

移動式荷役機械等の走行性能に着目した 荷さばき地における地震時の性能規定に関する設定事例

岩原克仁*・竹信正寛**

要 旨

コンテナターミナルの荷さばき地は、係留施設背後においてコンテナ船から荷揚げする貨物の一時的な蔵置エリアであり、各種クレーン等に代表される荷役機械や上屋が設置されている。「港湾の施設の技術上の基準」によれば、「災害時に耐震強化施設と一体となって機能を発揮する必要がある荷さばき地」には、レベル2地震動に対する要求性能が設定されており、当該施設の要求性能等に対する港湾基準上の解釈において「修復性」とされている。

一方で、その性能照査項目および限界値を定める標準的な指標は、(荷さばき地の)「損傷」とされており、荷さばき地に対するレベル2地震動に対する具体的な性能照査項目や限界値の指標の設定は、設計者の判断に委ねられているのが実情である。

本資料は、今後の設計実務の参考とするため、耐震強化施設(特定(幹線貨物輸送対応))の背後に存在する、コンテナターミナル内における荷さばき地のレベル2地震動後の性能規定値の設定事例およびその性能照査手法の一例を、既往検討事例を収集して整理したものである。

キーワード：コンテナターミナル，移動式荷役機械，荷さばき地，耐震強化施設，性能照査事例

*港湾・沿岸海洋研究部港湾技術センター主査
**港湾・沿岸海洋研究部港湾施設研究室長

目 次

1. はじめに	1
2. 移動式荷役機械等の地震後の走行性能等を考慮した荷さばき地の性能規定例	1
2.1 概要	1
2.2 検討対象とした移動式荷役機械等	1
2.3 移動式荷役機械等を用いた荷役作業に支障となる条件に関するヒアリング結果	3
2.4 荷役機械の地震後の走行等に必要となる荷さばき地の性能規定に関する設定事例	6
3. レベル2地震動後の荷さばき地に対する性能照査事例とその概要	7
3.1 概要	7
3.2 解析対象範囲および留意事項	7
3.3 地震応答解析結果に基づく荷さばき地の性能照査事例	9
4. おわりに	11
謝辞	11
参考文献	11

1. はじめに

コンテナターミナルの荷さばき地は、係留施設背後においてコンテナ船から荷揚げする貨物の一時的な蔵置エリアとして利用されているほか、各種クレーン等に代表される荷役機械や上屋が設置されている。「港湾の施設の技術上の基準・同解説」(以下、基準・同解説)によれば、「災害時に耐震強化施設と一体となって機能を発揮する必要がある荷さばき地」には、レベル2地震動に対して「要求性能に応じて、作用による損傷の程度が限界値以下であること」が定められており、「港湾の施設の技術上の基準の解釈等」において要求性能は「修復性」とされている。一方で、その性能照査項目として、施設の種類、構造及び構造形式に応じて照査項目が異なることを考慮して、(荷さばき地の)「損傷」と包括的に示されており、また、性能照査に当たっては、限界値を定める標準的な指標を適切に設定する旨定められている。このため、レベル2地震動後の荷さばき地に対する性能照査を実施するにあたっては、施設の種類や構造等に応じて限界値を定める標準的な指標を適切に設定する必要がある、設計者の判断に委ねられているのが実情である。

2011年の港湾法、および特定外貿埠頭の管理運営に関する法律の一部を改正する法律に伴う港湾法施行令の改正により、「長距離の国際海上コンテナ輸送にかかる国際海上貨物輸送網の拠点として機能するために必要な係留施設(水深16m以上の耐震強化施設)」に付帯する荷さばき地が、国直轄での施工対象となったことを背景として、レベル2地震動に対する荷さばき地の具体的な限界値の設定事例が増えつつある。例えば、後述するように、コンテナターミナルにおける移動式荷役機械等が、地震後においても荷さばき地において必要な機能、特に走行性能を発揮できるよう、メーカーヒアリング等を踏まえて設定された事例がある。

