

# 能登半島地震における被災岸壁の地震動の推定 と健全度評価について

二瓶 章<sup>1</sup>・長田 光正<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北陸地方整備局 新潟港湾空港技術調査事務所 所長 (〒951-8011 新潟市中央区入船町4-3778)

<sup>2</sup>北陸地方整備局 新潟港湾空港技術調査事務所 調査課 (〒951-8011 新潟市中央区入船町4-3778) .

平成 19 年 3 月 25 日 9 時 42 分に発生した能登半島地震により、七尾港大田地区 1 号岸壁（控え直杭式鋼矢板岸壁）では、岸壁法線が最大 23cm 海側にはらみだし、エプロン背後では、液状化が原因で 20～50cm の沈下（段差）が生じた。

海中部の矢板の調査を行ったが、矢板の損傷等は確認されなかった。しかし、岸壁に変状が生じていたため、矢板の根入れ部、タイロッドおよび控え組杭について、降伏部材の有無を把握する必要があった。そこで、岸壁位置での地震動を推定し、二次元有効応力解析で、岸壁の変形量を再現することにより、構造物全体における健全度評価を行った。

キーワード 能登半島地震、岸壁変状、経験的グリーン関数法、FLIP解析、健全度評価

## 1. はじめに

平成 19 年 3 月 25 日 9 時 42 分に発生した能登半島地震により、七尾港大田地区 1 号岸壁（控え直杭式鋼矢板岸壁）では、岸壁法線が最大 23cm 海側にはらみだし、背後のエプロンでは、液状化が原因で 20～50cm の沈下（段差）が発生した。

被災岸壁は、七尾市の主力産業である木材加工の原木を取り扱う重要な物流拠点であり、供用停止を続けることで、産業への悪影響が懸念された。そこで、海中部の矢板の調査を行ったが、欠損等は確認されなかったことや、最大 23cm 程度の海側へのはらみだしであるため、検討の結果、構造上問題ないと判断し供用を開始した。しかし、エプロン背後では液状化により 50cm 程度の沈下が発生しており、構造物全体が健全であるということを定量的に把握する必要があった。そこで、岸壁位置での地震動を推定し、二次元有効応力解析で、岸壁の変形量を再現することにより、土中部の矢板や控え組杭やタイロッドについての降伏部材の有無を把握することで、構造物全体における健全度評価を行った。

