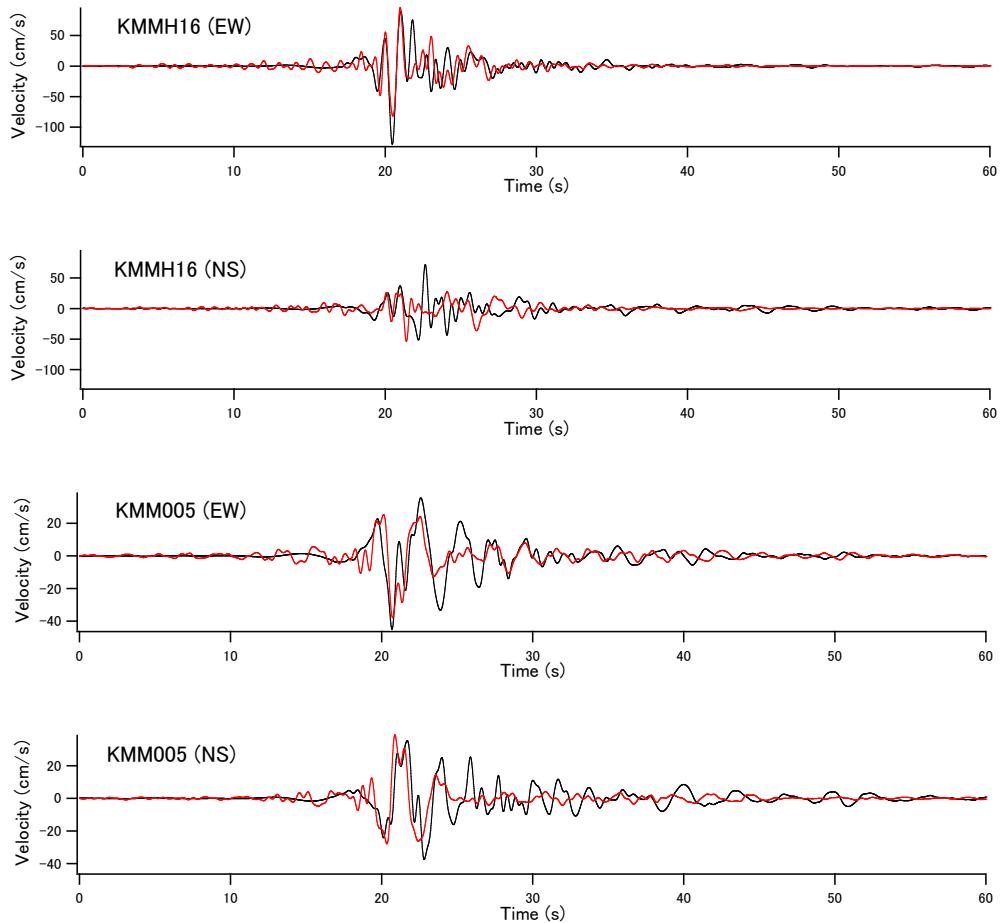


図-3.13 本震の特性化震源モデルによる KMMH16 と KMM005 における速度波形 (0.2-2Hz) の再現結果. 縦軸: 速度, 横軸: 時間, 黒: 観測結果, 赤: 計算結果.

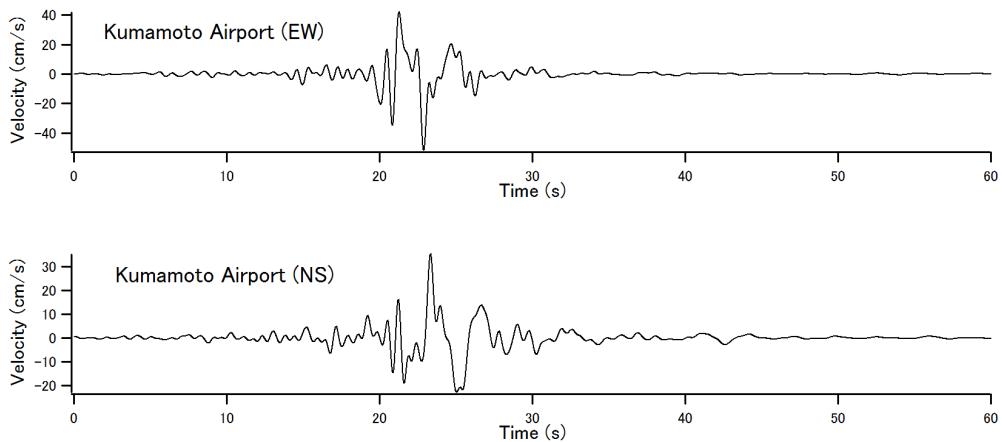


図-3.14 本震の特性化震源モデルによる熊本空港の工学的基盤 (S 波速度 450m/s) における速度波形 (0.2-2Hz) の推定結果. 縦軸: 速度, 横軸: 時間.

から見て熊本港と近い方向にある防災科学技術研究所の強震観測点である KMM008 と NGS012 における地震動の再現性に注意を払っている. 前震の特性化震源モデルによる

KMM008 と NGS012 における速度波形 (0.2-2Hz) の再現結果を図-3.15 に示す. これらの地点では, 波形の振幅や経時特性がうまく再現されている. なお, 地震動を計算する

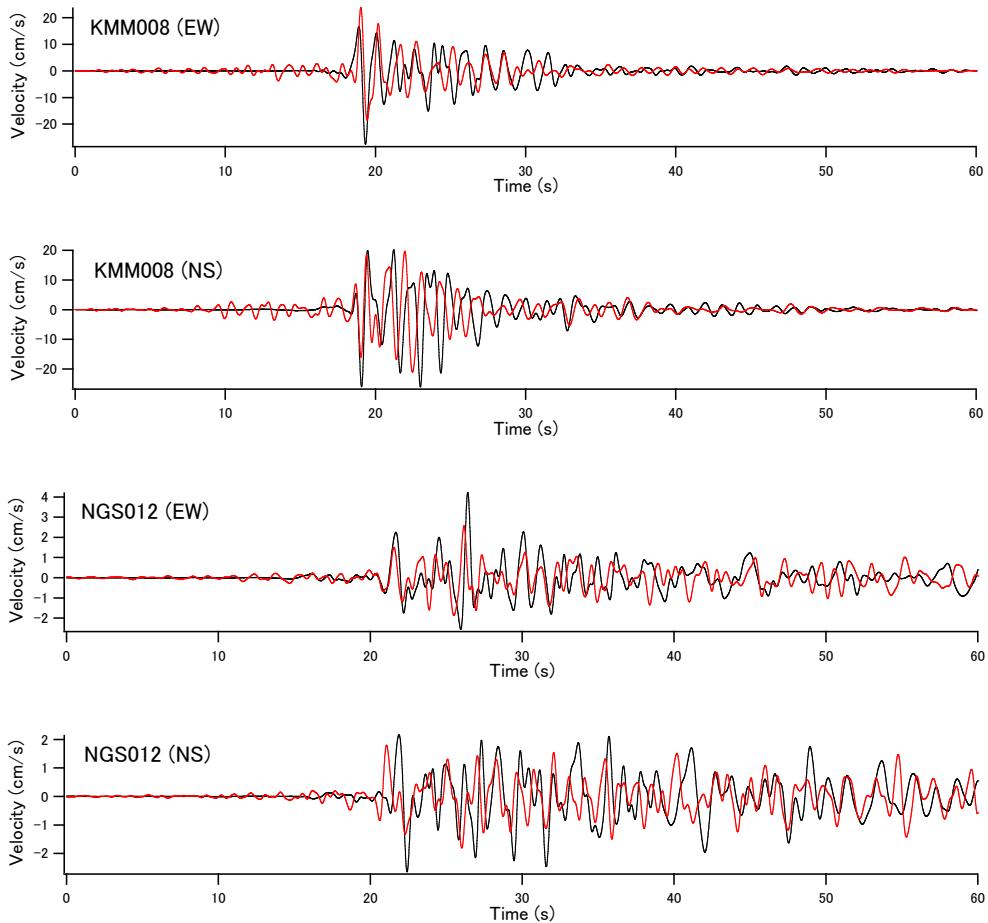


図-3.15 前震の特性化震源モデルによるKMM008とNGS012における速度波形(0.2-2Hz)の再現結果. 縦軸:速度, 横軸:時間, 黒:観測結果, 赤:計算結果.

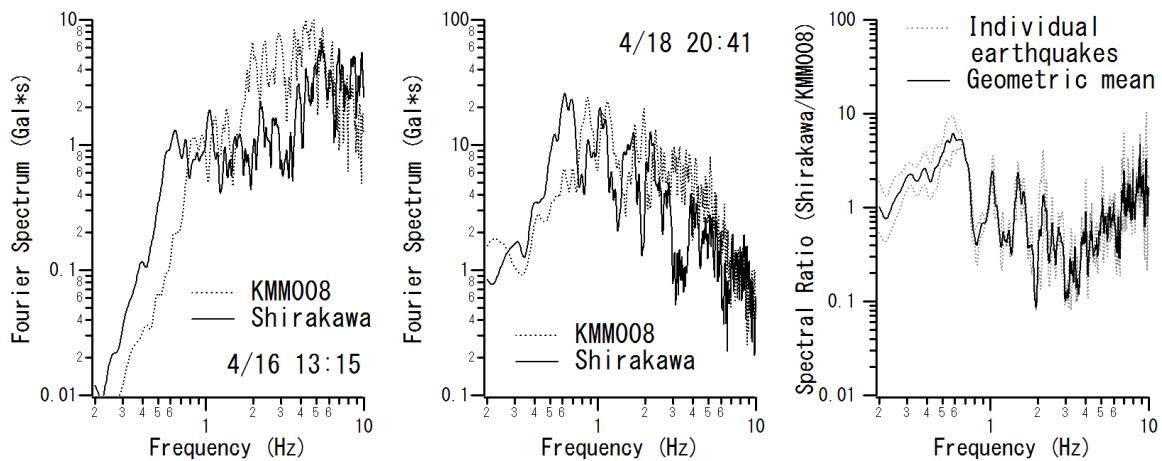


図-3.16 白川観測所とKMM008でのフーリエスペクトル. (左) 2016年4月16日13:15の地震(M3.9)のフーリエスペクトル. (右) 2016年4月18日20:41の地震(M5.8)のフーリエスペクトル, 縦軸:フーリエスペクトル, 横軸:周波数, 破線:KMM008地点におけるフーリエスペクトル, 実線:白川観測所GL-8mにおけるフーリエスペクトル.

図-3.17 白川観測所とKMM008でのフーリエスペクトルの比. 縦軸:フーリエスペクトル比, 横軸:周波数, 破線:個別の地震に対するフーリエスペクトル比, 実線:フーリエスペクトル比の対数平均.

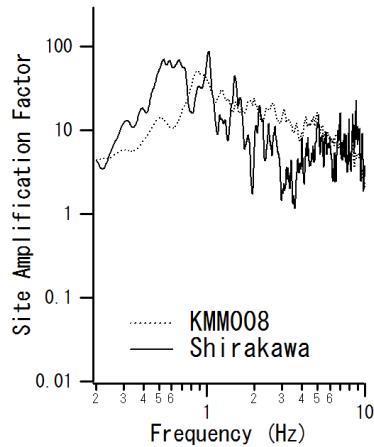


図-3.18 白川観測所 GL-8m におけるサイト增幅特性, 縦軸: サイト增幅特性, 横軸: 周波数, 破線: KMM008 におけるサイト增幅特性 (地震基盤～地表), 実線: 白川観測所におけるサイト增幅特性 (地震基盤～GL-8m).

にあたり, KMM008 では多重非線形効果を考慮する方法¹⁹⁾を用いており, その際必要となるパラメタのうち, 堆積層における平均的な S 波速度の低下率を表すパラメタである v_1 は 0.95, 堆積層における平均的な減衰定数の増分を表すパラメタである v_2 は 0.01 としている.

また, これらの地点に加えて, 熊本港により近い地点である熊本河川国道事務所の白川観測所 (図-3.5) における強震記録を利用する機会を得たので, この地点における地震動の再現性を確認した. 白川観測所では堤防天端以外で最も浅い位置での記録として GL-8m の記録を用いた. 白川観測所と KMM008 で同時に得られている記録として, 2016 年 4 月 16 日 13:15 の地震 (M3.9) と 2016 年 4 月 18 日 20:41 の地震 (M5.8) の記録を利用できたので, この 2 地震に対し, 両地点間のフーリエスペクトル比を計算し (図-3.16～図-3.17), その対数平均を KMM008 地点におけるサイト增幅特性¹⁸⁾に乘じることにより, 白川観測所 GL-8m におけるサイト增幅特性を評価した (図-3.18).

このサイト增幅特性を用い, 位相特性は他の地点と同様に 2016 年 4 月 15 日 0:50 の記録を用いて, 白川観測所における前震の地震動の再現計算を実施した. その結果, 線形の計算では継続時間が過大評価されたため, 多重非線形効果を考慮する方法¹⁹⁾を用いた. 非線形性を表現するパラメタは, 観測記録ができるだけ再現できるように設定することとし, 結果的に $v_1=0.95$, $v_2=0.01$ とした. 地震動の水平 2 成分の振幅比を決めるための係数である $PRTITN$ についても, 観測記録ができるだけ再現できるように設定すること

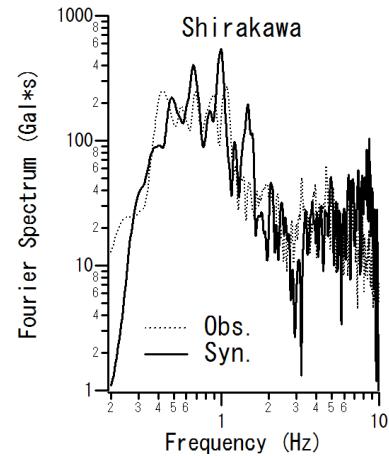


図-3.19 前震の特性化震源モデルによる白川観測所 GL-8m におけるフーリエスペクトルの再現結果. 縦軸: フーリエスペクトル, 横軸: 周波数, 破線: 観測結果, 実線: 計算結果.

とし, 結果的に EW 成分に対し 0.85, NS 成分に対し 0.53 とした.

図-3.19, 図-3.20 に結果を示す. 後続位相の振幅は EW 成分が過大評価気味, NS 成分が過小評価気味ではあるが, 全体的に波形の再現性は良い.

