

地震に強い港湾を低コストで実現するための 港湾計画上の工夫に関する提案

野津 厚¹

¹国立研究開発法人 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域（〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1）

今後数十年間には、南海トラフ等の巨大地震の発生が懸念されており、港湾の地震対策は喫緊の課題であるが、一方で、わが国の厳しい財政事情を考えれば、地震に強い港湾をいかに小さいコストで実現するかが重要な課題である。これまで、港湾における地震対策は、計画－設計－施工－維持管理という一連のプロセスのうち、主に設計段階の工夫によって行われてきているが、これに加えて、計画段階において種々の工夫を行うことで、地震に強い港湾をより小さいコストで実現することに寄与できるものと考えられる。ここではこのような観点からのいくつかの提案を行い議論したい。

キーワード 地震、港湾計画、常時微動、栈橋、活断層

1. はじめに

阪神淡路大震災による神戸港の甚大な被害はいまだに記憶に新しいところである。神戸港ではすべてのコンテナバースが利用できなくなり（写真-1）、わが国の経済活動にも大きな影響を及ぼすことになってしまった。近い将来の発生が懸念される巨大地震においても、地震後の早い段階から、必要最小限の幹線貨物輸送機能の確保を図ることが必要である。また、神戸港が地震後において大きな損傷を受けながらも緊急物資や避難民の輸送に活用されたように（写真-2）、周囲を海に囲まれる日本において港湾は大地震後の復旧復興のための被災地への人・物資の輸送拠点としての重要な機能も求められる。今後数十年間には、南海トラフ等の巨大地震の発生が懸念されており、港湾の地震対策は喫緊の課題であるが、一方で、わが国の厳しい財政事情を考えれば、地震に強い港湾をいかに小さいコストで実現するかが重要な課題である。

これまで、港湾における地震対策は、計画－設計－施工－維持管理という一連のプロセスのうち、主に設計段階の工夫によって行われてきている。例えば地盤改良を行うことにより係留施設の地震時の変形を適切な範囲に押さえるといった対策である。これらの対策は有効ではあるものの、コスト縮減という観点からは、設計段階でとりうる対策に限界があることも事実である。

今後は、設計段階の工夫に加えて、計画段階において種々の工夫を行うことで、地震に強い港湾をより小さい



写真-1 阪神淡路大震災による神戸港の被害



写真-2 地震直後の神戸港における緊急物資の荷揚げ

コストで実現することに寄与できるものと考えられる。本稿ではこのような観点からのいくつかの提案を行う。具体的には次の3点について提案を行う。

- ①港湾計画における常時微動観測の活用
- ②土留めとの距離を十分にとった栈橋構造の活用

③活断層地震の走向への配慮

以下の各章では、①～③について順次説明を行う。なお、これらのうち、最も重要性が高いと著者が考えているのは①である。また①は港湾施設のみならず他の社会基盤施設に対しても応用できる考え方である。

2. 港湾計画における常時微動観測の活用

(1) サイト特性とは何か

一般に、地震による地盤の揺れ（地震動）は震源断層の破壊過程の影響（震源特性）と震源から地震基盤に至る伝播経路の影響（伝播経路特性）、それに地震基盤から地表に至る堆積層の影響（サイト特性）の三者によって決まる（図-1）。ここに地震基盤とはS波速度が3000m/sを越えるような非常に堅い岩盤のことである。地震基盤上面から地表にかけてはS波速度コントラストが大きく、それにより地震波は大きく増幅される。サイト特性の基本パターンを図-2に示す。まず、①地震基盤あるいはそれに近い岩盤が露出している場所では、揺れは小さい。②岩盤上に薄い堆積層がある場所では、堆積層の固有周期が短いので、周期の短い地震動が卓越しやすい。③岩盤上に厚い堆積層がある場所では、堆積層の固有周期が長いので、周期の長い地震動が卓越しやすい。

堆積層が地震の揺れに大きな影響を与えた事例は数多く知られている。その一例として2000年鳥取県西部地震の例を図-3～図-4に示す。鳥取県境港市の気象庁観測点と港湾の観測点（境港-G）は弓ヶ浜半島の堆積層の上に位置しており、一方、防災科学技術研究所の観測点（SMN001とSMNH10）は島根半島の山麓に位置している（図-3）。2000年鳥取県西部地震の最大速度は前者が後者の4倍程度となっており（図-4）、堆積層の影響が大きいことを示している。被害も境港市内に集中している。