## 2. 岸壁の地震後の被災状況

推定震度分布<sup>1)</sup>を図-1に、大田地区 1 号岸壁での被災状況を図-2に、岸壁背後での段差状況を写真-1に示す。

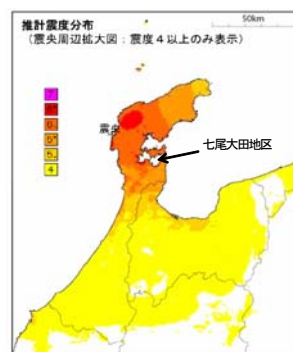


図-1 推計震度分布及び位置図

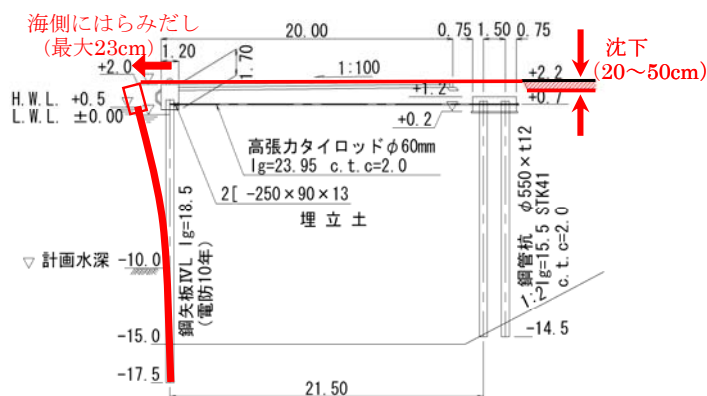


図-2 大田地区1号岸壁の被災状況



図-3 背後地に生じた段差

### 3. 被災岸壁の健全度評価までの流れ

被災岸壁について、健全度の評価フローを図-4に示す。

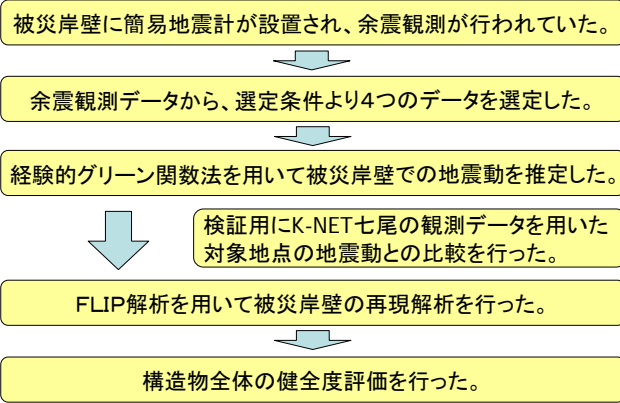


図-4 評価フロー

### 4. 地震動の設定

大田地区岸壁には地震計が設置されておらず、能登半島地震本震において観測記録は得られていない。しかしながら、能登半島地震直後から港湾空港技術研究所（以下「港空研」という。）によって七尾港のサイト増幅特性を把握するために、簡易地震計を設置して余震観測が行われていた。ここではその余震観測データを用いて、大地震の揺れを良く評価できる経験的グリーン関数法により、対象岸壁の地震動を設定した。

経験的グリーン関数を用いた波形インバージョンにより2007年能登半島地震（Mj6.9）の破壊過程を推定した。対象周波数は0.2-1.0Hzとした。グリーン関数としては、本震と余震のメカニズム<sup>2)</sup>の類似性の他、本震波形と余震波形の群遅延時間の類似性を考慮し、表-1に示す4つの余震の記録を併用した。

表-1 本震と余震のパラメタ

発生日時	北緯	東経	深さ (km)	Mj
本震 2007/03/25 9:41:57.9	37.220	136.685	11.0	6.9
余震1 2007/05/0220:44:38.2	37.331	136.763	6.6	4.8
余震2 2007/03/31 8:09:46.9	37.233	136.758	13.0	4.4
余震3 2007/03/28 10:51:2.6	37.175	136.612	10.0	4.6
余震4 2007/04/02 2:51:44.3	37.210	136.688	12.0	4.2

比較的震源に近く、かつ表層地盤の非線形性の影響が小さいと考えられるK-NETの5地点を選び、そこでのEW成分とNS成分の速度波形（0.2-1.0Hz），計10成分を波形インバージョンのターゲットとした。これらの観測点を図-5に示す。波形インバージョンには本震波形のS波を含む10秒間を用いた。また、表層地盤の非線形の影響のあるK-NET七尾（ISK007）について、非線形パラメタ<sup>3)</sup>を用いて調整を行った。

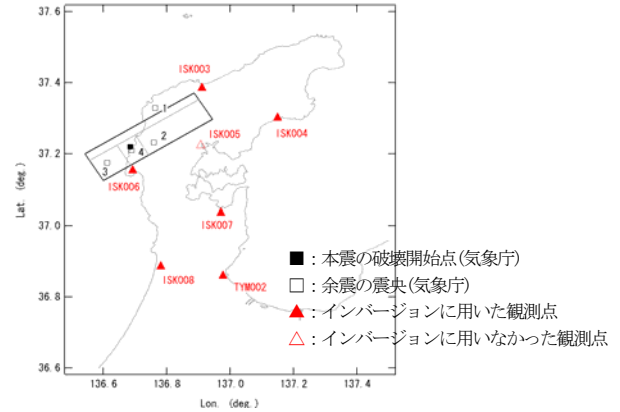
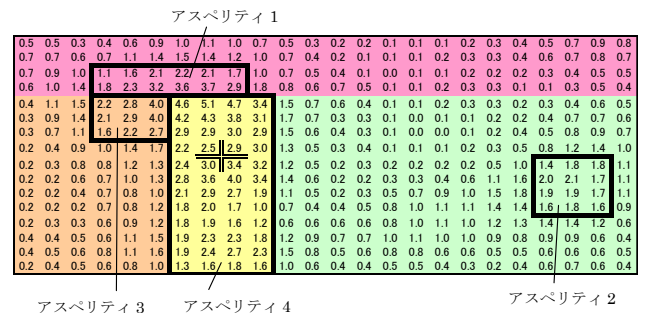


図-5 インバージョンで仮定した断層面と観測点の位置

能登半島地震の震源モデルは、港空研において波形インバージョンから求められたモデルを基本として、0.2～1.0Hzを対象としており、高周波側については言及していない。そこで高周波側については、断層モデルにアスペリティを矩形領域でモデル化することにより考慮した。なお、アスペリティは港空研によって求められた変位分布のうち、平均変位の1.5倍を越える領域と考え、特性化震源モデルを設定した。