白川観測所は他の強震観測点に比べ熊本港に近く, 軟弱地盤の堆積した地点という意味でも他の強震観測点に比べ熊本港との類似性があると考えられるため, 白川観測所での地震動の再現に用いたパラメタを参考に, 熊本港での地震動の推定を行った. すなわち非線形性を表現するパラメタは $v_1=0.95$, $v_2=0.01$, $PRTITN$ は EW 成分に対し 0.85, NS 成分に対し 0.53 とした. サイト增幅特性は熊本港での地震観測結果に基づくもの²⁰⁾を用い, 位相特性は, 熊本港での余震観測記録のうち, 2016 年 4 月 30 日 3:59 の地震 (M3.9) の記録を, 熊本港の地盤モデル²⁰⁾で工学的基盤に引き戻したもの用いた. ここで言う工学的基盤は S 波速度 338m/s の地層である.

前震の特性化震源モデルによる熊本港における速度波形 (0.2-2Hz) の推定結果を図-3.21 に示す. PSI 値は EW 成分が 34cm/s^{0.5}, NS 成分が 24cm/s^{0.5} となった.

(4) 熊本港における本震の推定地震動

本震の震源断層と熊本港の位置関係を図-3.11 に示す. 本震の特性化震源モデル (図-3.12) の作成においても, 震源から見て熊本港と近い方向にある KMM008 と NGS012 における地震動の再現性に注意を払っている. 本震の特性化震源モデルによる KMM008 と NGS012 における速度波形

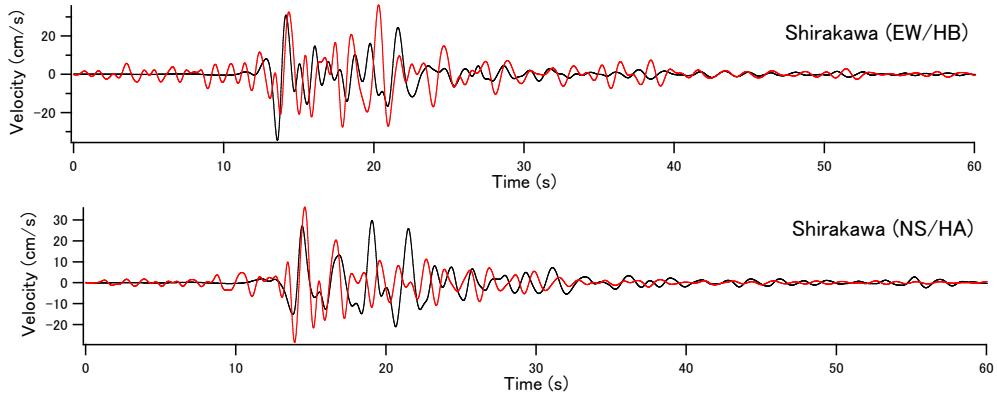


図-3.20 前震の特性化震源モデルによる白川観測所 GL-8m における速度波形 (0.2-2Hz) の再現結果. 縦軸: 速度, 横軸: 時間, 黒: 観測結果, 赤: 計算結果.

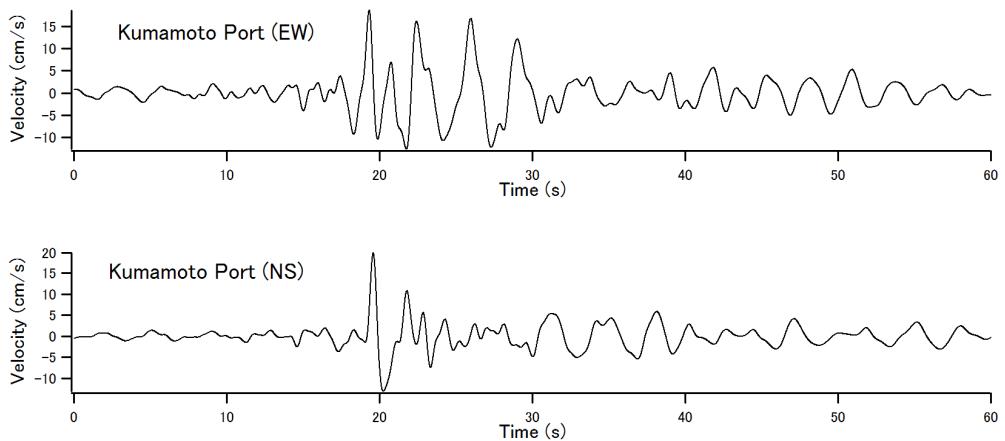


図-3.21 前震の特性化震源モデルによる熊本港の工学的基盤 (S 波速度 338m/s) における速度波形 (0.2-2Hz) の推定結果. 縦軸: 速度, 横軸: 時間.

(0.2-2Hz) の再現結果を図-3.22 に示す. これらの地点では, 波形の振幅や経時特性がうまく再現されている. なお, 地震動を計算するにあたり, KMM008 では多重非線形効果を考慮する方法¹⁹⁾を用いており, 非線形性を表現するパラメタは $v_1=0.92$, $v_2=0.005$ としている.

また, これらの地点に加えて, 前震と同様, 白川観測所(図-3.11)における地震動の再現性を確認した. 白川観測所では前震と同様 GL-8m の記録を用いた. サイト增幅特性は前震と同様のもの(図-3.18)を用い, 位相特性も前震と同様に 2016 年 4 月 15 日 0:50 の記録を用いて, 白川観測所における本震の地震動の再現計算を実施した. 多重非線形効果を考慮する方法¹⁹⁾を用い, 非線形性を表現するパラメタは, 観測記録ができるだけ再現できるように設定することとし, 結果的に $v_1=0.86$, $v_2=0.10$ とした. 地震動の水平 2 成分の振幅比を決めるための係数である $PRTITN$ についても, 観測記録ができるだけ再現できるように設定すること

とし, 結果的に EW 成分に対し 0.85, NS 成分に対し 0.53 とした. 図-3.23, 図-3.24 に結果を示す. 全体的に波形の再現性は良い.

熊本港での地震動の推定に用いるパラメタは, 前震と同様, 白川観測所での地震動の再現に用いたパラメタを参考に設定することとし, 非線形性を表現するパラメタは $v_1=0.86$, $v_2=0.10$, $PRTITN$ は EW 成分に対し 0.85, NS 成分に対し 0.53 とした. サイト增幅特性は前震と同様のもの²⁰⁾を用い, 位相特性は, 熊本港での余震観測記録のうち, 2016 年 4 月 16 日 21:05 の地震 (M4.4) の記録を, 熊本港の地盤モデル²⁰⁾で工学的基盤に引き戻したものを用いた. ここで言う工学的基盤は S 波速度 338m/s の地層である.

本震の特性化震源モデルによる熊本港における速度波形 (0.2-2Hz) の推定結果を図-3.25 に示す. PSI 値は EW 成分が $99\text{cm/s}^{0.5}$, NS 成分が $35\text{cm/s}^{0.5}$ となった.

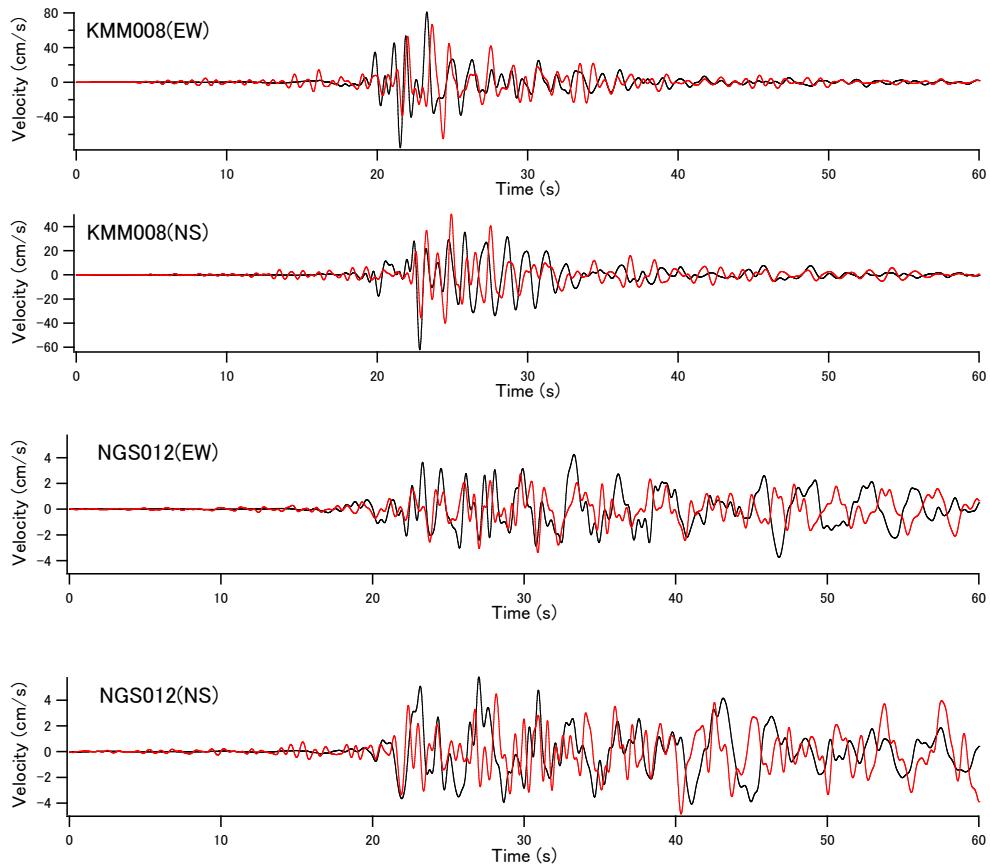


図-3.22 本震の特性化震源モデルによる KMM008 と NGS012 における速度波形 (0.2-2Hz) の再現結果. 縦軸: 速度, 横軸: 時間, 黒: 観測結果, 赤: 計算結果.

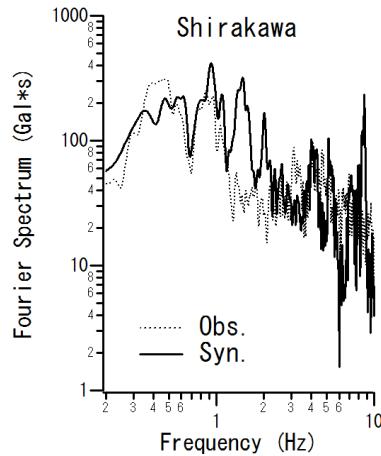


図-3.23 本震の特性化震源モデルによる白川観測所 GL-8m におけるフーリエスペクトルの再現結果. 縦軸: フーリエスペクトル, 横軸: 周波数, 破線: 観測結果, 実線: 計算結果.

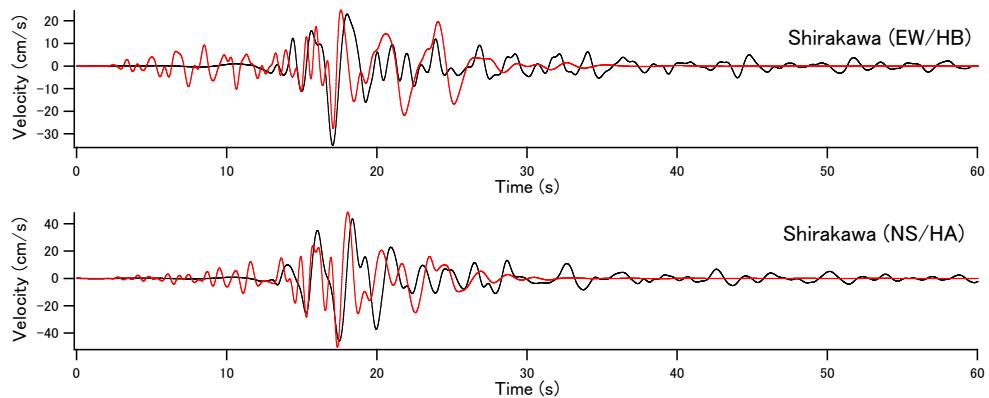


図-3.24 本震の特性化震源モデルによる白川観測所 GL-8m における速度波形 (0.2-2Hz) の再現結果. 縦軸: 速度, 横軸: 時間, 黒: 観測結果, 赤: 計算結果.

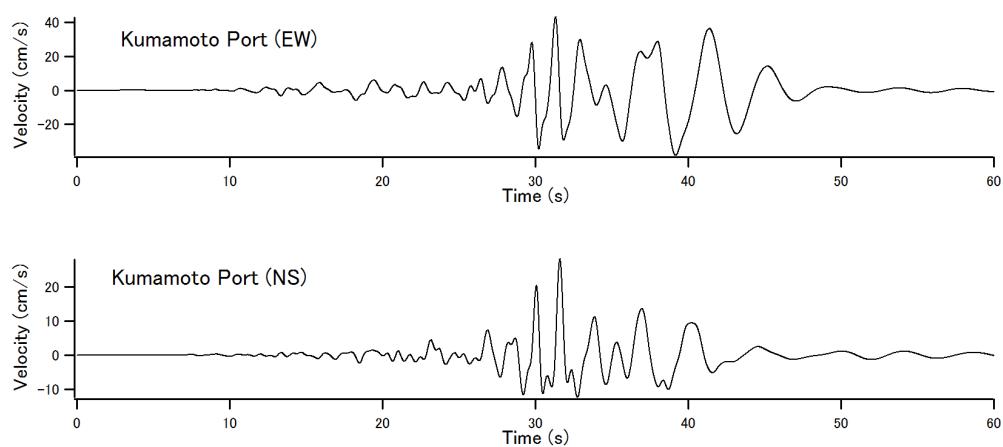


図-3.25 本震の特性化震源モデルによる熊本港の工学的基盤 (S 波速度 338m/s) における速度波形 (0.2-2Hz) の推定結果. 縦軸: 速度, 横軸: 時間.