文献1)では防災科学技術研究所および港湾地域強震観測による全国の強震記録を利用し、観測点におけるサイト増幅特性（地震基盤～地表までの地震動の増幅特性を

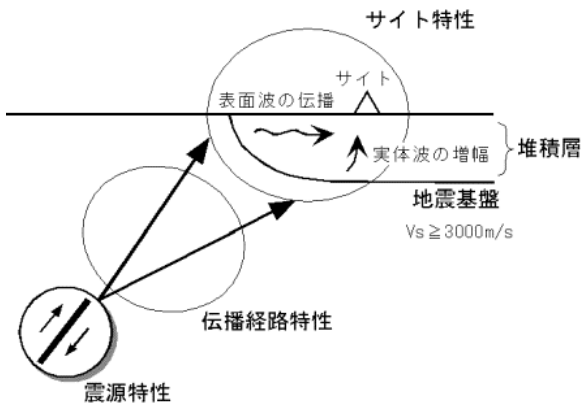


図-1 震源特性・伝播経路特性・サイト特性

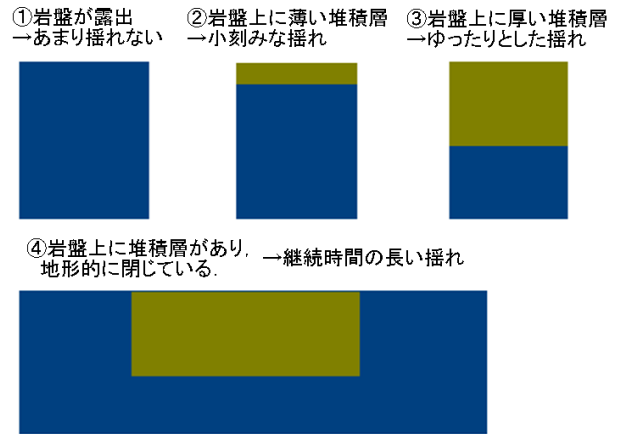


図-2 サイト特性の基本パターン



図-3 境港周辺の地形（第八管区海上保安本部提供）

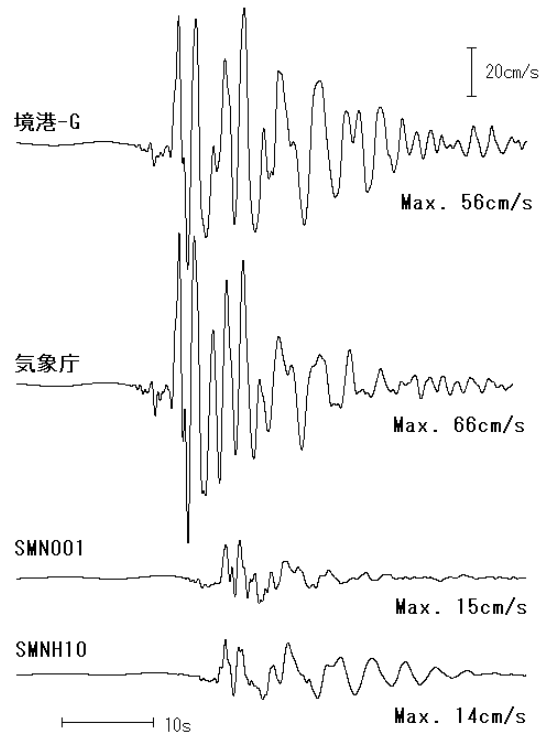


図-4 鳥取県西部地震の際に境港周辺で観測された速度波形

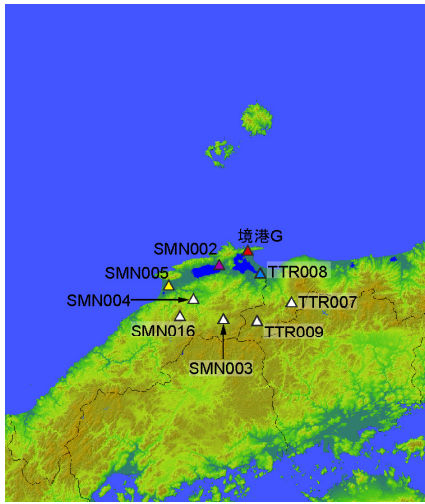


図-5 中海・宍道湖周辺の観測点

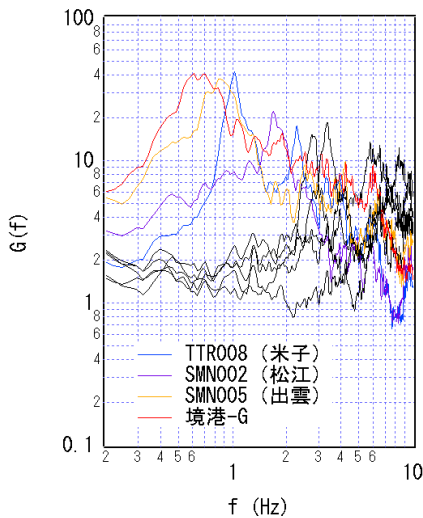


図-6 図-5に示す観測点でのサイト増幅特性

フーリエスペクトルの倍率で示したものを)を求めている。その一例として、中海と宍道湖を取り囲む沖積平野とその南の中国山地の観測点(図-5)に対して算定されたサイト増幅特性を図-6に示す。沖積平野に位置する境港-G, TTR008, SMN002, SMN005では、いずれも0.5-2Hzの範囲に10を越えるピークを有する。一方、山地に位置するTTR007, TTR009, SMN003, SMN004, SMN016ではいずれも1Hz以下の範囲ではサイト増幅特性は1~2の範囲にある。このように、平野と山地ではサイト増幅特性に著しい相違がある。