本資料は、同様な事例に対する今後の設計実務の参考となるよう、耐震強化施設の背後に存在する荷さばき地のレベル2地震動後の性能規定値の設定事例およびその性能照査手法の考え方の一例を、既往検討事例を収集、整理しとりまとめたものである。ただし、本資料では本稿執筆時点において一定程度情報収集できた、耐震強化施設(特定(幹線貨物輸送対応))の背後に存在する、コンテナターミナル内における荷さばき地(以下、単に荷さばき地という。)のレベル2地震動後の性能規定値やその性能照査手法に関する内容のみを整理対象とした。レベル1地震動に対する性能規定値や性能照査手法および地震後に発揮されるべきコンテナターミナル全体の機能に関しては検討の対象外とした。

以下、2.では本稿で検討対象とした移動式荷役機械等を整理し、荷さばき地における平常時の運用において支障が生じる条件について、事業主体が実施した荷役機械メーカーおよびユーザーヒアリング結果を整理した。また、ヒアリング結果を踏まえた、荷さばき地のレベル2地震動後の性能規定に関する設定事例を示す。3.では荷さばき地のレベル2地震動に対する2次元地震応答解析を用いた性能照査事例の概略を示し、4.は本稿のまとめである。

2. 移動式荷役機械等の地震後の走行性能等を考慮した荷さばき地の性能規定例

2.1 概要

本章では、レベル2地震動後に移動式荷役機械等の荷さばき地に必要となる性能規定の設定例について整理する。2.2では検討対象とした移動式荷役機械等を、2.3では移動式荷役機械等が、荷さばき地において平常時に荷役作業を実施するために必要となる条件に関する利用者等へのヒアリング結果を、2.4ではこれらを踏まえたレベル2地震動後の荷役機械等の荷さばき地における性能規定の設定事例を示す。

2.2 検討対象とした移動式荷役機械等

まず、検討対象とした移動式荷役機械等とそのコンテナターミナル内における役割について概説する。図-2.1は、トランスファークレーンとしてRTGを使用したコンテナターミナル内の荷役機械の配置の概略図を示したものである。

コンテナクレーンにより陸揚げされたコンテナは、図-2.1中のクレーン下のコンテナトレーラーに受け渡され、コンテナの蔵置エリアに運搬される。コンテナは同図中のRTGにより積卸し、蔵置エリアに段積みされた状態で一時的に保管される。また、蔵置エリアに保管されているコンテナは、RTGを用いてコンテナトレーラーへ受け渡され、荷主のもとへ運搬される。

トランスファークレーンはタイヤ式門型クレーン(Rubber tired gantry crane, 以下, RTG)とレール式門型クレーン(Rail mounted gantry crane, 以下, RMG)の2種類に大別されるが, 本稿で対象としたクレーンはRTGのみであり, また, 自動化されたRTGおよび遠隔操作RTGについては検討対象外としている. また, RTGを用いて荷役作業が行われているコンテナターミナルの荷さばき地のみを検討対象とした. 以下, RTGとコンテナトレーラーに関して概説する.