4. 熊本港の被害

熊本港では本震当日の 4 月 16 日に調査を行った。熊本港における調査位置を図-4.1 に示す。



図-4.1 熊本港における調査位置 (国土地理院のデータをもとに作成)。①は岸壁 (-7.5m), ②はフェリーターミナル, ③は液状化による段差が見られた箇所, ④は液状化による噴砂の跡が見られた箇所。A, B は地震による残留水平変位の測量結果が得られている箇所 (本文参照)。

4.1 岸壁 (-7.5m) (重力式)

写真-4.1 は熊本港岸壁 (-7.5m, 設計震度0.15) (図-4.1の①) の法線上から西 (上の写真) および東 (下の写真) を見た状況である (-7.5mは岸壁水深を意味する)。この写真からもわかるとおり, 基本的に岸壁法線の出入りは小さく, 一見して被害は軽微であることがわかる。ただし, よく見ると, この写真を撮影している場所はその東西に比べて若干海側にはらみだしているように見える。このことは後述の測量結果でも裏付けられている。

当該岸壁にはガントリークレーンが搭載されているが, 陸側クレーンレールの基礎の陸側には写真-4.2 に示すとおり法線平行方向にクラックが生じていた。また, 陸側クレーンレールの基礎の海側には写真-4.3 に示すとおり 7cm 程度の段差が生じていた (陸側が相対的に沈下)。段差が生じた場所は標準断面図 (図-4.2) では矢印の箇所であり, ほぼケーン背面位置に相当する。

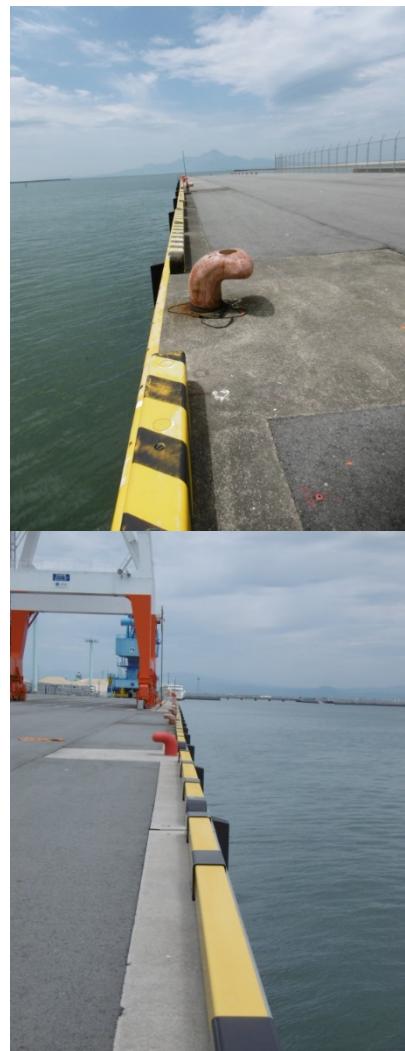


写真-4.1 岸壁 (-7.5m) (図-4.1 の①) の法線上から西 (上の写真) および東 (下の写真) を見た状況 (2016 年 4 月 16 日撮影)



写真-4.2 岸壁 (-7.5m) (図-4.1 の①) 背後の陸側クレーンレール基礎の陸側に生じたクラック (2016 年 4 月 16 日撮影)

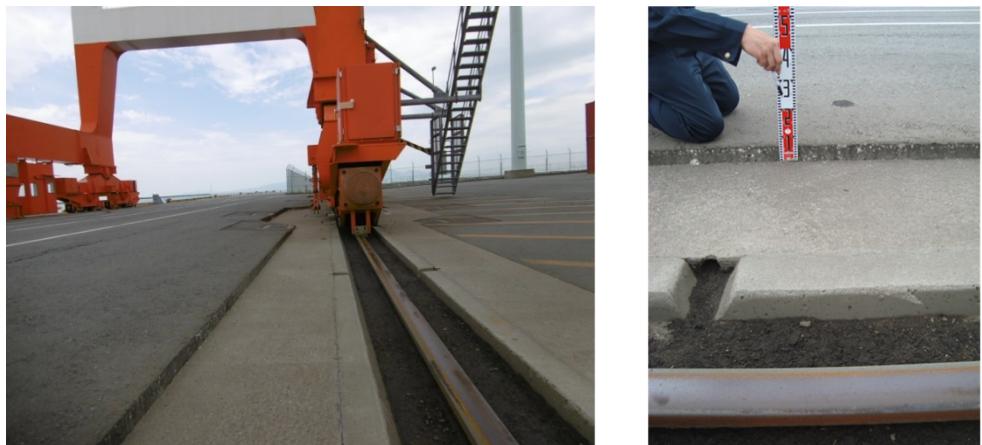


写真-4.3 岸壁（-7.5m）（図-4.1の①）背後の陸側クレーンレール基礎の海側に生じた段差（2016年4月16日撮影）

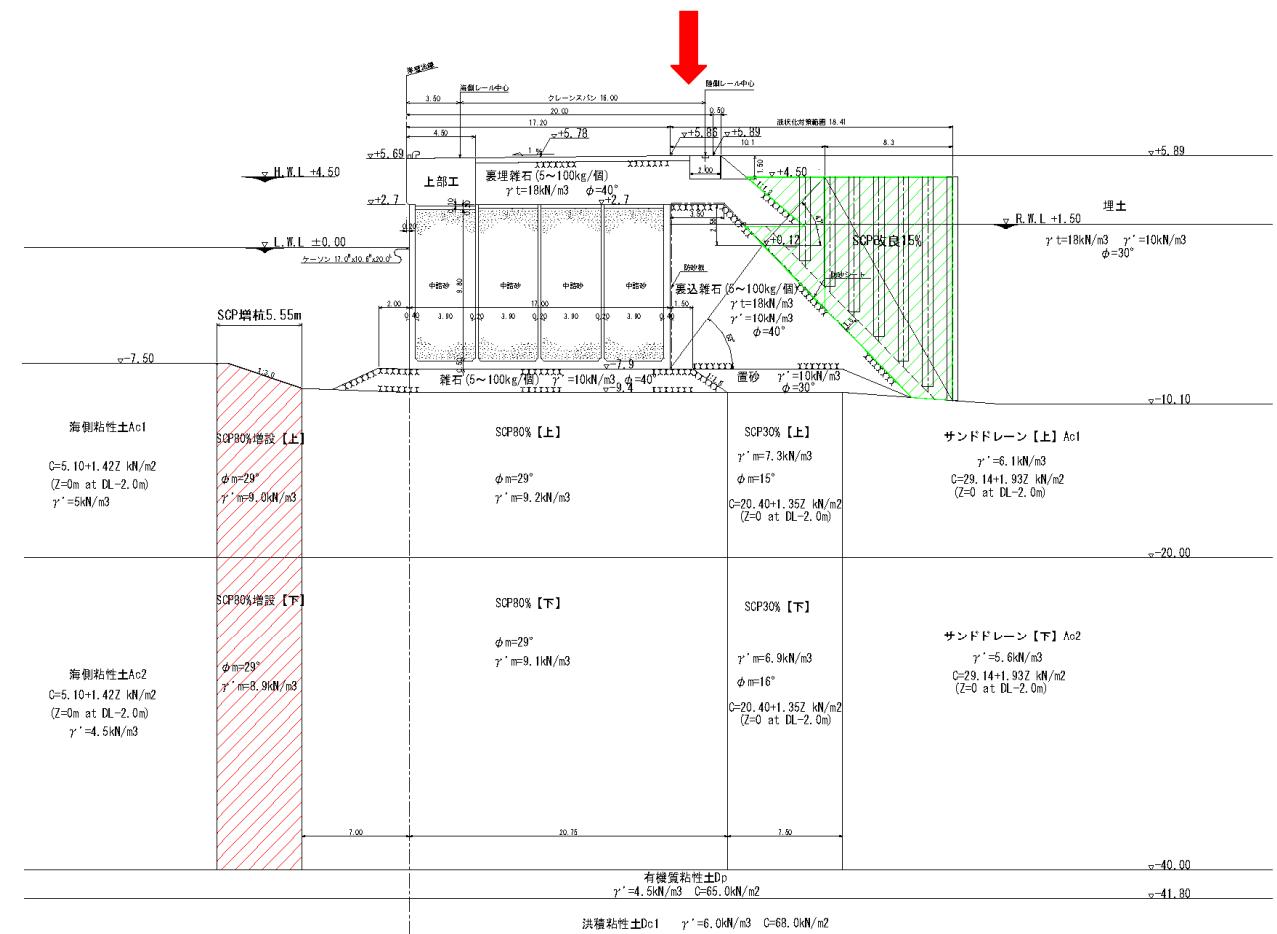


図-4.2 岸壁（-7.5m）標準断面図。ケーソン直下において沖積層下端まで改良率80%のSCPが施工されている。矢印の箇所に軽微な段差が生じた。

表-4.1 地殻変動の影響を控除した熊本港岸壁における残留水平変位（m）（座標は世界測地系）

	A 地点		B 地点	
	X 座標（北向き正）	Y 座標（東向き正）	X 座標（北向き正）	Y 座標（東向き正）
地震前座標 (2013 年 10 月)	-26300.946	-39119.976	-26255.940	-38570.744
地震後座標 (2017 年 1 月)	-26300.977	-39119.721	-26255.910	-38570.397
移動量	-0.031	+0.255	+0.030	+0.347
地殻変動による移動量（国土地理院ソフトにより算定）	+0.092	+0.287	+0.096	+0.293
岸壁周辺地盤の変形による移動量	-0.123	-0.032	-0.066	+0.054

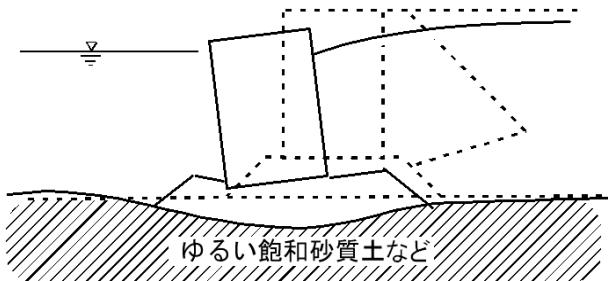


図-4.3 重力式岸壁の典型的な被害

過去において、強震動作用時の重力式岸壁の典型的な被害は、図-4.3 に示すとおり、基礎地盤が変形し、それに伴い、堤体に海側への水平変位と傾斜・沈下が生じるものである²¹⁾。堤体の海側への移動に伴い背後地盤は側方に伸張し、それに等しい体積分だけ沈下して、堤体と背後地盤との間に段差が生じる。堤体の水平変位が大きいほど背後の段差も大きい傾向がある。このような状況が極端な形をとつて表れたものが兵庫県南部地震による神戸港の被災事例である。熊本港岸壁（-7.5m）の変形は、神戸港の重力式岸壁の変形と比較してはるかに小さいが、同じモードの変形が生じていると考えられる。すなわち、堤体の海側への移動に伴い堤体背面に段差が生じたものと考えられる。なお、クレーンレールに顕著なたわみは認められなかった。

前震および本震において熊本港の工学的基盤にはかなりの強度を有する地震動が作用したと考えられる（3.2 の推定結果ではそれぞれ工学的基盤で PSI 値が 34cm/s^{0.5}、99cm/s^{0.5}）。それにも関わらず当該岸壁の被害が軽微であった要因としては、背後の液状化対策に加え、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改良率 80% の SCP が施工されていた（図-4.2）ことが大きいと考えられる。軟弱地盤対策として施工された SCP が地震に対しても効果を発揮することを示す貴重な事例と考えられる。

なお、岸壁（-7.5m）に近い図-4.1 の A の箇所と、より東側の B の箇所では、地殻変動の影響を考慮した残留水平

変位の測量結果が得られている（表-4.1）。まず、世界測地系における地震前の座標は 2013 年 10 月に得られており、地震後の座標は 2017 年 1 月に得られている。これらの差より、世界測地系における移動量が算出できるが、これは地殻変動による移動量と、岸壁周辺地盤の変形による移動量の和である。そこで、地殻変動による移動量を国土地理院ソフト PatchJGD により求め、これを控除することにより、最終的に岸壁周辺地盤の変形による移動量を求めている。それによると、岸壁（-7.5m）に近い A 地点では、南向きに 12.3cm、西向きに 3.2cm の変位が生じている。またフェリーターミナルに近い B 地点では南向きに 6.6cm、東向きに 5.4cm の変位が生じている。すなわち岸壁（-7.5m）付近はその東側よりも海側への移動量が大きかった。また、A 地点で西向きの、B 地点で東向きの変位が生じたのは、それぞれ海の方向に向かって変位が生じたためであると考えられる。A 地点で生じた南向きの変位の大きさ（12.3cm）と背後に生じた段差の大きさ（7cm 程度）は互いによく整合している。

4.2 フェリーターミナル

フェリーターミナル（図-4.1 の②）には車両の乗降に利用される可動橋が 2 カ所ある。これは、干満の差が激しい有明海において、フェリーの高さが上下することに対応するためのものであり、写真-4.4 に示すように左右の油圧シリンダによって桁を上げ下ろしする構造となっている。しかし、4 月 16 日の時点では 2 カ所とも桁を降ろすことができず、利用できない状態であった。これは、油圧シリンダを支える門型の構造物（門構）に、写真-4.5 の矢印の向きに残留変位が生じたことによるものである。

写真-4.4 の丸印の部分には、休止装置と言って、メンテナンスのために油圧シリンダを取り外す際に桁を架けておくための部品が存在する。この部分の詳細を示したもののが図-4.4 である。門構側のブラケット部にはピンがあり、休

止時にはピンを挿入することで、杭に固定されたフックを架けられるようになっている。當時はピンを抜いた状態となっており、杭を降ろす際には、フックがブラケット部のすき間を通る必要があるが、図-4.4 の矢印の向きに門構が変位したために、杭を降ろせなくなった。

可動橋基礎（設計震度 0.20）の平面図を図-4.5 に、断面図を図-4.6 にそれぞれ示す。これらの図に示すように、門構基礎は杭に支持された構造物となっている。門構基礎は図-4.5 の矢印に示す向きに変位したと考えられる。このことは、図-4.5 右の写真に示すように、門構基礎 I と接岸ドルフィン I の間のグレーチングが圧壊していることからも確認できる。

さて、一般に護岸付近の地盤は地震時に海に向かって変位する場合が多い。図-4.5 の平面図においては、変位の向きは護岸と平行であり一見不可解である。しかし、図-4.6 の断面図を見れば、左から右に向かって水深が深くなっている。地震時に左から右に向かう地盤の残留変位挙動が生じることは自然なことである。

以上のことから、可動橋の被災原因については次の通り整理できる。

- ①門構基礎の部分より接岸 ドルフィンの部分の方が水深が深いため、図-4.6 の左から右に地盤が動いた。
- ②それに伴い、門構基礎が右に向かって変位し（そのときグレーチングが圧壊）、その上に載っている門構が全体として右に動いた。
- ③その結果、杭を降ろすことができない状況となった。このように、一見すると構造物側の問題と見られる被害であっても、子細に見ると地盤が関係している点が港湾施設の被害の特徴である。

なお、4月15日朝（前震と本震の間）と4月16日朝（本震後）の1号（西側）可動橋と2号（東側）可動橋の休止装置の様子が撮影されており、それを並べたものが写真-4.6 である。1号可動橋と2号可動橋のいずれにおいても、前震によりすでに変位が生じていたこと、それが本震により拡大したことがわかる。なお、変位の向きは例外なく写真-4.5 の矢印の向きであった。



写真-4.4 フェリーターミナルの可動橋 (2016年4月16日撮影)