(2) 東日本大震災の地震動とサイト増幅特性

このようなサイト増幅特性の違いは同一港湾内でも見られる。東日本大震災においては、同一港湾内におけるサイト増幅特性と地震動の違いが港湾施設の被害程度を左右していると見られる事例があった。

福島県の小名浜港においては、港湾内におけるサイト増幅特性の面的な分布を把握する目的で、本震の約2ヶ月後の5月2日から5月5日にかけて、図-7に示す4地点(小名



図-7 小名浜港平面図と余震観測位置

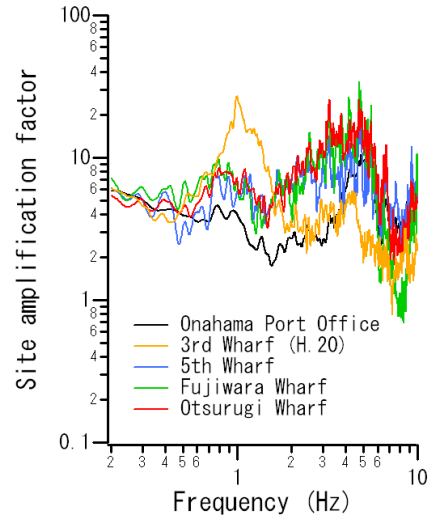


図-8 小名浜港湾事務所、3号埠頭、5号埠頭、藤原埠頭、大剣埠頭におけるサイト増幅特性

浜港湾事務所、5号埠頭、藤原埠頭、大剣埠頭)において余震観測が行われた²⁾。また、H20年度には小名浜港湾事務所により3号埠頭において臨時の地震観測が実施されている(観測点位置を同じく図-7に示す)。文献²⁾ではこれらのデータを総合することにより各地点における経験的なサイト増幅特性が求められている。その結果を図-8に示す。港湾構造物に被害をもたらしやすい0.3-1Hz程度の周波数帯域では、3号埠頭のサイト増幅特性が群を抜いて大きいことがわかる。