～トランスファークレーン方式(RTG)のコンテナターミナル(概略図)～

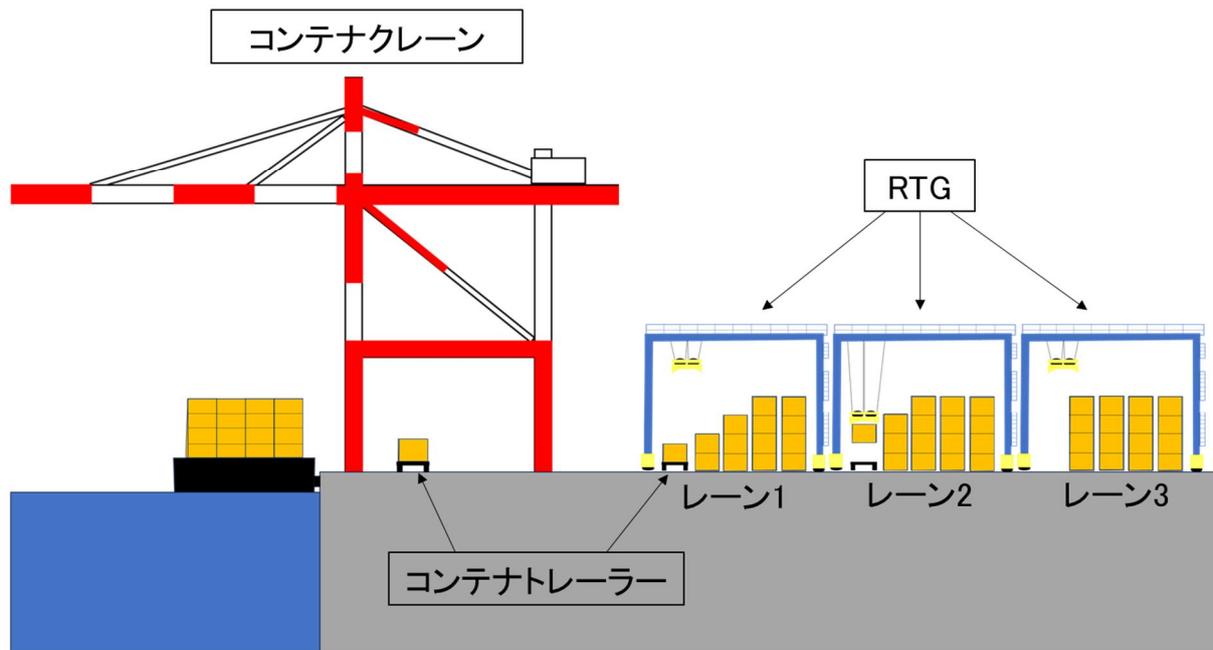


図-2.1 RTG方式のコンテナターミナル内荷役機械配置のイメージ図

(1) RTG

RTGは荷さばき地内で利用されるトランスファークレーンの一種であり, 上述の通りタイヤ式の門型クレーンである. コンテナトレーラーからのコンテナの荷下ろし, また, コンテナをコンテナトレーラーへ積み込む際にも用いられる. 車輪がタイヤとなっているため機動性に優れており, コンクリートの走行路版上を基本としつつも比較的自由な位置を走行することができる.

RTGによる荷役は, レーン (RTG, コンテナ蔵置エリアおよびコンテナトレーラーの通行路を合わせた区画, 図-2.2) 毎にその作業をする場合が多く, 荷役状況によってはレーンチェンジする場合もある. 各レーンにて作業する場合には, 走行路としてのコンクリート版 (以下, 走行路版) 上を走行する. 以下の走行性能に関する議論においては, RTGとコンテナトレーラーの走行路版およびそれ以外のエリアにおける走行性能の両者について検討を行っている.

荷役作業時のRTGの動作イメージを図-2.3に示す. 所定のコンテナ位置まで走行路版を走行し, つり具 (スプレッド) をコンテナ位置まで横行 (走行方向に対して直交方向) させ, スプレッドを巻き下げてコンテナをつかみとる. つかみとったコンテナを巻き上げ, シャーシ位置まで横行させ, 巻き下げてシャーシに載せる.

なお, 前述のとおり自動化, または遠隔操作化されたRTGの走行性能については, 本稿のとりまとめの対象外としている.