写真-4.5 門構の変位の向き (2016年4月16日撮影) (写真右手が西)



図-4.4 不具合の生じた休止装置部分（写真は2016年4月16日撮影）

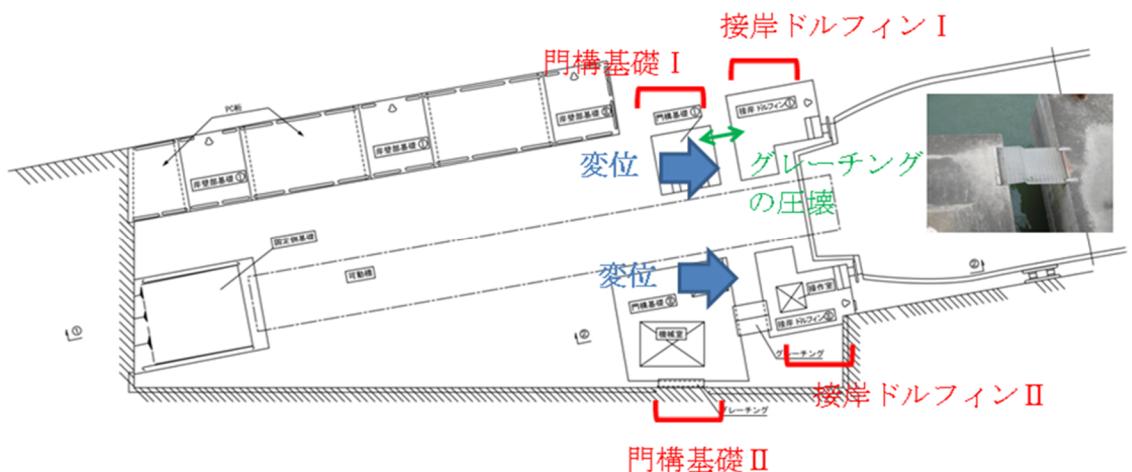


図-4.5 可動橋基礎平面図（図の右手が西）

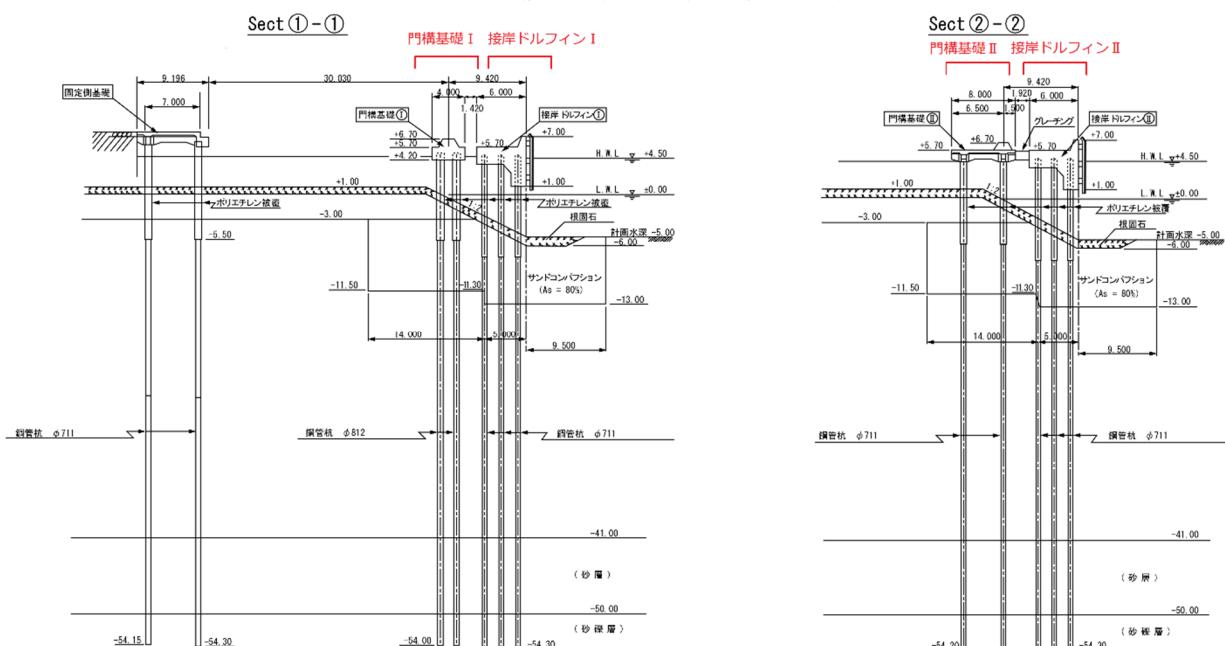


図-4.6 可動橋基礎断面図（図の右手が西）

2号（東側）可動橋（フェリーに向かって右側）



2号（東側）可動橋（フェリーに向かって左側）



1号（西側）可動橋（フェリーに向かって右側）



1号（西側）可動橋（フェリーに向かって左側）



写真-4.6 4月15日朝（前震と本震の間）（左）と4月16日朝（本震後）（右）における可動橋休止装置の様子

5. 別府港の被害

別府港での調査は本震発生翌々日の4月18日に実施した。別府市では4月16日の本震時において震度6弱を記録し、別府港強震観測点の地表において290Galの最大加速度を記録した（3.1）。4月14日の前震時は震度2、最大加速度16Galであり、地震動は小さかった。別府港における調査地点と

被害の概要を図-5.1に示す。別府港においては、石垣地区でやや被害があり、北浜地区海岸では新設護岸構造と旧護岸の境界付近でクラックがいくつか見られたが、被害は非常に軽微であった。以下では石垣地区での被害を中心に紹介する。また可動橋の被害について提供いただいた情報を掲載している。



図-5.1 別府港における調査地点と被害の概要

5.1 石垣地区第三埠頭岸壁（-12m）（重力式）

石垣地区第三埠頭岸壁（-12m）は1980年に供用が開始された岸壁である。標準断面図を図-5.2に示す。地域別震度0.1、地盤種別係数0.8、重要度係数1.2として、設計震度0.1で設計がなされている。

岸壁（-12m）の南側部分（-7.5m岸壁側；図-5.1の③）ではエプロン部（インターロッキング舗装）にクラックが発生していた（写真-5.1左）。クラック発生位置は岸壁法線から陸側に7~8m程度のところにあり、下部にあるケーン幅とおおよそ一致していた。クラックの延長はおおよそ数十mであった。岸壁（-7.5m）に最も近いインターロッキング舗装がされていない延長10m程度の箇所においても、同様に、法線から7~8m程度のところにクラックが見られた。ただし、このクラックは目地注入材のようなもので補修がされた跡があり、地震前からクラックが生じてい

て、地震によりそのクラックがやや広がったように見られた（写真-5.1右）。明確なクラックが見えていない部分も含め、ほぼバースの全延長にわたって、法線から7~8m程度のところから陸側がやや低くなるように勾配がついていたが（写真-5.2）、この勾配は地震前からついていたとの情報もある。岸壁法線の出入り等は見られなかった。

岸壁（-12m）の裏込石背後ではサンドコンパクションパイルによる液状化対策が行われており、噴砂等液状化の痕跡は見られなかった。一方、-12m岸壁のエプロン部よりさらに背後側の駐車場（図-5.1の②）においては、3か所程度で液状化の痕跡である噴砂が見られた（写真-5.3）。噴砂の粒径はかなり細粒でありシルト分に近かった。

岸壁（-12m）北側端部から西側の側面護岸（図-5.1の①）では10cm程度の護岸法線のずれが見られ、護岸の海側への移動が見られた（写真-5.4）。側面護岸上のコンクリー

ト舗装が護岸法線から背後地盤側に低くなっていた。

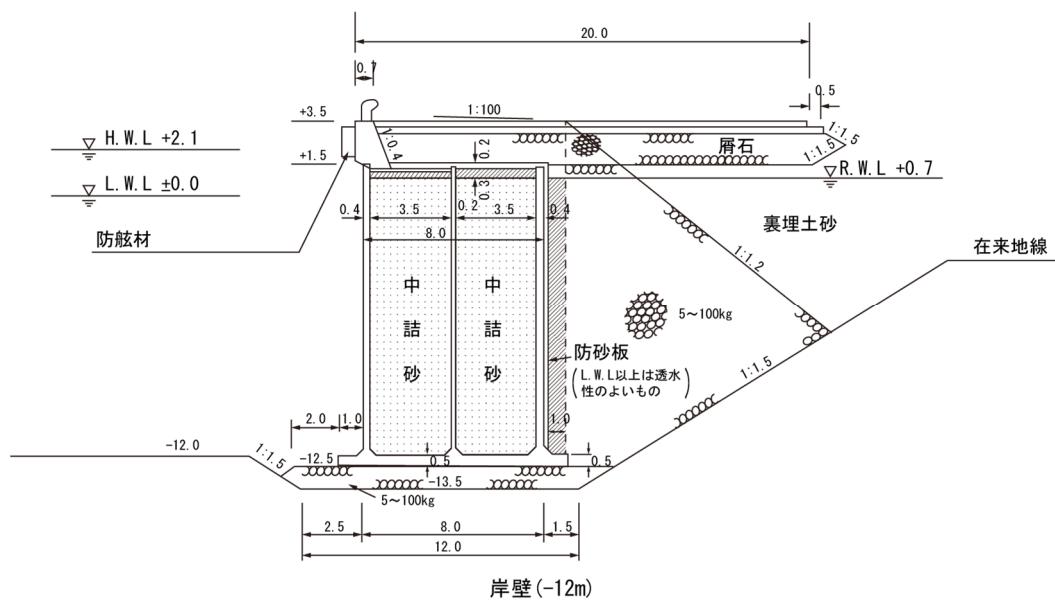


図-5.2 石垣地区第三埠頭岸壁 (-12m) 標準断面図



写真-5.1 石垣地区第三埠頭岸壁 (-12m) エプロン部のクラック (2016年4月18日撮影)



写真-5.2 石垣地区第三埠頭岸壁（-12m）ケーソン背後地盤の傾斜（2016年4月18日撮影）



写真-5.3 石垣地区第三埠頭岸壁（-12m）エプロン背後の駐車場での3箇所の液状化痕（2016年4月18日撮影）



写真-5.4 石垣地区第三埠頭岸壁（-12m）側面護岸における護岸法線のずれ（2016年4月18日撮影）

5.2 石垣地区第二埠頭岸壁 (-5.5m) 北側（重力式）

石垣地区第二埠頭は 1951 年から 1958 年ごろにかけて運輸省第四港湾建設局により最初の建設がなされ（図-5.3），その後，1965 年から 1966 年にかけて運輸省第四港湾建設局により埠頭北東側の凹状の部分の埋立拡張がなされた。また，1981 年に大分県実施の補助事業により北西側を可動橋を含めたフェリー埠頭とする拡張がなされ，現在は四国八幡浜行のフェリーが使用している（図-5.4）。

図-5.5 に北西側フェリー埠頭周辺部の平面図を示し，図中①および②における断面図を図-5.6 から図-5.8 に示

す。1966 年に拡張された北東部は L 型ブロック式である（図-5.6）。1981 年に拡張された北西側は L 型ブロック式（図-5.7 および図-5.8）と異形セルラーブロック式（断面図不明，図-5.5 平面図参照）で構成されており，これらの設計震度は不明である。第二埠頭北側岸壁において被害はほとんど見られなかったが，西側の埠頭基部付近において岸壁法線部の上部工とエプロンコンクリート舗装の目地部で数 cm 程度の開きが見られ（写真-5.5），L 型ブロックが数 cm 程度海側に移動したことが考えられる。

