

苫小牧港周文ふ頭の耐震性能の照査手法について —多重非線形挙動を考慮したL2地震動の設定—

室蘭開発建設部 苫小牧港湾事務所

○坪井 百花
青野 奨
本間 薫

苫小牧港東港区周文ふ頭の耐震強化岸壁の設計に当たり、照査用のレベル2地震動の算定を行った。対象となる地震は、設計箇所背後にある2つの活断層が連動するものとなり、この外力の評価や設定方法が設計面での課題とされた。このため、算定過程で表層地盤の多重非線形挙動を考慮することで、現地条件に即した地震動の設定が可能となり、適切で効率的な岸壁の設計を行うことが可能となった。

キーワード：耐震強化岸壁、L2地震動、防災、自然災害

1. はじめに

苫小牧港は、フェリーやRORO船、コンテナ船による定期航路が週約115便就航するなど、国内外の様々な貨物を取り扱っており、北海道のみならず我が国の産業・経済を支える北日本最大の物流拠点として役割を果たしている。

「苫小牧港東港区浜厚真地区複合一貫輸送ターミナル整備事業」は、北海道産の農水産物等のフェリー貨物やバルク貨物の非効率な輸送体系の改善を図るため、浜厚真地区周文ふ頭において新たに水深9m、延長270mの岸壁を整備し、地域産業の競争力強化を推進するとともに、耐震強化岸壁とすることにより、サプライチェーンの強靱化、災害対応力の強化を図ることを目的とした事業である。

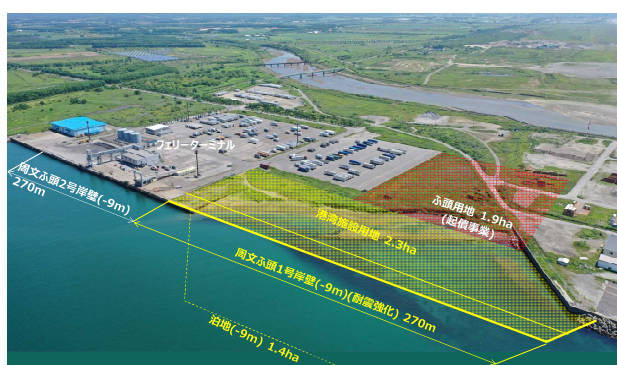


図-1 東港区浜厚真地区周文ふ頭

岸壁の耐震設計については、2018年(平成30年)の「港湾の施設の技術上の基準」(以下「技術基準」という。)の改定の際に東北地方太平洋沖地震以降に得られ

た最新の知見を踏まえた設計条件の見直しが行われており、この基準に基づき設計を行った本施設の結果について報告する。

2. レベル2地震動の算定

(1) レベル2対象地震の選定

技術基準では耐震強化岸壁の対象地震は、技術基準対象施設を設置する地点で発生すると想定される地震のうち、最大規模の強さを有するものされ、表-1のように整理されている。

表-1 レベル2対象地震

(a) 過去に大きな被害をもたらした地震の再来
(b) 活断層による地震
(c) 地震学的あるいは地質学的観点から発生が懸念されるその他の地震
(d) 中央防災会議や地震調査研究推進本部など国の機関の想定地震
(e) 地域防災計画の想定地震
(f) M6.5の直下地震

苫小牧港では、平成23年度に西港区本港地区西ふ頭において耐震強化岸壁(水深9m)の設計を行っており、その際のレベル2対象地震は、苫小牧市防災計画で想定している地震などを参考に①M6.5直下型地震、②石狩低地東縁断層帯南部の地震と設定した。(表-2)なお、近年、発生が懸念されている日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震については、対象とした2つの地震よりも最大震度が小さいため除外している。

今回設計する周文ふ頭のレベル2対象地震については、2つの地震のほか、設計箇所と震源が近く、北海道で初

めて震度7が観測された2018年北海道胆振東部地震を表1の分類(a)過去に大きな被害をもたらした地震の再来として対象に加えた。

表-2 苫小牧港の耐震強化岸壁におけるレベル2対象地震

施設名称	東港区浜厚真地区周文ふ頭(当該施設)	西港区本港地区西ふ頭
設計年度	令和3年度	平成23年度
適用基準	平成30年改定	平成19年改定
対象地震	①M6.5直下型地震 …分類(f) ②石狩低地東縁断層帯主部・南部の連動地震 …分類(b)(d) ③北海道胆振東部地震(M6.7)(2018.9.6) …分類(a)(b)	①M6.5直下型地震 …分類(f) ②石狩低地東縁断層帯南部の地震 …分類(b)(d)