これらと被害との対応について見るため、各観測点の最寄りの係留施設の被害について見ていく。まず、3号埠頭の岸壁(-10m)(矢板式、設計震度0.15)においては顕著な被害が生じており、最大せり出し量は1.6mであった。また岸壁背後には1mを越える段差も生じた(写真3~写真4)。次に、5号埠頭の岸壁(-12m)(ケーソン式、設計震度0.20)の被災状況を写真5に示す。被害は生じているものの、3号埠頭ほどの顕著な被害ではないことがわかる。この岸壁の最大せり出し量は0.8mであった。つづいて、藤原埠頭の岸壁(-12m)(ケーソン式、設計震度0.12)の被災状況を写真6に示す。既設ケーソンの前面に段差の生じる被害が生じてはいるものの、やはり3号埠頭ほどの顕著な被害ではないことがわかる。



写真-3 小名浜港3号埠頭3-2岸壁における被災状況



写真-6 小名浜港藤原埠頭岸壁 (-12m) 被災状況



写真-4 小名浜港3号埠頭3-2岸壁の背後における段差
(段差の下端に置かれている紙はA4サイズ)



写真-7 小名浜港大剣埠頭岸壁 (-7.5m) 被災状況



写真-5 小名浜港5号埠頭岸壁 (-12m) 被災状況

この岸壁の最大せり出し量は0.3mであった。最後に、大剣埠頭の岸壁 (-7.5m) (ケーソン式、設計震度0.10) の被災状況を写真-7に示す。被害は生じているものの、やはり3号埠頭ほどの顕著な被害ではないことがわかる。この岸壁の最大せり出し量は0.5mであった。

表-1 小名浜港地震観測点付近の4施設の比較

施設名称	構造形式	設計震度	最大せり出し量
3号埠頭岸壁 (-10m)	矢板式	0.15	1.6m
5号埠頭岸壁 (-12m)	ケーソン式	0.20	0.8m
藤原埠頭岸壁 (-12m)	ケーソン式	0.12	0.3m
大剣埠頭岸壁 (-7.5m)	ケーソン式	0.10	0.5m

これら4施設の比較を表-1に示す。構造形式や設計震度が異なるため単純な比較はできないが、1mを越える水平変位が生じたのは3号埠頭岸壁 (-10m) のみである。また、岸壁背後に1mを越える段差が生じたのも、写真-3～写真-7に示すように、3号埠頭岸壁 (-10m) のみである(ただし5号埠頭岸壁 (-12m) 南端の護岸との接続部

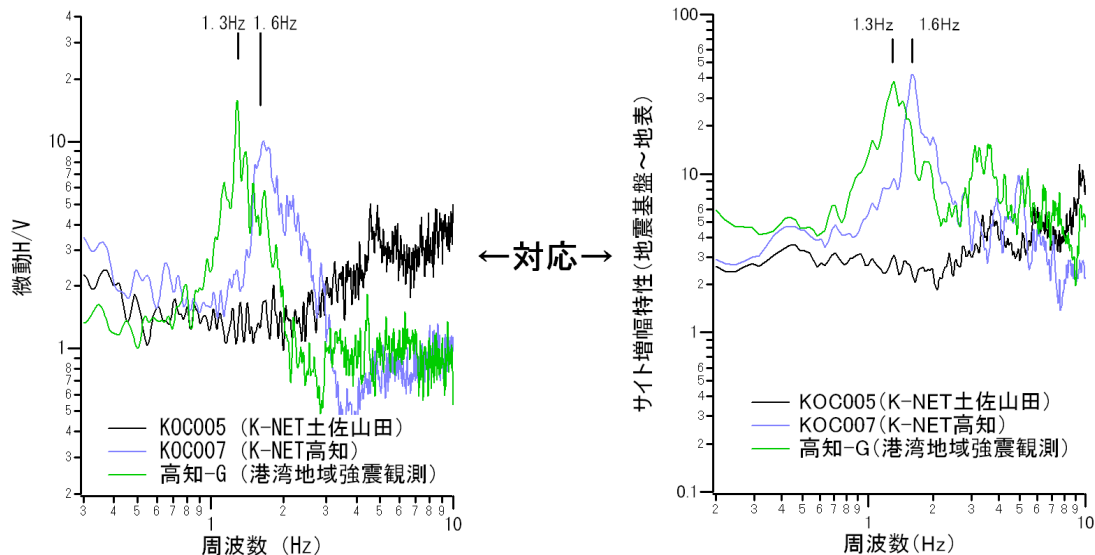


図-9 高知港とその周辺の強震観測地点における常時微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性¹⁾の関係