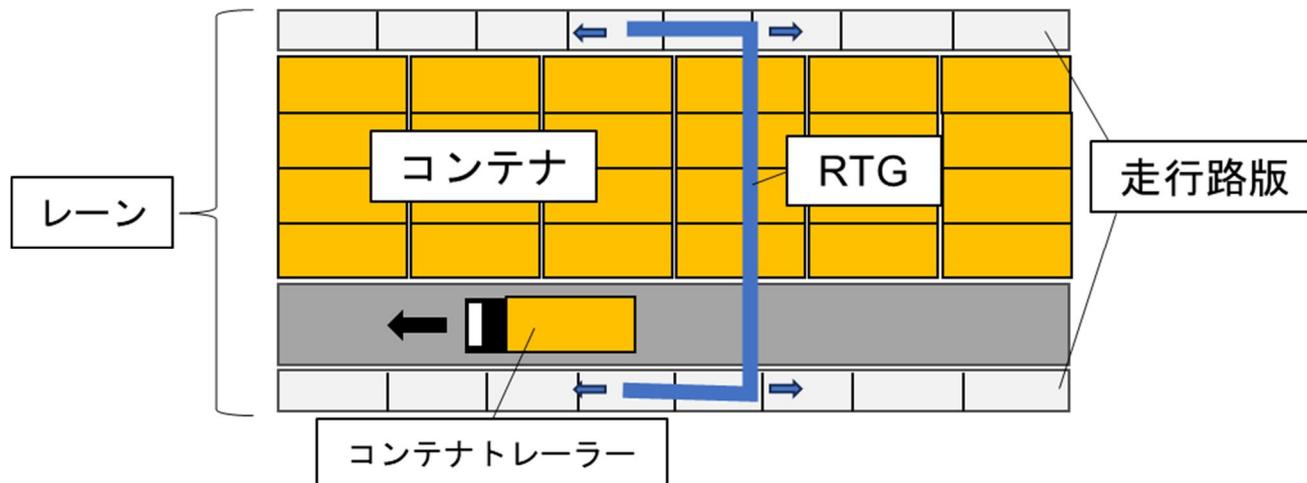


図-2.2 RTGのレーン内における配置イメージ図

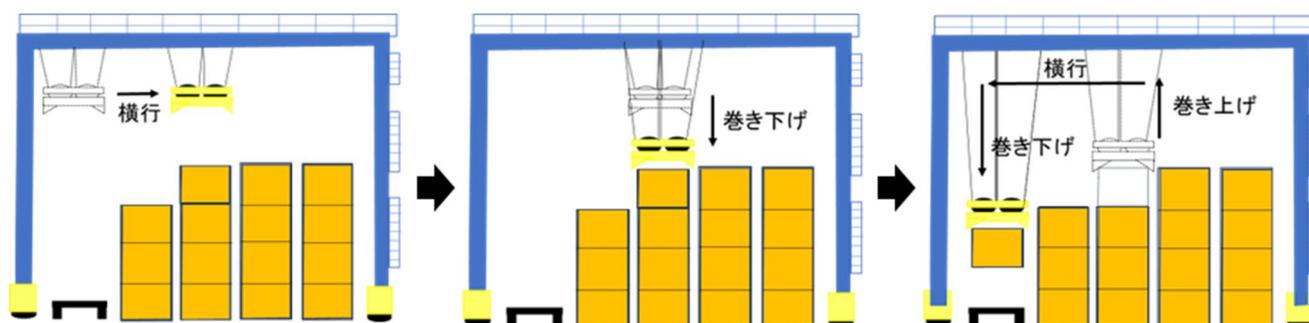


図-2.3 RTGの動作イメージ図

(2) コンテナトレーラー

コンテナトレーラーは、トラクターおよびシャーシが一体となったコンテナ運搬用の荷役機械である。呼称は様々あるため、本稿ではコンテナトレーラーと統一する。シャーシにコンテナを固定し、エンジンが搭載されたトラクターによりシャーシを牽引する。コンテナトレーラーは、コンテナクレーンで陸揚げされたコンテナを蔵置エリアに運搬する。コンテナ蔵置エリア内では、コンテナとRTGの脚の間のコンテナトレーラー通行路を走行する(図-2.2)。

2.3 移動式荷役機械等を用いた荷役作業に支障となる条件に関するヒアリング結果

本節では、レベル2地震動後の荷さばき地における性能規定値の設定にあたり参考とされた、移動式荷役機械等のメーカー、およびターミナルユーザーに対して事業主体が実施したヒアリング結果を著者らが再整理したものを以下の表-2.1に示す。

ヒアリングは、移動式荷役機械等のメーカーおよびその利用者であるターミナルユーザーを対象として実施された。ターミナルユーザーは、港湾運営会社、港湾運送事業者等である。

なお、ヒアリングは、荷役機械等の平常時の走行性や荷役作業に支障となる一般的な条件を聞き取る形で実施された。この際、地震後に想定される荷さばき地内の路面状態や地盤変状について、ヒアリング対象者と必ずしも共通認識が形成されていない。このため、地震動後に荷役機械等の走行に必要な条件を直接ヒアリングした結果というよりも、どちらかというとき平常時に荷役作業や作業効率の確保が難しくなる条件に近いものとして整理されたものであることに留意が必要である。