また、石狩低地東縁断層帯は、図-2のとおり主部と南部が併走する区間において地下で収れんしている可能性があるため、両部が同時に活動、連動するケースも考慮することとした。この場合、全体の断層の長さは、108km以上となり、「マグニチュード8.2もしくはそれ以上の地震が発生する可能性がある。」¹⁾とされている。

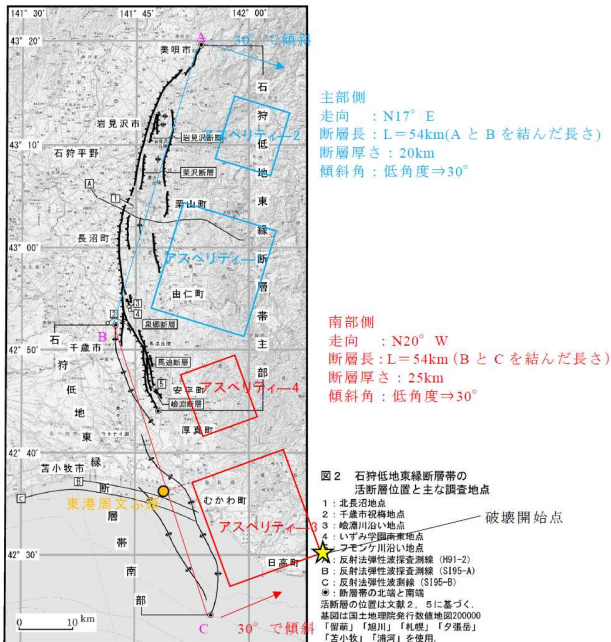


図-2 石狩低地東縁断層帯主部・南部の連動地震の破壊開始点及びアスペリティ配置

(2) レベル2地震動の算出

対象とした3つの地震毎にレベル2地震動の算出を行った。石狩低地東縁断層帯主部・南部の連動地震は、連動する順番で地震動の値が変化することから、②北側の主部から破壊するケースと②'南側の南部から破壊するケースで算定を行っている。

算出結果は、表-3のとおりである。西ふ頭の耐震強化岸壁で対象とした①M6.5直下型地震の最大加速度は309Galであったが、本施設でもほぼ同程度の値となった。また、③北海道胆振東部地震では、苫小牧港でも港湾施設に被害が生じたものの、その最大加速度は①と比較して小さい値となった。

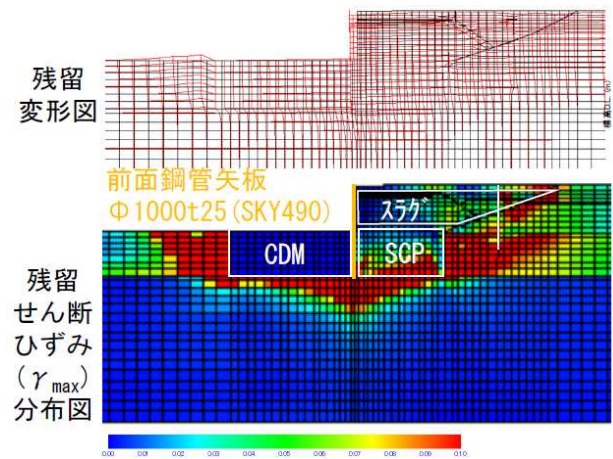
一方で石狩低地東縁断層帯主部・南部の連動地震では、設計箇所と断層帯が近いこと、南側(南部)から破壊されるケース(②')では、配置されるアスペリティが大きいことから、その最大加速度、速度PSI値は非常に大きな値となった。

表-3 対象地震毎のレベル2地震動

地震動	方向	最大加速度 (Gal)	加速度フーリエスペクトル (Gal・s)	速度PSI値 (cm/s ^{1/2})
①M6.5直下型地震	NS	341.0	94.4	55.7
	EW	264.0	93.9	55.6
②石狩低地東縁断層帯主部・南部の連動地震(北側から)	N20° W	491.6	105.8	187.2
	N70° E	785.8	167.3	315.2
②'石狩低地東縁断層帯主部・南部の連動地震(南側から)	N20° W	611.9	222.1	211.8
	N70° E	1,072.3	345.9	354.5
③北海道胆振東部地震	NS	166.2	27.8	36.5
	EW	114.3	28.3	36.8