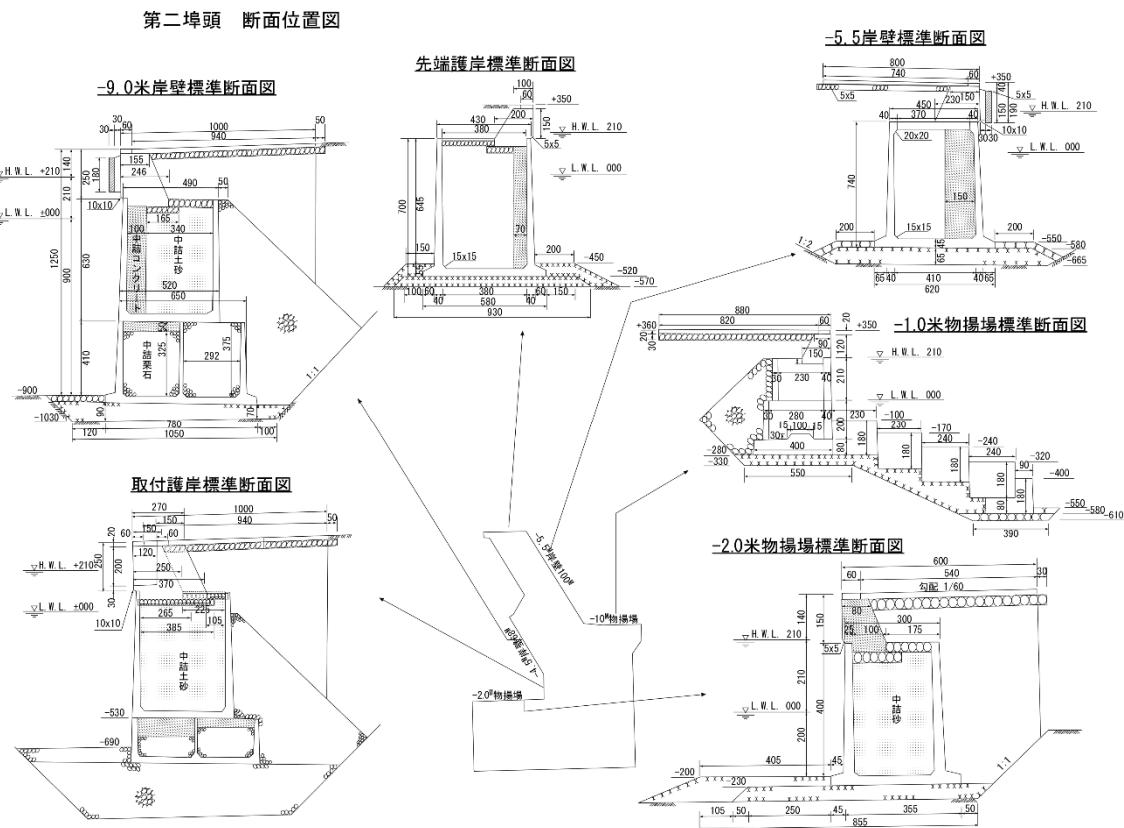


図-5.3 石垣地区第二埠頭平面図および断面図（1958 年ごろ）

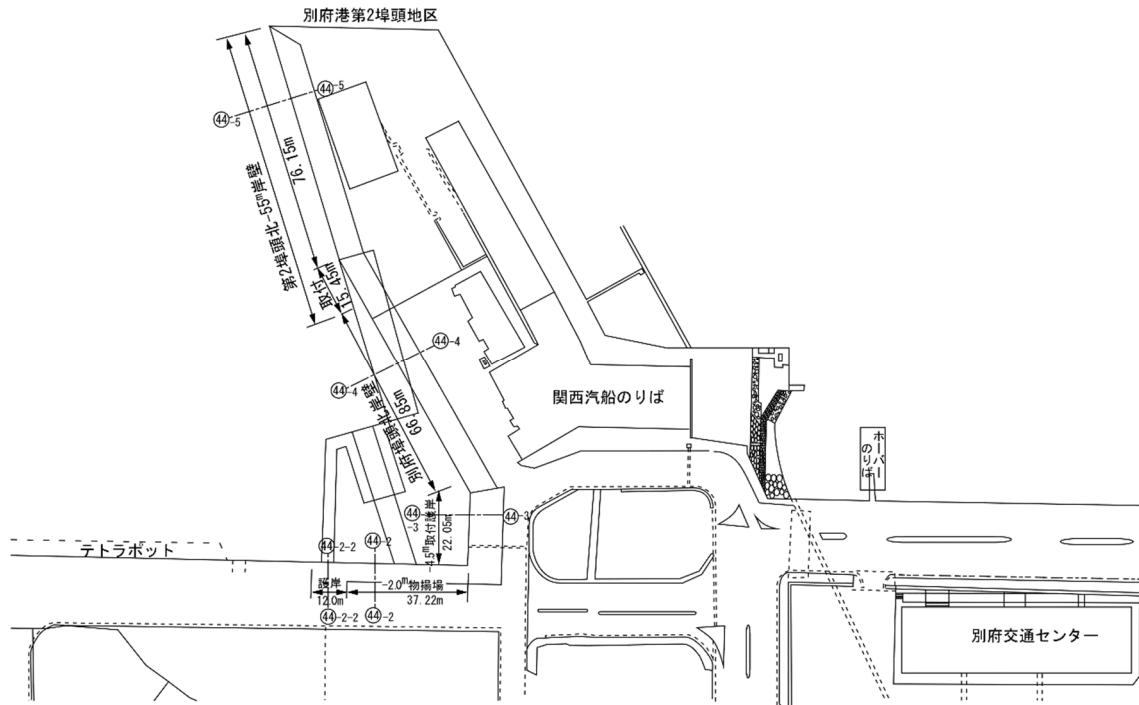


図-5.4 石垣地区第二埠頭平面図（1981年拡張時）

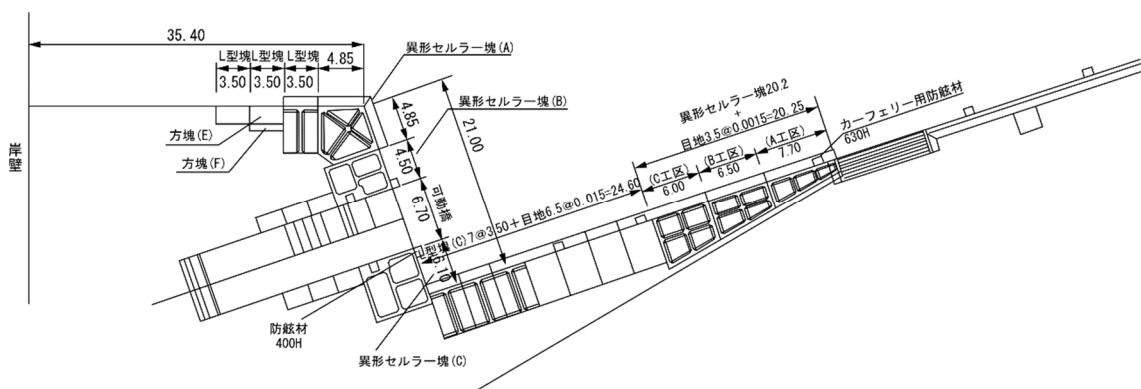


図-5.5 石垣地区第二埠頭平面図（北西側フェリー埠頭周辺）

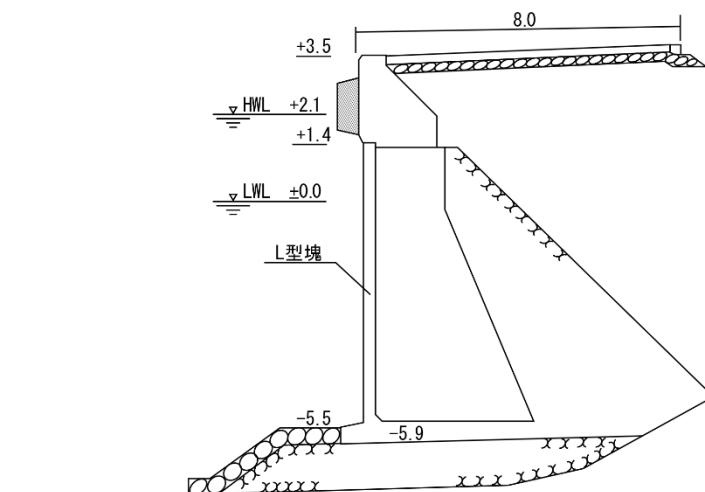


図-5.6 石垣地区第二埠頭岸壁 (-5.5m) 北東側標準断面図 (図-5.5 図中①)

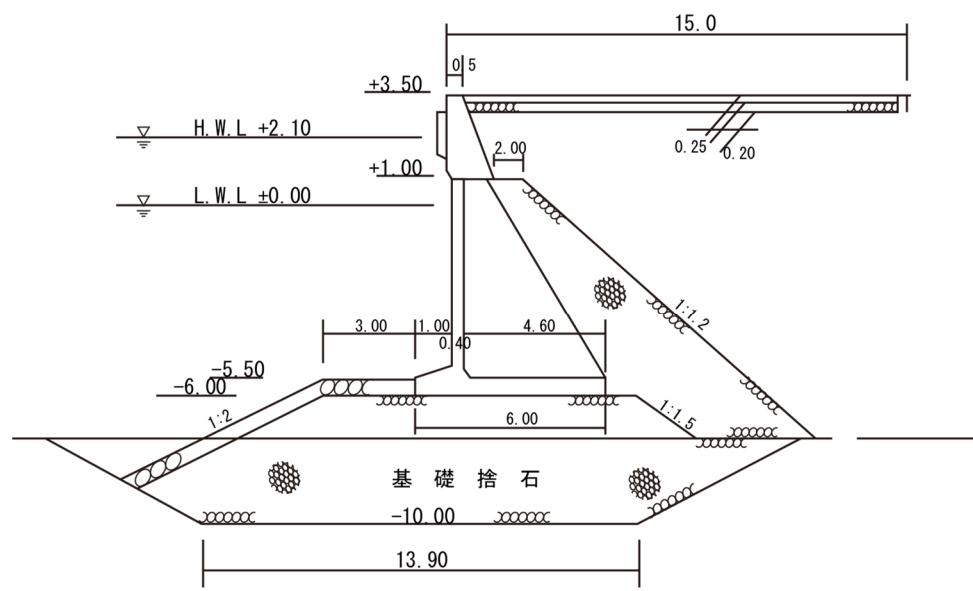


図-5.7 石垣地区第二埠頭岸壁 (-5.5m) 北西側標準断面図 (図-5.5 図中②)

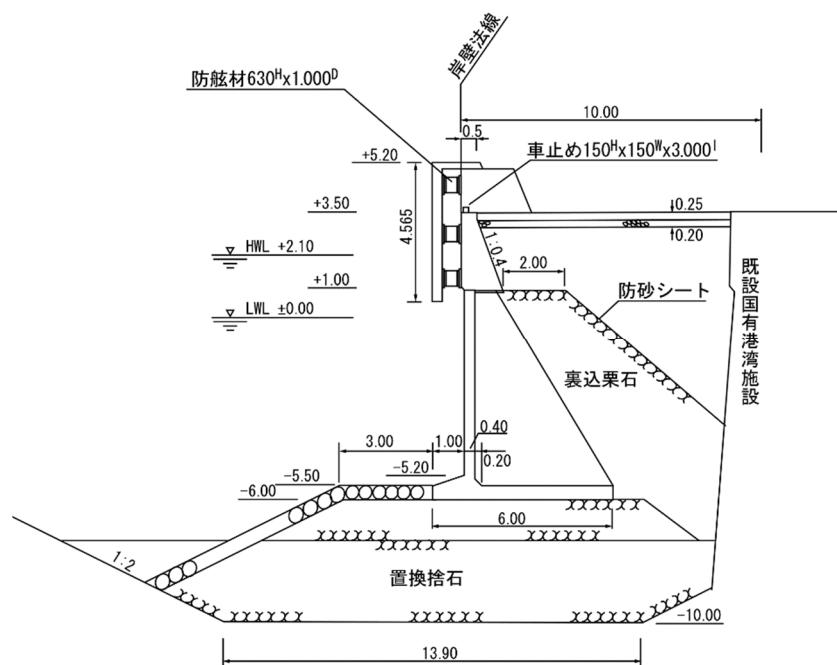


図-5.8 石垣地区第二埠頭岸壁 (-5.5m) 北西側標準断面図 (図-5.5 図中②, 防舷材設置部)



写真-5.5 石垣地区第二埠頭岸壁（-5.5m）北側の目地の開き（2016年4月18日撮影）

5.3 石垣地区第二埠頭岸壁（-5.5m）南側（重力式）

1955年に供用開始した岸壁であり、設計震度は不明である。図-5.9に標準断面図を示す。岸壁法線に近いエプロン部はコンクリート舗装で、その背後はアスファルト舗装となっていたが、もともとあったコンクリート舗装上にアスファルトがオーバーレイされており、その目地部に沿って格子状に亀裂が見られた。岸壁エプロンのコンクリート舗装とその背後のアスファルト舗装との目地部クラックでは20cm程度の段差が見られるところもあり、コンクリート舗装背後から埠頭中央部にわたるアスファルト部は全体的にその程度沈下していた。この目地部クラックでは噴砂痕跡が見られた箇所もあり、液状化が生じていたことが確認できた。埠頭中央部の南側岸壁側アスファルト舗装と北側岸壁側コンクリート舗装の境界（図-5.1の⑤）にある側溝（U字溝）の延長10m以上の箇所において変形・段差が見られ（写真-5.6），その南側のアスファルト舗装側は20cm程度低い状態となっており、アスファルト部の沈下に伴って変形が生じていた。

岸壁（-5.5m）南側の法線に近いエプロン部コンクリートとその背後のアスファルト部の目地の開きや、岸壁法線上部工とエプロンコンクリート舗装の目地の開きは、大きいところで10cm程度であった。法線部上部工について、その海側側面部の角度を傾斜計によって測ったところ、ほぼ90度であったことから、上述の目地部の開きも考慮すると、ケーソンはあまり傾斜せずに10cm程度海側に移動したと

考えられる（写真-5.7）。

岸壁（-5.5m）南側と東側先端護岸の隅角部付近（図-5.1の④）では、直径1m弱の舗装の陥没が見られた（写真-5.8）。陥没箇所より、アスファルト舗装の下部に空洞も確認された。この箇所の前面の岸壁や護岸部での海側への大きな変位は見られず、埠頭隅角部付近のケーソン目地部に近いと考えられることから、地震前より埋土の吸出しが生じていたことも考えられる。

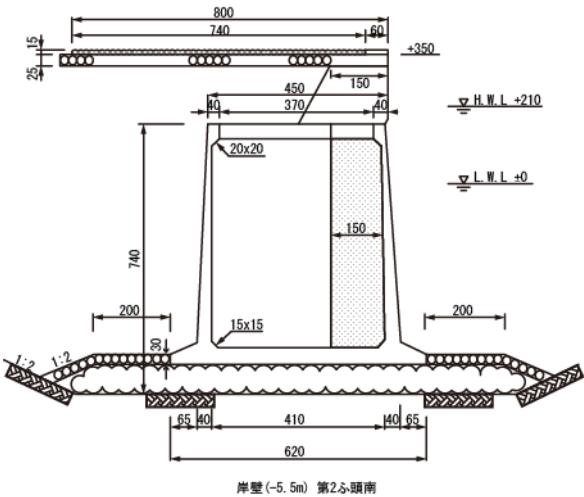


図-5.9 石垣地区第二埠頭岸壁（-5.5m）南側標準断面図



写真-5.6 石垣地区第二埠頭岸壁 (-5.5m) 中央部のU字溝に見られた変形・段差 (2016年4月18日撮影)



写真-5.7 石垣地区第二埠頭岸壁 (-5.5m) 南側の目地の開きと傾斜計による測定状況 (2016年4月18日撮影)



写真-5.8 石垣地区第二埠頭岸壁 (-5.5m) 南東側の隅角部での吸出しによる陥没 (2016年4月18日撮影)

5.4 石垣地区第二埠頭可動橋

石垣地区第二埠頭可動橋は 1981 年に大分県により整備された（5.2）。当該可動橋の位置を図-5.10 に示す。また全景を写真-5.9 に示す。これらの図および写真に示すように、当該可動橋はフェリーに向かって右側（南側）に護岸を有する可動橋である。図-5.11 に可動橋基礎の断面図を示す。同図に示すように、当該可動橋では門構部基礎は土圧を受ける構造となっている。

熊本地震本震後の 4 月 16 日朝に可動橋に不具合が発見された。この最初の状況は写真が入手できていないので、不具合の状況を図で示している（図-5.12）。この図は、応急復旧を実施した技術者の作成した図を若干修正したものである。同図に示すように、フェリーに向かって右側では桁に固定されたフックと壁との間に干渉が生じ、左側では桁に固定されたフックと門構部に固定されたブラケットとの間に干渉が生じた。可動橋の右側には護岸が存在するので、右側のフックと壁との干渉は護岸の海側への移動（橋軸直交方向の移動）によるものと考えられる。また、左側の干渉については、前述の通り門構部基礎が土圧を受

ける構造となっていることから、門構部基礎の前方への移動（橋軸方向の移動）によるものと考えられる。なおフックとブラケットは可動橋の休止装置を構成するものである。

当該可動橋では 4 月 16 日に応急復旧が行われたが、その後、右側のフックとブラケットとの間に再度干渉が生じた（写真-5.10）。また、右側のサイドローラーが壁を削り取るほど強く壁に当たっていることも確認された（写真-5.11）。これらは、右側の護岸が海側に（橋軸直交方向に）に移動したことを裏付けている。