図-6 アスペリティの配置



(数字：各セグメントの平均変位に対する比率)

以上より、K-NETの5地点で本震の観測記録と経験的グリーン関数法を用いた予測地震動を比較した結果、震源から離れた地点 K-NET 羽咋（ISK008），K-NET 氷見（TYM002）では観測記録に比べて過大評価の感があるが、震源近傍の K-NET 輪島（ISK003），K-NET 富来（ISK006），K-NET 七尾（ISK007）では観測記録との一致度が高かった。K-NET 七尾での加速度の波形を図-8に示す。

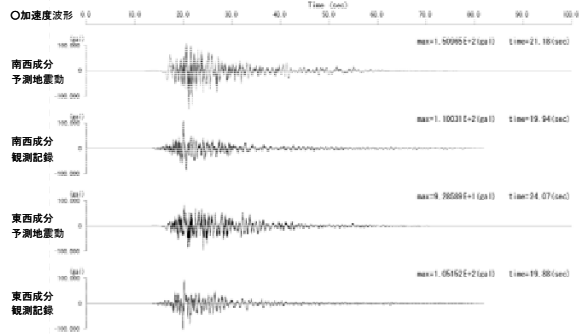


図-7 K-NET 七尾の再現結果

また、図-8に示すようにK-NET 七尾の本震記録及び、余震記録のフーリエスペクトル比を用いた地震動も、経験的グリーン関数法を用いて算定した地震動の検証用に算定した。

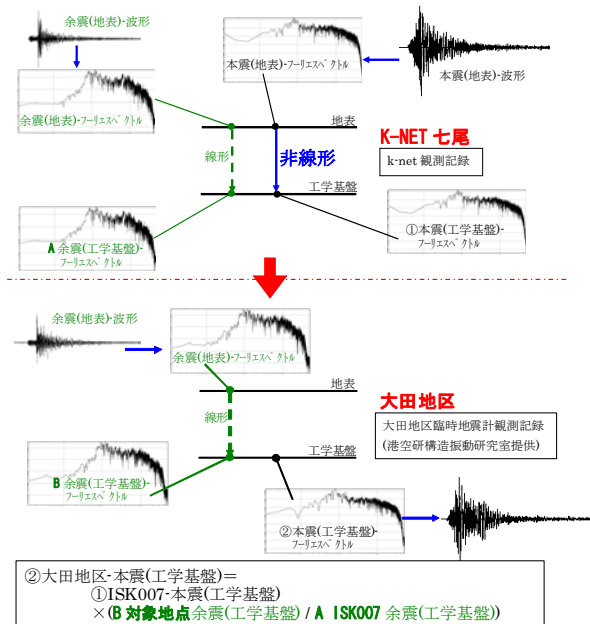


図-8 K-NET 七尾の本震記録を用いた地震動設定方法

図-9は大田地区岸壁において、経験的グリーン関数法で推定した地震動と図-8から求めた地震動を比較したものであり、加速度波形の最大値、主要動の継続時間、エンベロップ、位相に関してよく一致しており、精度の高い予測ができていたものと考えられる。

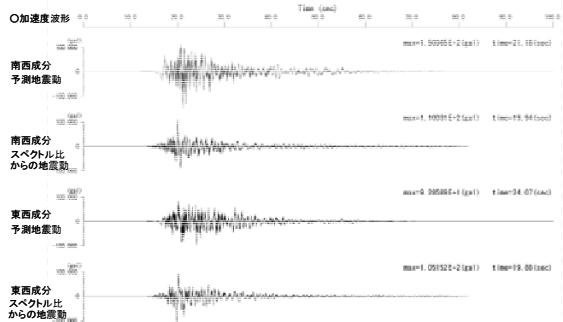


図-9 経験的グリーン関数法で推定した地震動との比較

#### 4. 被災事例の再現解析

図-9に示した大田地区岸壁位置での経験的グリーン関数法による能登半島地震の推定地震動を工学的基盤への入力地震動として、被災岸壁の再現解析(解析コードFLIP<sup>4)</sup>)を実施した。