(3) レベル2地震動の評価

前述の西ふ頭で算出した既往のレベル2地震動(①)で試算を行った構造(前面鋼管矢板φ1000 t25 SKY490、控え杭φ1000 t10 SKK400)に、新たに算出した②'石狩低地東縁断層帯主部・南部の連動地震(南側から)を作用



試算構造	前面鋼管矢板 φ 1000t25 (SKY490) 控え杭 φ 1000t10 (SKK400) 前面(CDM) + 背後(SCP)
水平変位	2.16m > 性能規定1.0m 【NG】
鉛直変位	0.44m (規定値なし)

図-3 レベル2地震動の試算

させた場合、水平変位量が規定値の1.0mを大きく上回るとともに、前面鋼管矢板の降伏曲率、控え杭の限界曲率を超過する結果となった。

3. 多重非線形効果について

(1) 多重非線形効果による地震動への影響

強震時においては、表層地盤の非線形挙動が顕在化し、地震動の卓越周波数が低周波数側に移動するなど、地震動が非線形挙動（剛性が低下し、減衰が増加する現象）の影響を受けることは広く知られている。

図-4に直達S波および後続位相に対応する地震波の堆積層内における波線経路の概念図を示す。この図に示すように、直達S波は最短経路でサイトに到達するが、後続位相は、堆積層内で反射を繰り返し、表層地盤を複数回横切ってからサイトに到達すると考えられる。従って、大地震の際に表層地盤が非線形挙動を示せば、地震波はその波線経路において非線形挙動の影響を複数回受けることになる。このことを多重非線形効果²⁾と呼んでいる。

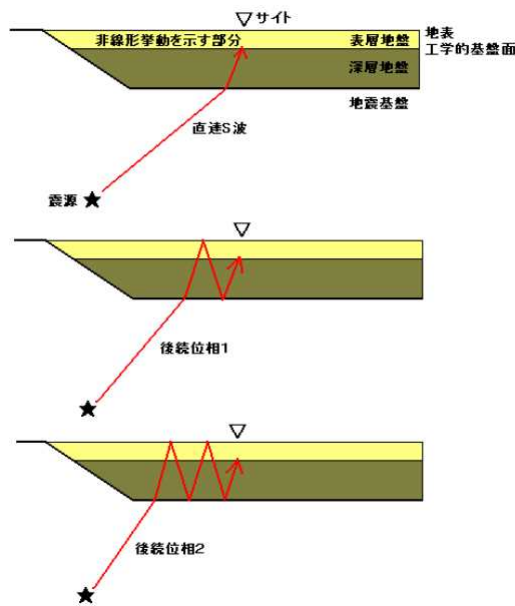


図-4 多重非線形効果の概念図

この効果が生じると、地震動の卓越周波数が低下するとともに、堆積層に起因する後続位相の継続時間が大幅に短くなる。港湾構造物をはじめとする土木構造物の被災

程度は地震動の継続時間に大きく左右されるため、この時間の正確な予測はたいへん重要な課題となる。

(2) 当該施設への多重非線形効果の適用性

②'の強震波形計算では、最大加速度は1,073Gal、速

度PSI値は345.9cm/s^{1/2}と1995年兵庫県南部地震（最大加速度539.2Gal、速度PSI値153.8cm/s^{1/2}）を大きく上回ることになった。このため、この評価について学識者に意見を求めたところ、地震力を過大に評価している可能性が高く、対象地震による地盤の非線形挙動を考慮して算出すべきとされた。このため、これまでの算出事例を参考に、多重非線形効果を考慮した地震力の設定を行うこととした。

4. 多重非線形効果の補正について

多重非線形効果については、野津ら²⁾による研究に基づき、地震波の波形合成の過程で点震源からの地震波に対しあらかじめ非線形パラメーターによる補正を行った。非線形パラメーターは、表層地盤の非線形挙動が生じた場合には、S波速度が低下し後続位相の到来時刻は遅くなることから、平均的なS波速度の低下率（ v_1 ）および堆積層における平均的な振幅の減衰定数の増分（ v_2 ）を設定するが、