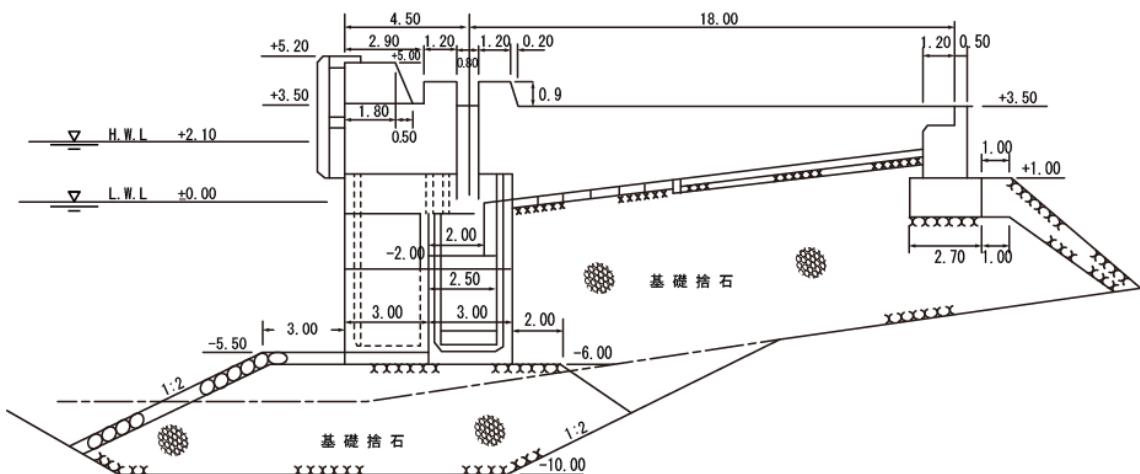
フェリー埠頭可動橋の中には右側もしくは左側に護岸を有するものが多い。また、サイドローラーは桁の水平面内の回転運動を拘束するために取り付けられている部品であり、基本的にすべての可動橋に存在する。したがって、当該可動橋に生じた被害は可動橋の被害としてかなり普遍的なものである可能性が高い。



図-5.10 石垣地区第二埠頭可動橋の位置（図の②）



写真-5.9 石垣地区第二埠頭可動橋の全景



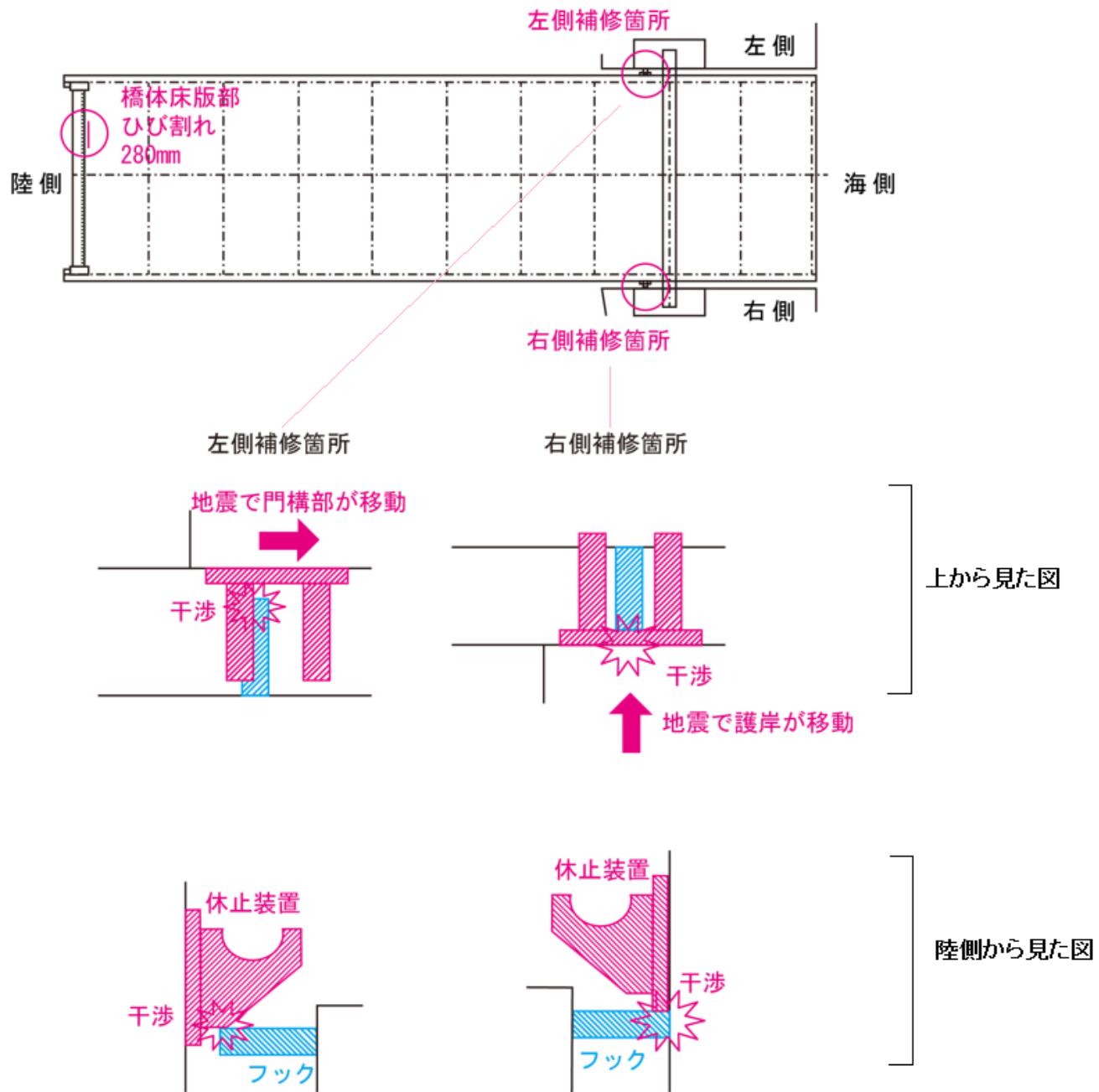


図-5.12 石垣地区第二埠頭可動橋に生じた不具合



写真-5. 10 可動橋右側のフックとブラケットとの干渉



写真-5. 11 可動橋右側のサイドローラーが壁に強く当たっている状況

6. 八代港の被害

八代港での調査は本震発生翌々日の4月18日に実施した。八代港に最寄りの震度観測点では、前震では震度5弱、本震では震度5強を記録している。

6.1 外港地区岸壁 (-10m) (コンテナ岸壁)

外港地区岸壁 (-10m) (図-6.1の①) はコンテナ定期航路の荷役を行う岸壁であり、韓国釜山との間に週3便が運行されている。図-6.2に同岸壁の標準断面図を示す。荷役機械として、ガントリークレーン1機、穀物用アンローダ2機が設置されている。地域別震度0.05、地盤種別係数1.2、重要度係数1.2として、設計震度0.05で設計がなされている。

地震後の状況としては、岸壁（鋼管矢板）の上部工と背後のアスファルト舗装の間での約3cmの開き（写真-6.1）、及びアスファルト舗装の約3cmの沈下（写真-6.2）を確認した。また、目視により岸壁法線にはらみだしが認められたが（写真-6.3、写真-6.4）、建設より30年以上が経過し

ているため、経年変化による変位を含むと推察される。当該位置の上部工のずれの状態（写真-6.5）、またその背後にある補修跡（写真-6.6）から判断するに、岸壁法線のはらみだしへほぼ全てが経年変化に起因するものと考えられる。よって、今回の地震による法線方向への変位は、上部工背後の開き分の3cm程度に限定されると判断される。なお、写真-6.5に示した位置以外では、上部工のずれ、上部工間の目地の開きは確認できなかった。

その他、写真-6.7に示すように、岸壁上部工とクレーン基礎の間のアスファルト舗装部の沈下が見られた。ここでも写真-6.8に示す補修の跡が認められたため、経年変化による沈下を含むことが推察される。写真-6.2のクレーン基礎コンクリートの状況から、経年変化で10cm以上沈下した上で、地震時に約3cm沈下したと推察される。

なお、現地の技術者からの情報では、外港地区岸壁 (-10m) における上記の変状は本震後（4月16日）に初めて確認されたとのことであった。



図-6.1 八代港における調査地点と被害の概要

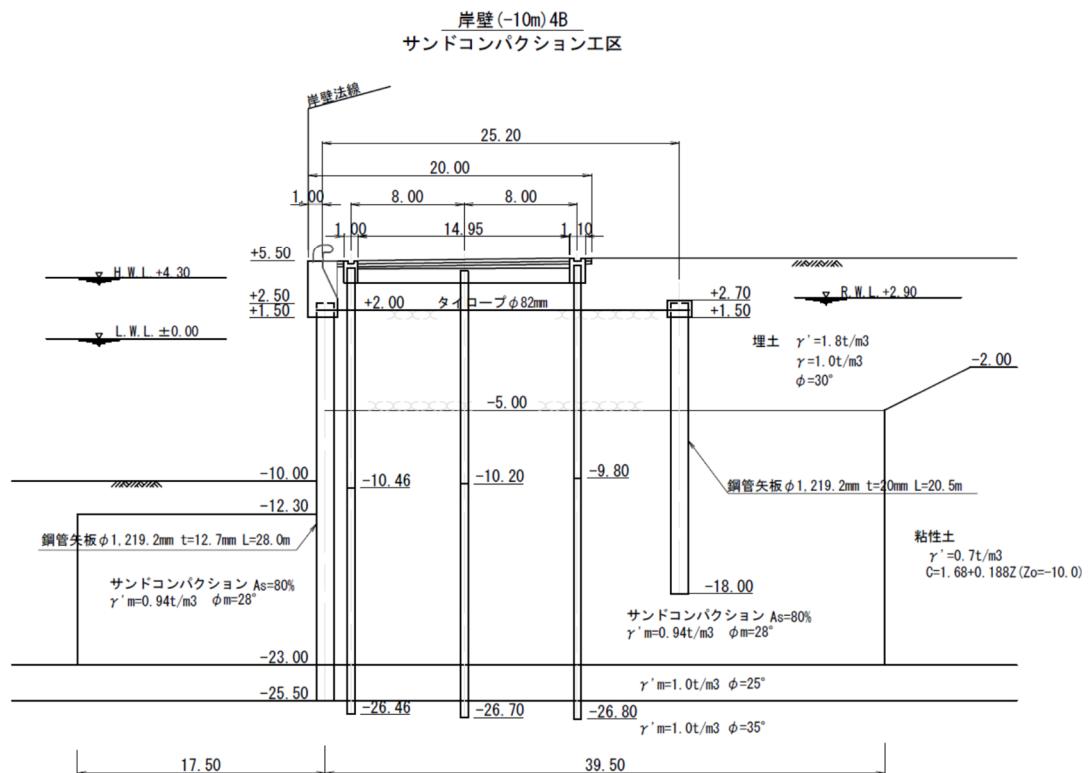


図-6.2 外港地区岸壁 (-10m) 標準断面図



写真-6.1 鋼管矢板の上部工背後の開き



写真-6.2 鋼管矢板上部工～クレーン基礎間のアスファルト舗装の沈下



写真-6.3 岸壁法線（南西方向を臨む）



写真-6.4 岸壁法線（北東方向を臨む）



写真-6.5 上部工のずれ



写真-6.6 上部工ずれ位置の背後にある補修跡



写真-6.7 岸壁上部工～クレーン基礎間の
アスファルト舗装の沈下



写真-6.8 アスファルト舗装の補修跡

6.2 外港地区岸壁 (-12m) (バルク岸壁)

外港地区岸壁 (-12m) (図-6.1の②) の標準断面図を図-6.3に示す。荷役機械として、ガントリークレーン1機、穀物用アンローダ2機が設置されている。地域別震度0.1、地盤種別係数1.2、重要度係数1.2として、設計震度0.15で設計がなされている。地震後の状況としては、岸壁(鋼管矢板)背後エプロン部のアスファルト舗装においてクラックの発生を確認した(写真-6.9)。当該岸壁は改良工事中であり、所々アスファルト舗装の打ち直しが行われていた。アスファルトの施工時期が異なり、舗装厚が異なる境界でクラックが発生したものと考えられる。クラックの長さは10mを超え、幅は1cmに満たない程度であった。また、コンクリート製の側溝を起点に長さ5m、幅2cm程度のクラック

が発生していた(写真-6.10)。いずれのクラックも、岸壁から20m以上離れた箇所において、岸壁法線に対して平行に発生していた。

エプロン部のクラック以外に被害は確認できず、岸壁本体への地震の影響は小さいと判断された。なお4月18日の調査当日には、自衛隊と海上保安庁の船舶が着岸し、緊急物資の拠点として供用されていた。

なお、現地の技術者からの情報では、岸壁背後におけるクラックは前震(4月14日)の直後に確認され、本震(4月16日)において被害の拡大は確認できなかったとのことであった。