を除く)。以上の比較から、場所毎の地震動の大小が係留施設の被害程度の違いをもたらしていると考えられる。

このように、東日本大震災においては、同一港湾内においても地震動が場所毎に大きく異なる場合があり、そのことが港湾施設の被害程度の大小を左右している実態が明らかになってきた。従って、今後の地震対策においては、港湾内におけるサイト増幅特性の分布を詳細に調べ、サイト増幅特性の大きい場所に立地する施設に対して特に入念に対策を行うことが必要であるが、これをもう一步進めて考えると、港湾計画の段階であらかじめサイト増幅特性が小さいと考えられる場所に優先的に施設を立地させるようにすれば、地震に強い港湾をより小さいコストで実現することにおおいに寄与すると考えられる。一例として、既存施設を改良して耐震バースに格上げするといった場合に、サイト増幅特性が小さい、揺れにくい場所にある施設を選択して改良すれば、より小さいコストで改良できるものと考えられる。

(3) 常時微動観測

対象地点におけるサイト特性を評価する上で最も信頼性の高い方法は中小地震観測を行う方法であるが、港湾内のあらゆる地点において中小地震観測を実施することはかなり困難である。そこで、より簡便な手法として常時微動観測の活用を考える。

地盤は地震でない時も人には感じられないような微小な振幅で常に揺れており、これを感度の良い計器で計測するのが常時微動観測である。常時微動観測はコストパフォーマンスが良く、一人でも一日あれば港湾内の十数点で観測することは十分に可能である。常時微動観測のデータは、水平動と上下動のスペクトル比をとって整理することが一般的であり³⁾、こうして得ら

れたH/Vスペクトルは、地震観測から得られたサイト増幅特性と良く対応することがわかっている。

例えば図-9は高知港とその周辺の強震観測地点において常時微動観測を実施し、その結果得られた常時微動H/Vスペクトルを、強震観測記録から評価されたサイト増幅特性¹⁾と比較したものである。ここでH/Vスペクトルは文献4)の方法で算定を行っている。この方法では3区間のデータからH/Vスペクトルが算定されるが、図-9ではそれらの平均を示している。高知-Gでは常時微動H/Vスペクトルが1.3Hz付近に明瞭なピークを有しているが、サイト増幅特性もほぼ同じ周波数にピークを有している。K-NET高知では常時微動H/Vスペクトルが1.6Hz付近に明瞭なピークを有しているが、サイト増幅特性もほぼ同じ周波数にピークを有している。K-NET土佐山田では、常時微動H/Vスペクトルが明瞭なピークを有していないが、サイト増幅特性も同様に明瞭なピークを有していない。このように常時微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性との間には良好な対応関係が認められる。

このように、常時微動観測を利用することで、「対象地点は地震波が増幅されやすい場所か、されにくい場所か」「増幅されやすいとすれば、どのような周波数の地震波が増幅されやすいか」といった情報を得ることができる。例えば、港湾構造物に被害をもたらしやすい0.3-1Hz程度の周波数帯域にH/Vスペクトルのピークがあれば、耐震性の観点から不利なゾーンであると判断することができる。

(4) 港湾計画における常時微動観測の活用

港湾計画における常時微動観測の活用の手順は次のようになると考えられる。

STEP1 常時微動観測の実施

※常時微動観測は極めて低コストである。

※新たに観測を実施しなくても、設計地震動の策定のために既にデータの得られている港湾もある。

STEP2 常時微動観測データをもとに、港湾内を揺れやすい場所と揺れにくい場所にゾーニング（すでに設計地震動の策定に関連してゾーニング実施済の港湾も多い）。

STEP3 係留施設等の立地においてこの情報を活用（他の要因と併せた総合的判断）

3. 土留めとの距離を十分にとった栈橋の活用

過去の地震において、栈橋の被害は、土留めの海側への移動に伴い、渡版を介して上部工が土留めに押されるか、または、土留めの移動に伴い捨石が海側に変位し杭を押すか、そのいずれかで生じている。例えば阪神淡路大震災における神戸港高浜栈橋の被害⁵⁾や2005年福岡県西方沖の地震における博多港須崎埠頭栈橋の被害⁶⁾はこのようなメカニズムで生じている。栈橋単独の振動による被害は少ない。