これまでの知見を踏まえて、表-4-の値を採用した。

表-4 非線形パラメーター

S波速度の低下率 (v_1)	減衰定数の増分 (v_2)
0.84	0.027

多重非線形効果を考慮した結果、図-5のとおり、後続位相のフーリエスペクトルのピーク値、継続時間は低下し、レベル2地震動は、約20%程度低減される結果となった。

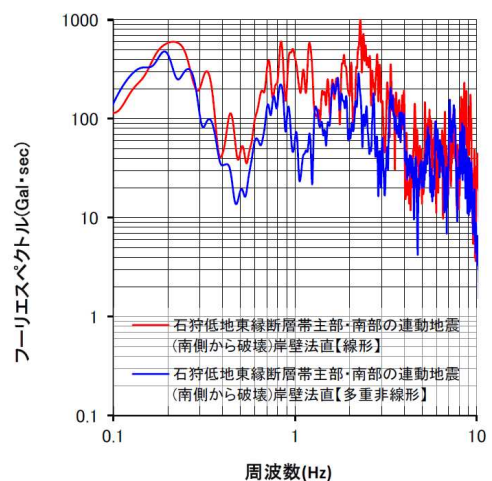


図-5 フーリエスペクトル図

表-5 多重非線形効果を補正したレベル2地震動

地震動	方向	最大加速度 (Gal)	加速度フーリエスペクトル (Gal・s)	速度SI値 (cm/s ^{1/2})
②石狩低地東縁断層帯主部・南部の連動地震(南側から)	N20° W	(611.9) 498.0	(222.1) 130.2	(211.8) 178.3
	N70° E	(1,072.3) 821.1	(345.9) 188.6	(354.5) 304.6

上段()は、多重非線形効果補正前の値。

5. 構造への反映

以上の検討で求めた地震力により決定した構造は、図-6に示すとおりである。構造形式は、図-3で試算を行った鋼管矢板式控え杭式構造と同様であり、岸壁前面には地盤支持力を増強するためのサンドコンパクションパイル工法を用い、背面の陸上部は、液状化対策としてサンドドレーン工法とサンドコンパクションパイル工法の併用による地盤改良を行うこととした。

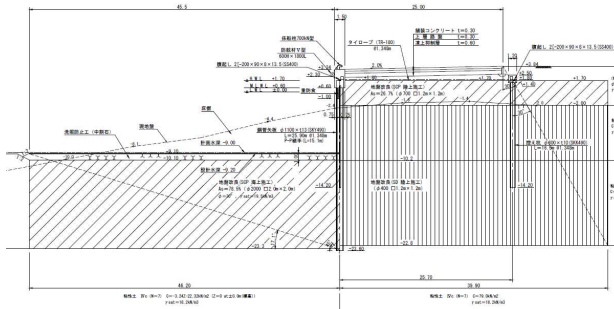


図-6 決定構造 (標準部)

なお、多重非線形効果を考慮したレベル2地震動の設定により、鋼管矢板などの構造部材の規格を小さくすることが可能となり、資材コストで10%程度の削減が可能となっている。(表-6)

表-6 構造部材の比較

構造部材	多重非線形挙動あり (決定構造)	多重非線形挙動なし
鋼管矢板	φ1100×t13 SKY490	φ1200×t25 SKY490
控杭	φ800×t10 SKY490	φ1200×t12 SKK490

6. おわりに

当該施設の耐震設計で対象とするレベル2地震動は、石狩低地東縁断層帯の主部と南部の連動地震となり、その地震力は苫小牧港で耐震強化岸壁の設計を行った際の値や過去に発生した大規模な地震よりも非常に大きく、過大評価となる恐れがあった。このため、強震時における表層地盤の非線形挙動を考慮することとし、多重非線形効果の補正を行い地震力を算出することで、適切な構造を決定することが可能となった。

平成30年に発生した北海道胆振東部地震の際、苫小牧港では緊急物資輸送用の耐震強化岸壁が不足し、災害支援船を受け入れる岸壁の確保が難航した。

本施設は令和4年度から現地着手したところであるが、発生が懸念されている日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震など、大規模地震への備えとして早期完成を図り、地域の災害対応力の強化に貢献したいと考えている。



図-7 周文ふ頭岸壁(9m)(耐震)完成イメージ

謝辞: 本設計のL2地震動の設定にあたり、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地震防災研究領域の野津厚グループリーダーの助言頂きました。心からの感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：石狩低地東縁断層帯の長期評価の一部改訂について (H22.8.26)
- 2) 独立行政法人港湾空港技術研究所：港湾空港技術研究所資料 No.1284 表層地盤の非線形挙動を考慮した 2011 年東北地方太平洋沖地震の強震動シミュレーション 野津ら
- 3) 日本地震工学会論文集第 16 巻第 4 号特集号、2016：多重非線形効果を考慮した簡便な強震動シミュレーション手法の検証とその予測問題への応用方法 野津厚