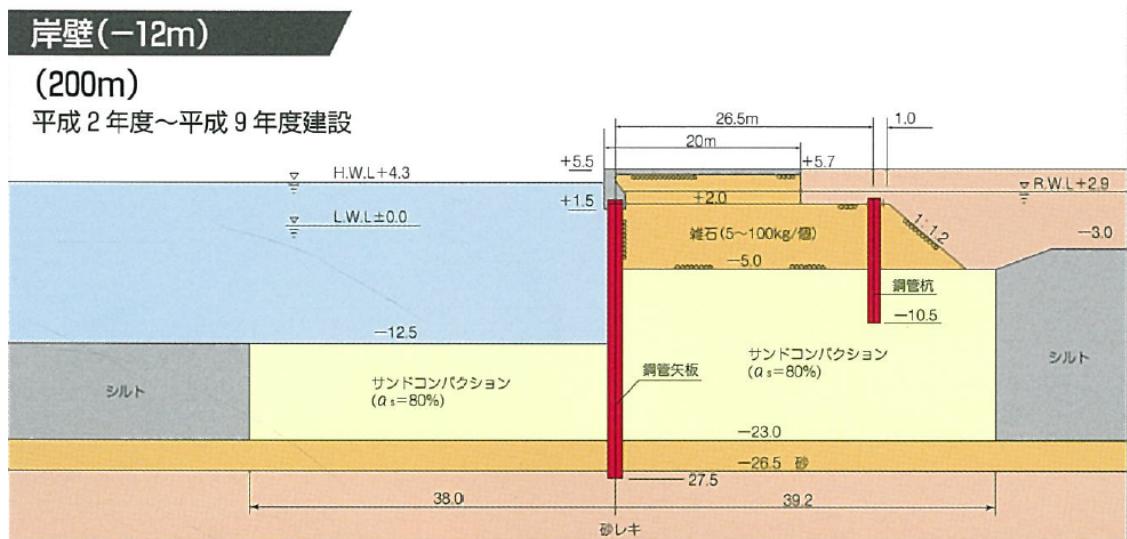


図-6.3 外港地区岸壁 (-12m) 標準断面図



写真-6.9 エプロン部アスファルト舗装のクラック

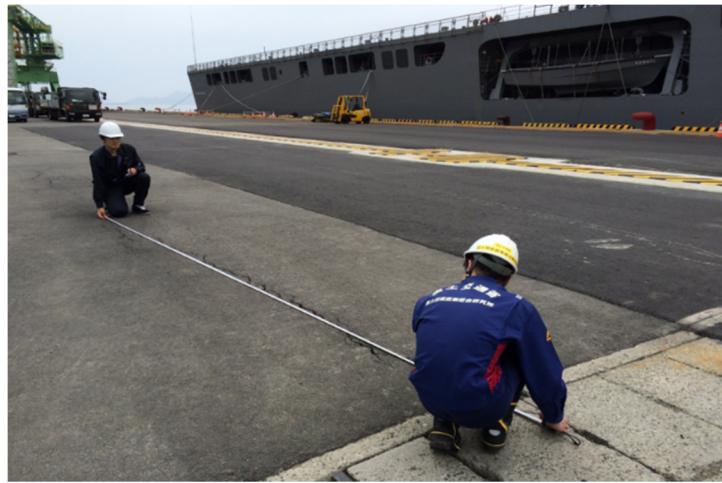


写真-6.10 コンクリート製の側溝を起点とするクラック

6.3 大島地区道路

大島地区の埋立年代は昭和40年代から昭和60年代であり、石油製品を扱う民間会社が多く立地している。

大島地区の道路（図-6.1の③）において、2箇所で地盤の液状化の痕跡である噴砂を確認した（写真-6.11）。噴砂は道路（アスファルト舗装）の亀裂より噴出し、シルト混じりの細砂が2cm程度堆積していた（写真-6.12）。なお、道路の沈下等の被害は確認できなかった。2箇所の噴砂は約2m離れた場所に位置し、周辺の道路では噴砂は確認できなかったため、液状化は狭い範囲で発生したものと考えられる。また地層構成（図-6.4）より、地表面に近い層が液状化し、噴砂したと考えられる。

なお、現地の技術者からの情報では、液状化に伴う噴砂は前震時（4月14日）には見られず、本震時（4月16日）に泡と一緒に砂が噴出し、異臭も確認されたとのことであった。



写真-6.11 大島地区道路の噴砂（噴砂は中央右側と奥の2箇所）



写真-6.12 噴砂により堆積した砂

■ 各地区の土質とN値の比較

()内の数字はN値

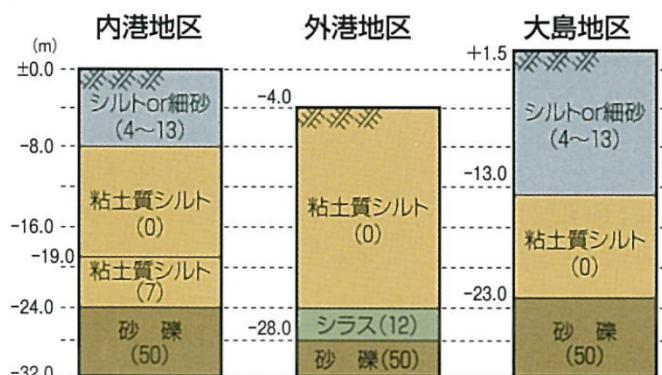


図-6.4 地層構成（八代港パンフレットより）

7. 熊本空港の被害

7.1 熊本空港の概要

熊本空港は、熊本県菊池郡菊陽町に位置する国管理空港（空港法第四条第一項第六号に掲げる空港）であり、1971年に供用を開始した。滑走路長は3,000mであり、平行誘導路、取付誘導路（7本）、エプロン（8スポット）を有する。滑走路、平行誘導路及び取付誘導路はアスファルト舗装、エプロンは無筋コンクリート舗装である。

図-7.1に、（国研）産業技術総合研究所「活断層データベース」による熊本空港近傍の断層位置を示す。熊本空港の南側には、熊本地震の原因である布田川断層帯が北東一南西方向に存在している。熊本空港ターミナルビルから南西へ約6kmにある益城町役場（熊本県上益城郡益城町宮園）では、前震及び本震において震度7が観測された。

図-7.2に、（国研）産業技術総合研究所「20万分の1日本シームレス地質図」による熊本空港近傍の地質を示す。この地質図によると、標高が30m程度の益城町役場周辺は後期更新世の非アルカリ珪長質火山岩類（図の95番の範囲、約15万年前～約1万8000年前に爆発的噴火により高速で流れ下った軽石や火山灰）であるのに対し、標高が190m程度の熊本空港周辺は後期更新世の火山岩類（図の83番の範囲、約15万年前～約1万8000年前に噴火した火山の岩石）となっており、熊本空港は火山岩による台地の上に位置していることがわかる。

7.2 調査結果

運航に支障を及ぼすような空港土木施設の被害は確認されなかったが、滑走路、誘導路及びエプロンにおいて破損（ひび割れ及び段差）が確認された。なお、東北地方太平洋沖地震の際に仙台空港で発生した液状化や局所的な沈下²²⁾は確認されなかった。図-7.3に破損が確認された位置を、図-7.4～図-7.6及び写真-7.1～写真-7.3に破損の詳細を示す。

エプロン部では2か所でひび割れが確認された。破損位置はGSE通行帯近傍のコンクリート版及びアスファルト舗装部に発生したものであり、航空機が走行しない位置であった。最大ひび割れ幅は2cm程度であり、目視の結果、ひび割れはコンクリート版（厚さ23cm程度）を貫通していた。また、コンクリート版とU型排水溝の間、アスファルト舗装部のひび割れ部において若干の段差が確認された。

滑走路25端部では4か所でひび割れが確認されたが、一部はアスファルト舗装の施工目地が地震により開いたものであった。最大ひび割れ幅は2cm程度であり、段差は確認されなかった。後日、ひび割れからコアを採取した結果、ひび割れ1～3はアスファルト混合物層（厚さ27cm程度）を貫通していた。

誘導路T6部では2か所でひび割れが確認された。最大ひび割れ幅は1cm程度であり、段差は確認されなかった。後日、ひび割れからコアを採取した結果、ひび割れ6はアスファルト混合物層（厚さ34cm程度）を貫通していた。

平成 28 年（2016 年）熊本地震による港湾施設等被害報告 / 野津厚他



図-7.1 熊本空港周辺の断層位置

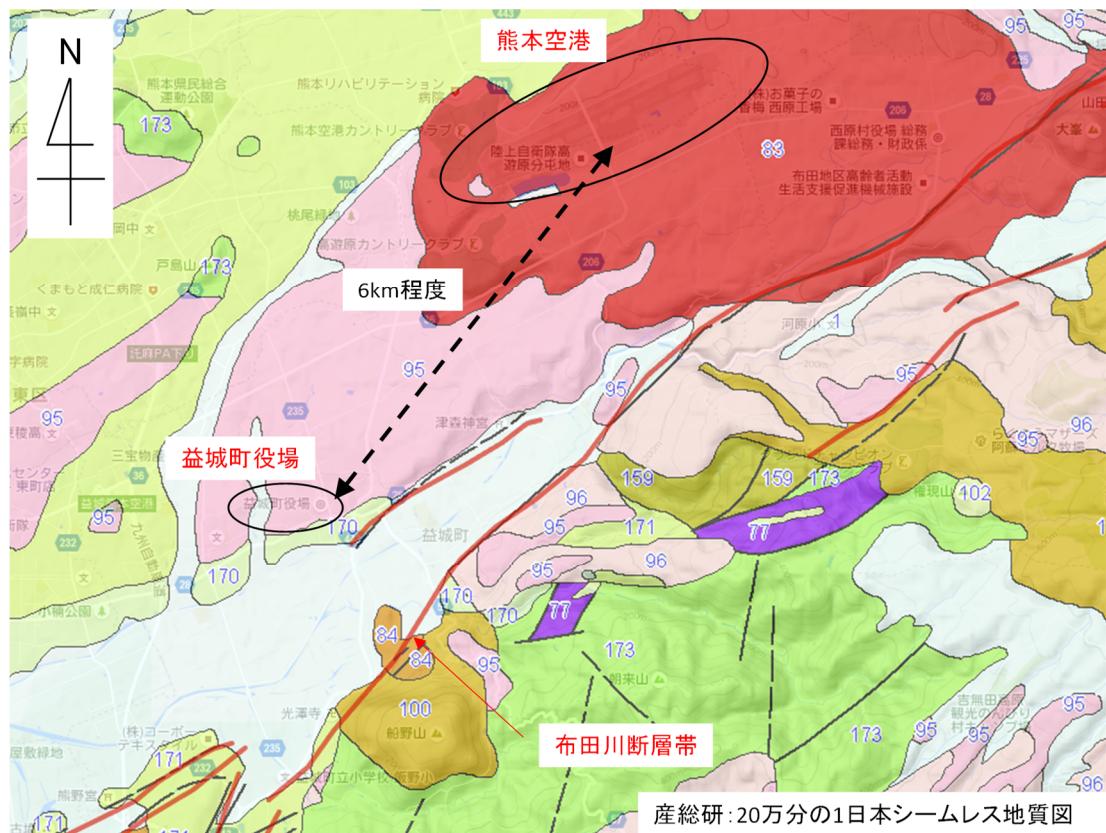


図-7.2 熊本空港周辺の地質

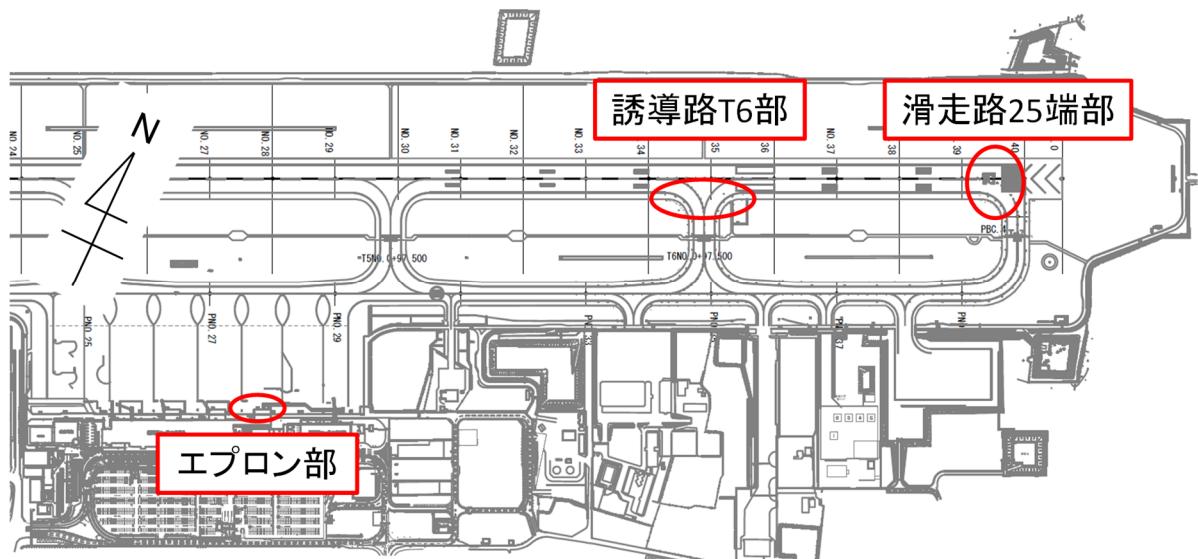


図-7.3 破損位置

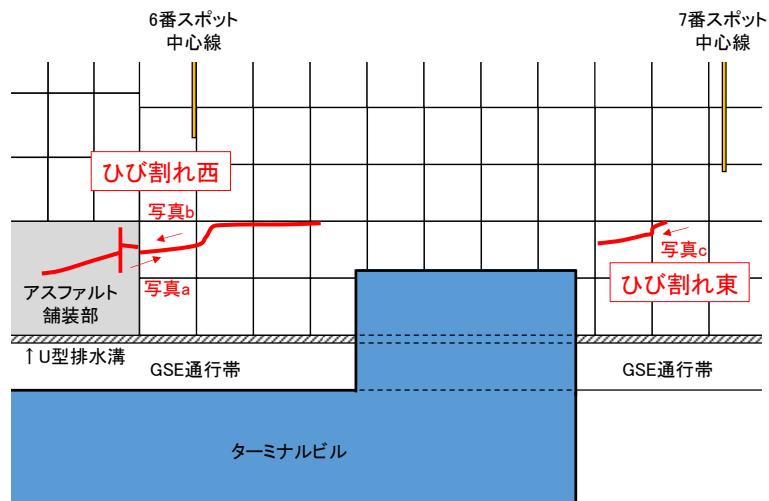


図-7.4 エプロン部のひび割れ位置



(a) ひび割れ西

(b) ひび割れ西

(c) ひび割れ東

写真-7.1 エプロン部のひび割れ

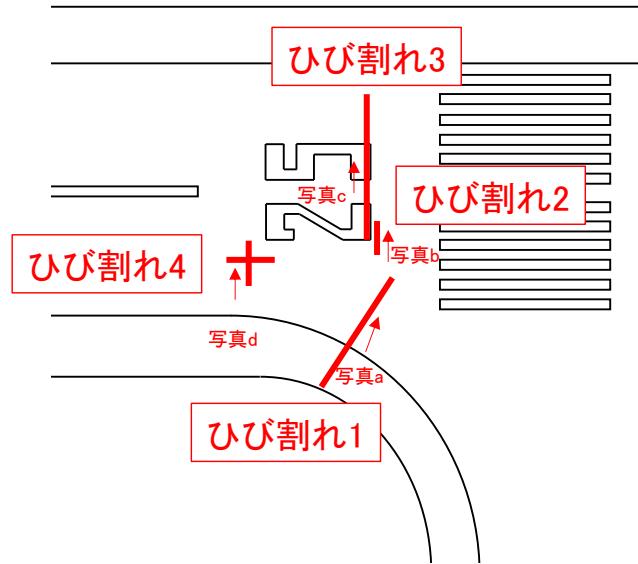


図-7.5 滑走路 25 端部のひび割れ位置



(a) ひび割れ 1

(b) ひび割れ 2



(c) ひび割れ 3

(d) ひび割れ 4

写真-7.2 滑走路 25 端部のひび割れ

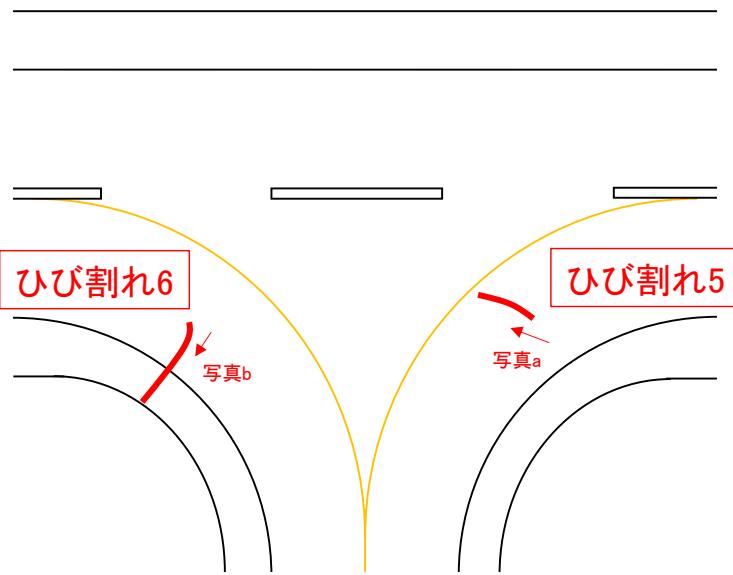


図-7.6 誘導路 T6 部のひび割れ位置



(a) ひび割れ 5

(b) ひび割れ 6

写真-7.3 誘導路 T6 部のひび割れ

7.3 地震後の熊本空港の運航状況

国土交通省航空局による報道発表資料²³⁾を基に、地震後の熊本空港の運航状況を整理したのが表-7.1 である。空港土木施設の被害が軽微であったため、4月 15 日の定期