よって、土留めとの距離を十分にとった栈橋は地震に対して著しく有利な構造形式であると考えられる。このような構造形式が可能となるように計画しておけば、所要の耐震性能を有する施設をかなり小さなコストで実現できるものと考えられる。このような栈橋の一例として那覇港の大型旅客船ターミナルがある。

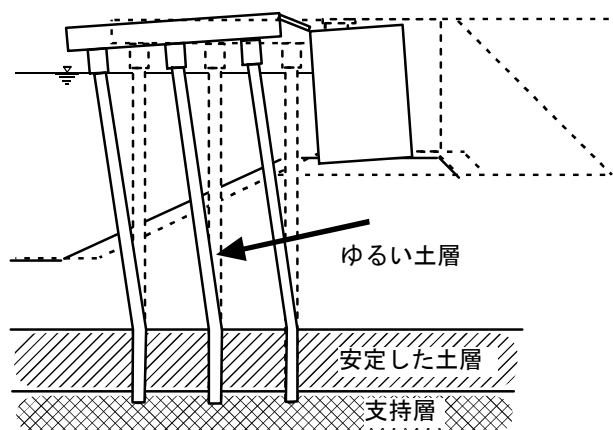


図-10 栈橋の典型的な被害形態

4. 活断層地震の走向への配慮

阪神淡路大震災の際、神戸港工事事務所で観測された揺れは、震源である六甲—淡路断層系に対して直交する向きに卓越していた。このことは、GPSが捉えたポートアイランド及び六甲アイランドの岸壁の残留変位

の分布⁷⁾にも明瞭に表れている。東西方向の法線を有する岸壁の方が、それと直交する岸壁よりも、より大きな被害を受けていることがわかる。岸壁は法線直交方向の揺れに弱いため、このような現象が生じたと考えられる。

内陸活断層で発生する大地震の震源近傍では、横ずれ断層や逆断層といった断層の種類に関わらず、断層直交方向に特に強い揺れの生じる傾向がある⁸⁾。この性質を利用して、想定される強い揺れの向きに対して最も有利となるように岸壁を配置すれば、岸壁の地震時の被害を軽減することができる⁹⁾。

5. まとめ

本稿では地震に強い港湾をより小さいコストで実現するための港湾計画上の工夫として以下の3つの提案を行った。

- ①港湾計画における常時微動観測の活用
- ②土留めとの距離を十分にとった栈橋構造の活用
- ③活断層地震の走向への配慮

このうち汎用性の観点から最も重要と考えられるのは①である。

参考文献

- 1) 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増幅特性，港湾空港技術研究所資料，No.1112，2005年。
- 2) 野津厚・若井淳：東日本大震災で被災した港湾における地震動特性，港湾空港技術研究所資料，No.1244，2011年。
- 3) 中村豊：常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定，鉄道総研報告，Vol.2，No.4，pp.18-27，1998年。
- 4) 長尾毅・山田雅行・野津厚：常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性の経験的補正方法に関する研究，構造工学論文集，Vol.56A，pp.324-333，2010年。
- 5) 及川研・菅野高弘・三藤正明・中原知洋：兵庫県南部地震により被災した杭式栈橋に関する実験的研究，第10回日本地震工学シンポジウム，1998年。
- 6) 菅野高弘・野末康博・田中智宏・野津厚・小濱英司・ハザリカ=ヘマンタ・元野一生：2005年福岡県西方沖の地震による港湾施設被害報告，港湾空港技術研究所資料，No.1165，2007年。
- 7) Inagaki, H., S. Iai, T. Sugano, H. Yamazaki and T. Inatomi: Performance of caisson type quay walls at Kobe Port, Special Issue of Soils and Foundations, pp.119-136, 1996.
- 8) 野津厚，井合進，W.D. Iwan：震源近傍の地震動の方向性に関する研究とその応用，港湾技術研究所報告，第40巻，第1号，pp.107-167，2001年。
- 9) 野津厚，池田薫：直下型地震の揺れの向きを考慮した耐震強化岸壁の配置計画，港湾，第78巻，第9号，pp.48-51，2001年。