岸壁周辺では昭和 51, 55 年および平成 2 年に土質調査が実施されている。岸壁変状の主要因は埋立土(B層)の液状化と想定されるため、埋立土の有効上載圧 98kPa における補正 N 値 ( $N_{98}$ ) をパラメータとして、岸壁の変状を再現する。埋立土の  $N_{98}$  は調査データ全平均で 5.90, 平成 2 年調査平均で 8.59 となり、岸壁が供用された荷役等の影響により締固められ、密になっていると想定される。このため、埋立土の  $N_{98}$  を 5.90~8.59 の間でモデル化し、解析を実施したものを表-2 で示す。なお矢板、控え杭の鋼部材は、全塑性モーメントを上限としたバイリニア、地盤は簡易設定法<sup>5)</sup>によりモデル化を行っている。

表-2 B層の $N_{98}$ を変化させた解析結果表

検討ケース	埋立層(B層)の解析物性値の評価 $N_{98}$	残留水平変位 (m)	背後地との段差 (m)	矢板等鋼部材の応力状態			
				最大モーメント発生時			
				矢板	控え杭(海側)	控え杭(陸側)	タイロッド
B層のN値がH2.S55.S51調査平均	5.90	0.95	0.51	×	×	×	○
B層のN値がH2調査平均	8.59	0.14	0.02	○	○	○	○
残留水平変位が被災岸壁と同一	7.94	0.23	0.09	○	○	○	○
参考ケース	7.50	0.37	0.17	○	○	○	○

\* ) × : 降伏モーメントに至る、○ : 降伏モーメントに至らない。

図-10に大田地区1号岸壁の解析モデル図を、図-11に変状が再現できた残留変形図を示す。用いた埋立土の  $N_{98}$  は 7.94 であり、ほぼ平成 2 年調査の平均に相当するので、妥当な値であると考えられる。またこの条件での岸壁構造部材は、降伏にも至らず、さらには  $N_{98}=7.5$  の埋立土の液状化抵抗が小さいケース(岸壁のはらみだし変位 37cm)においても降伏しなかった。

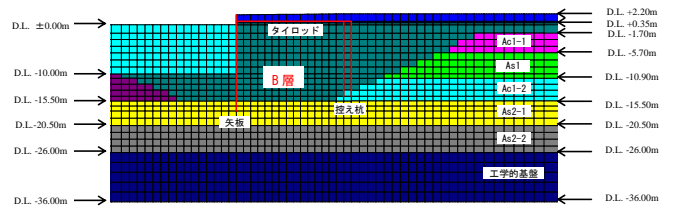


図-10 七尾港大田地区岸壁の解析モデル

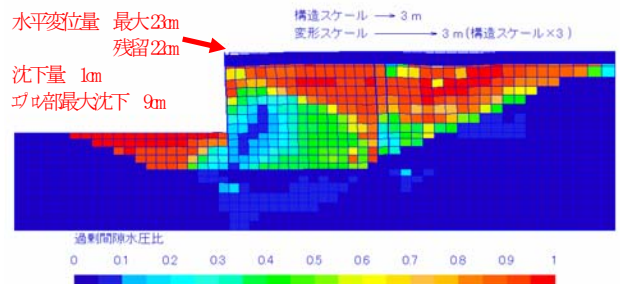


図-11 解析結果 (B層  $N_{98}=7.94$ )

図-11 では過剰間隙水圧比が非常に高くなっている領域があり、岸壁のはらみだし変位の原因であると考えられる。エプロン部最大沈下量は9cmであり、実被害で発生した段差20~50cmは再現できなかった。この点については、控え杭部と地盤の相互作用のモデル化として今後の課題である。

大田地区1号岸壁の残留水平変位量と矢板や控え杭に発生する最大モーメントとの関係を図-12に示す。岸壁の残留水平変位量が約35cm以上になると控え杭が塑性化し損傷すること、また岸壁の残留水平変位量が約75cm以上になると矢板が塑性化し損傷することが推察される。能登半島地震時における岸壁の水平残留変位は最大でも23cmであるから、矢板や控え杭などの鋼部材は塑性率0.6程度にとどまり、塑性化するような損傷は生じていないと考えられる。また、図-13よりタイロッドは破断強度まで余裕を残していると推察される。