便は平常運航であった。その後、本震によりターミナルが被害を受けたことから、4月 16 日～18 日の 3 日間は定期便が運休となったものの、定期便運休中も多くの救援機等の離着陸に使用された。

表-7.1 地震後の運航状況

月日	集計時間帯	定期便 臨時便 (便)	救援機 その他 (便)	旅客便 搭乗者数 (人)	備考
4/14 (木)	7:30～21:30	76	26	—	21:23 前震発生
	21:30～翌 7:30	0	38	—	
4/15 (金)	7:30～21:30	82	80	—	平常運航
	21:30～翌 7:30	1	37	—	25:25 本震発生
4/16 (土)	7:30～21:30	0	198	—	ターミナル被害による定期便運休
	21:30～翌 7:30	0	7	—	
4/17 (日)	7:30～翌 7:30	1	124	—	ターミナル被害による定期便運休
4/18 (月)	7:30～翌 7:30	0	123	—	ターミナル被害による定期便運休
4/19 (火)	7:30～翌 7:30	35	149	1,087	定期便再開
4/20 (水)	7:30～翌 7:30	51	134	3,096	
4/21 (木)	7:30～翌 7:30	44	10	2,940	
4/22 (金)	7:30～翌 7:30	53	103	4,631	
4/23 (土)	7:30～翌 7:30	53	63	4,804	
4/24 (日)	7:30～翌 7:30	55	48	5,491	

※ 通常時の運用時間は 7:30～21:30 である。

※ 救援機は警察、消防、海上保安庁及び自衛隊の航空機である。

※ 便数及び搭乗者数は出発と到着の合計である。

7.4 地下道の状況

空港の地下道（写真-7.4）については前震と本震の間（4月 15 日）および本震後（4月 16 日）の 2 回にわたり調査を行った。本震後の 4月 16 日の調査においては、コンクリートの小片が落下している箇所が認められた（写真-7.5）。

これは本震前の調査では認められなかったものである。当該箇所はボックスカルバートのブロック境界にあたることから、本震時にトンネルの伸縮のためブロック間の衝突が生じたためと考えられる。ただし構造上の不安定に結びつくような変状は認められなかった。



出典：国土地理院電子地図を元に作成

写真-7.4 空港地下道の位置



写真-7.5 本震後の調査で確認されたコンクリート小片

8. まとめと今後の課題

2016年熊本地震の発生を受け、国土技術政策総合研究所と港湾空港技術研究所は、港湾・空港の被害状況を把握するとともに、現地の担当部局に対して必要な支援を行うため、九州地方整備局の支援の下、第1次～第4次の調査団を派遣した。調査団のメンバーと担当した港湾・空港は表-8.1に示す通りである。

第1次調査団は前震発生後の4月15日朝に福岡空港に到着し、4月15日は福岡から陸路で熊本に移動し熊本空港（地下道のみ）の調査を行った。4月16日は再び福岡から陸路で熊本に移動し熊本港と熊本空港（地下道のみ）の調査を行った。第2次調査団は本震発生後の4月16日午後に福岡空港に到着し、4月17日の6時20分頃に博多駅から自動車で出発し、8時50分頃に熊本空港に到着した。その後、空港内に立ち入り、滑走路、誘導路及びエプロンの調査を実施した。第3次調査団は4月17日に大分空港に到着し、4月18日に陸路で別府に移動し別府港の調査を行った。第4次調査団は4月17日に福岡空港に到着し、4月18日に陸路で八代に移動し八代港の調査を行った。

本資料は、調査団による現地調査の結果を中心として、熊本地震による港湾・空港施設の被害状況をとりまとめたものである。なお、調査団による調査結果以外に、関係機関から寄せられた測量結果などの貴重な情報を加えている。また、港湾における強震記録や、強震記録の得られなかつた地点での推定地震動についても記載している。

調査団が確認した港湾・空港施設の被害は比較的軽微であった。しかし、地震による施設の変状はある程度生じており、その情報は、将来の地震によって類似の施設に起りうる被害を予測し、対策を考える上で重要な意味を持つ

と考えられる。

第4章で紹介した熊本港の重力式岸壁（-7.5m）では、岸壁法線の海側への変位が生じたものの、その大きさは12cm程度にとどまり、背後の段差も7cm程度にとどまった。前震および本震において熊本港の工学的基盤にはかなりの強度を有する地震動が作用したと考えられるが（3.2の推定結果ではそれぞれ工学的基盤でPSI値が $34\text{cm/s}^{0.5}$, $99\text{cm/s}^{0.5}$ ），それにも関わらず当該岸壁の被害が軽微であった要因としては、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改良率80%のSCPが施工されていたことが大きいと考えられる。軟弱地盤対策として施工されたSCPが地震に対しても効果を発揮することを示す貴重な事例と考えられる。

一方、第4章、第5章で紹介したように、熊本港と別府港ではフェリー埠頭の可動橋に不具合が生じたが、これは從来見落とされがちであった被害形態である。熊本港可動橋の不具合は、海底地盤の傾斜に起因して地盤に変位が生じ、それに伴い門構に橋軸方向の変位が生じたことによるものと考えられる。一方、別府港可動橋の不具合は、可動橋右手側護岸の海側への移動（橋軸直交方向の移動）や、土圧を受ける構造である門構部基礎の前方への移動（橋軸方向の移動）によるものと考えられる。いずれにしても、構造物単体としての不具合ではなく、地盤の変位に関係していると考えられる点が特徴的である。これらの事例は、港湾施設の耐震設計において、構造物のみに着目するのではなく、地盤-構造物の全体系をバランスよく見ていく必要があることを示している。

可動橋の設計では、基礎が不動のものであるとの前提で設計してしまいがちであるが、港湾ではレベル2地震動に満たないような地震動であってもある程度の地盤変状は避けられない。地盤変状を完全に防止しようとすれば過大なコ

ストがかかるため、港湾の施設としての可動橋の設計においては、地震時には基礎が動く可能性があるとの前提の下、多少の動きには構造側で対応できるようになることが望ましいと考えられる。このような観点から、熊本地震以降、可動橋およびその基礎に関する全国的な調査が実施され、その結果、構造上のわずかな工夫により、地震時の地盤の変形に対して有利な可動橋とすることができる見通しが得られている。この点については稿を改めて報告したい。

熊本地震の調査を通じて改めて感じるのは、港湾・空港施設の大地震時の動的な挙動とその結果生じる被害に関し

てはまだまだ不明確な点が多いということである。今後、不幸にして被害地震が生じた場合には、適切なタイミングで調査を実施し、被害の実態を明らかにしていく必要がある。また、被害の実態調査に加えて重要なのは、どのような地震動の下でその被害が生じたのかを明らかにすることである。そのためには、既存の強震観測網を可能な範囲で拡充しつつ適切に運用していくとともに、港湾・空港において強震記録が得られなかった場合に備えて、地震動の事後推定手法の一層の信頼性向上も図る必要がある。

表-8.1 調査団のメンバーと派遣先

調査団	担当港湾・空港	組織				出発	到着地	現地入り	帰京日	
		組織	所属	役職	氏名					
第1次	熊本港・ 熊本空港 (地下道のみ)	国総研	港湾研究部	主任研究官	竹信 正寛	4月15日	福岡	4月16日	4月17日	
			海洋・沿岸防災研究部	主任研究官	内藤 了二					
		港空研	地震防災研究領域	領域長	野津 厚					
第2次	熊本空港	国総研	空港施設研究室	室長	坪川 将丈	4月16日	福岡	4月17日	4月17日	
			空港塗装研究グループ	グループ長	伊豆 太					
		港空研	耐震構造研究グループ	主任研究官	大矢 陽介			4月19日		
			地震動研究グループ	研究官	長坂 陽介			4月17日		
			沿岸防災研究室	室長	鈴木 健之			4月18日	4月18日	
第3次	別府港	港空研	耐震構造研究グループ	グループ長	小濱 英司	4月17日	大分			
				研究官	寺田 竜士		4月18日			
				研究官	近藤 明彦					
第4次	八代港	港空研	港湾研究部	主任研究官	福永 勇介	4月17日	福岡	4月18日	4月19日	
			動土質研究グループ	グループ長	佐々 真志					
			耐震構造研究グループ	研究官	小林 孝彰					
				主任研究官	大矢 陽介	4月16日				

(2018年4月24日受付)

謝辞

調査に際し、九州地方整備局港湾空港部港湾事業企画課 柳田和喜課長（当時）、大阪航空局空港部土木建築課 齋藤秀樹専門官、大阪航空局熊本空港事務所 西岡成先任施設運用管理官付に多大なご協力を頂いた。深く感謝申し上げます。防災科学技術研究所、JR、熊本河川国道事務所、国土技術政策総合研究所道路地震防災研究室による強震記録を利用しています。記して謝意を表します。なおJRの波形はJR警報地震計（FDシリアル番号 R-087）によります。

参考文献

- 1) 気象庁：「平成 28 年（2016 年）熊本地震」について（第 23 報），報道発表資料，2016 年。
- 2) 国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究
- 所：平成 28 年熊本地震建築物被害調査報告、国総研資料 No.929（建築研究資料 No.173），2016 年。
- 3) 国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人土木研究所：平成 28 年（2016 年）熊本地震土木施設被害調査報告、国土技術政策総合研究所資料 No.967（土木研究所資料 No.4359），2017 年。
- 4) 気象庁：災害時地震報告 平成 28 年（2016 年）熊本地震，2016 年，http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_2016/saigaiji_201601.pdf。
- 5) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：平成 28 年（2016 年）熊本地震の評価，2016 年，http://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2016/2016_kumamoto_3.pdf。
- 6) 防災科学技術研究所：F-net，<http://www.fnet.bosai.go.jp>。
- 7) 国土地理院：電子基準点が捉えた平成 28 年（2016 年）

熊本地震に伴う地殻変動について、2016年、
http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi_kumamoto20160414.html.

8) Shirahama, Y., Yoshimi, M., Awata, Y., Maruyama, T., Azuma, T., Miyashita, Y., Mori, H., Imanishi, K., Takeda, N., Ochi, T., Otsubo, M., Asahina, D. and Miyakawa, A.: Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan, *Earth Planets Space*, 68:191, 2016.

9) Toda, S., Kaneda, H., Okada, S., Ishimura, D. and Mildon, Z.: Slip-partitioned surface ruptures for the Mw 7.0 16 April 2016 Kumamoto, Japan, earthquake, *Earth Planets Space*, 68:188, 2016

10) 消防庁応急対策室：熊本県熊本地方を震源とする地震（第107報），2017年，<http://www.fdma.go.jp/bn/700ce3e48a3bfa7b7c86ec4c9568e9ad6abc4137.pdf>.

11) 高山峯夫：調査の概要，2016年熊本地震 災害調査報告会，2016年度日本建築学会大会（九州），2016年，pp.2-4.

12) 菊地健児・田中圭：益城町の悉皆調査，2016年熊本地震 災害調査報告会，2016年度日本建築学会大会（九州），2016年，pp.83-93.

13) Aoi, S., Kunugi, T., and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, *Jour. Japan Association for Earthq. Eng.*, Vol.4, No.3, 2004, pp.65-74.

14) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 耐震設計編，2012年，pp.19-22.

15) 野津厚・長坂陽介：港湾地域強震観測年報（2015），港湾空港技術研究所資料，No.1331，2017年.

16) 青井真：強震動と震源過程，科学，第86巻，第9号，2016年，pp.907-914.

17) 野津厚・長坂陽介：2016年熊本地震の前震と本震の震源過程の推定と特性化震源モデル，港湾技術研究所報告，第57巻，第1号，2018年（印刷中）.

18) 野津厚・長尾毅：スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト增幅特性，港湾空港技術研究所資料，No.1112，2005年.

19) 野津厚・盛川仁：表層地盤の多重非線形効果を考慮した経験的グリーン関数法，地震2，第55巻，2003年，pp.361-374.

20) 国土技術政策総合研究所港湾施設研究室ホームページ，<http://www.ysk.nirim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu.html>.

21) 井合進・菅野高弘・野津厚・一井康二・佐藤陽子・小濱英司・深澤清尊：港湾構造物の耐震性能照査型設計体系について，港湾空港技術研究所資料，No.1018，2002年.

22) 坪川将丈，水上純一，畠伊織，前川亮太：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震による仙台空港の舗装に関する被害報告，国土技術政策総合研究所資料，No.680，2012.

23) 国土交通省航空局：報道発表資料「24時間運用中の熊本空港が被災地支援の拠点として活用されました」，国土交通省ホームページ http://www.mlit.go.jp/report/press/kouku02_hh_000099.html，2016年4月25日.

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 1042

July 2018

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019
E-mail:ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp

港湾空港技術研究所資料 No.1348

2018. 7

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発 行 所 港 湾 空 港 技 術 研 究 所
横 須 賀 市 長 瀬 3 丁 目 1 番 1 号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2018) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。