以上より、土中部の部材は降伏しておらず、構造物全体は健全であると判断した。

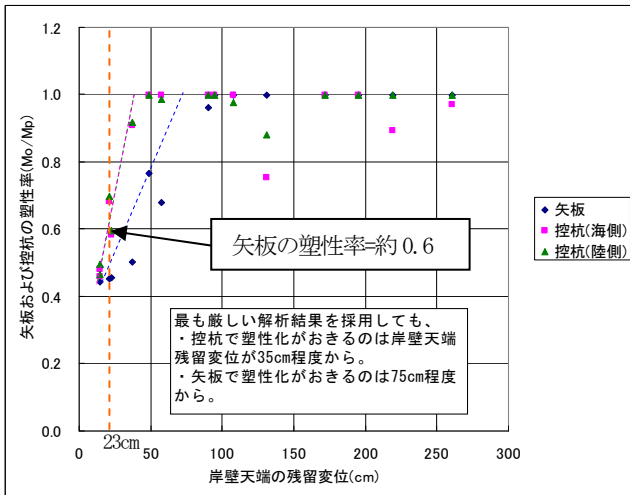


図-12 岸壁の残留変位量と矢板や控え杭に発生する最大モーメントの関係（モーメントは全塑性モーメントの比で表示）

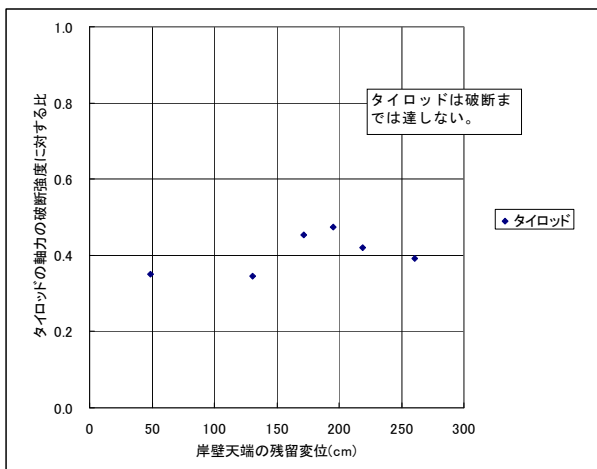


図-13 岸壁の残留変位量とタイロッドの軸力の関係（軸力は破断強度でとの比表示）

## 5. まとめ

- ・経験的グリーン関数法によって得られた七尾港大田地区の本震は、K-NET 七尾と七尾港大田地区の余震観測記録の比を用いて再現した値と比べて、加速度波形の最大値、主要動の継続時間、エンベロープ、速度波形の最大値、位相に関してよく一致しており、精度の高い予測ができていていると考えられる。
- ・構造物の変形に大きく影響する部分の地盤については地盤物性を埋立後の経過時間、荷重履歴等を考慮して適切に設定する必要がある。
- ・今回の被災事例の再現解析では、地震時の挙動に大きな影響を与えるB層の物性値を適切に評価することにより、被災を再現することができ、構造物が健全であることがわかった。
- ・FLIP 解析は有限要素法であるため、大きいメッシュのずれを表現できないため、実現象の背後地の段差を忠実に再現することはできなかった。
- ・よって、段差が小さい結果が得られても、実現象では、FLIP 解析結果よりも大きくなる可能性があることに留意しなければならない。今後、段差が忠実に再現できるような解析手法の開発が望まれる。
  - ・今後、地震等で構造物が受けた影響による健全度を判断する方法として、大地震の揺れを精度良く評価できる経験的グリーン関数法を使用することが適切である。
  - ・そのためには、地震後早急に被災箇所に簡易地震計等を置き、余震観測を行うことが必要である。
  - ・その結果より、災害復旧を行う際の検討資料や、維持管理を考慮した港湾施設設計に反映していくことを期待する。

謝辞：検討にあたり断層モデルや簡易地震計データ提供など、港空研 野津 厚 主任研究員にご指導を受けました。ここに記して謝意を表するものである。

## 参考文献

- 1) 災害時地震・津波速報 平成19年(2007年)能登半島地震 平成19年4月20日、気象庁  
[http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2007\\_03\\_25\\_noto/saigai.pdf](http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2007_03_25_noto/saigai.pdf)
- 2) <http://www.fnet.bosai.go.jp>
- 3) 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 Vol.155, P.361-374, 2003
- 4) Iai, S. Matsunaga, Y. and Kameoka, T. (1990): Stain space plasticity model for cyclic mobility, Report of Port and Harbour Research Institute, Vol. 29, No. 4, pp. 27-56
- 5) 液状化による構造物被害予測プログラム FLIP において必要な各種パラメータの簡易設定法, 港湾技研資料, No. 869, 1997