表-2.1 移動式荷役機械等の製造業者，およびターミナルユーザーのヒアリング結果一覧

	機械等メーカー	ターミナルユーザー
RTG	走行路版の走行方向の勾配について（参考：図-2.4）	
	<ul style="list-style-type: none"> コンテナをつかんでいない状態かつ無風時の走行については，走行路版の3%の傾斜までは走行可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 走行路版の傾斜3%程度であれば，走行可能。 強風時には，走行路版の1%以上の勾配を上ることができない場合がある。
	走行路版の走行方向に生じる段差（参考：図-2.5）	
	<ul style="list-style-type: none"> 走行路版に生じる段差が5cm程度以下であれば，安全に走行可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 荷役作業時に許容できる段差は2～3cmまで。 荷役するコンテナが段差付近にあり，5cm程度の段差があると走行は可能でも，荷役作業はできない。
RTG	同一レーンにおける走行路版間の高低差（参考：図-2.6） （対象施設内で使用しているRTGの両脚間の距離（事例としては23m程度）に合わせて，走行路版間の高低差を勾配換算している。2%の場合は50cm程度，3%の場合は70cm程度。）	
	<ul style="list-style-type: none"> 走行路版の高低差は，レーン間の勾配換算で3%(=70cm程度)程度までであれば走行可能。 高低差がレーン間の勾配換算で2%(50cm程度)生じた場合，コンテナをつかんだ状態で横行動作をすると，横行モータの容量不足により，横行動作に不具合が出る可能性がある。 高低差がレーン間の勾配換算で2%以上あると，段積みされた最上段のコンテナとRTGの脚の隙間がなくなり干渉する可能性がある。（参考：図-2.7） 	<ul style="list-style-type: none"> 荷役作業時に4段積みの隙間にコンテナをはめ込む場合，コンテナは垂直に降ろすので，走行路版の高低差が3%(70cm程度)となると，コンテナを4段積みできない。（参考：図-2.8） 通常の荷役作業(4段積み)では，2%(50cm程度)の高低差が妥当。
コンテナトレーラー	<ul style="list-style-type: none"> 路面状況，タイヤ状態等により異なるが，ターミナル内(ターミナル縦断，横断問わず)の傾斜が3%であれば走行可能。 	<ul style="list-style-type: none"> ターミナル内（ターミナル縦断，横断問わず）の傾斜が3%程度であれば，走行可能。 コンテナを積み込んだ後，ターミナル内（レーン外）を移動する際には，旋回することもあり，段差があると横転の危険性もあるため，極力段差はない方がよい RTGが走行可能な勾配および段差であれば，走行可能。

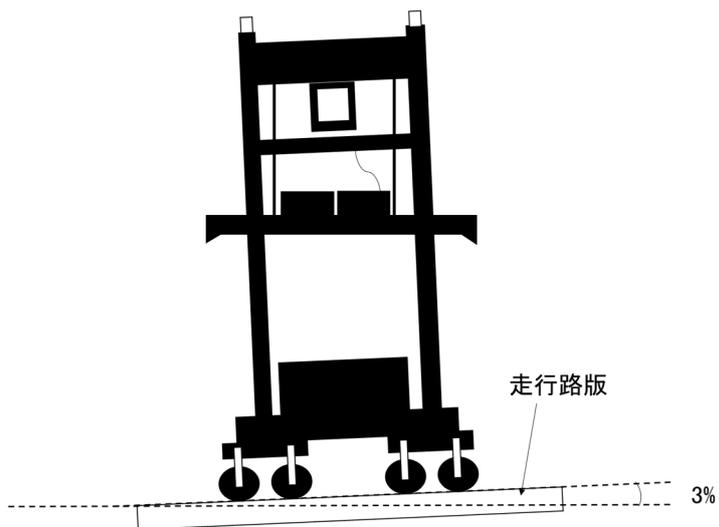


図-2.4 走行路版の走行方向の勾配に関するイメージ図

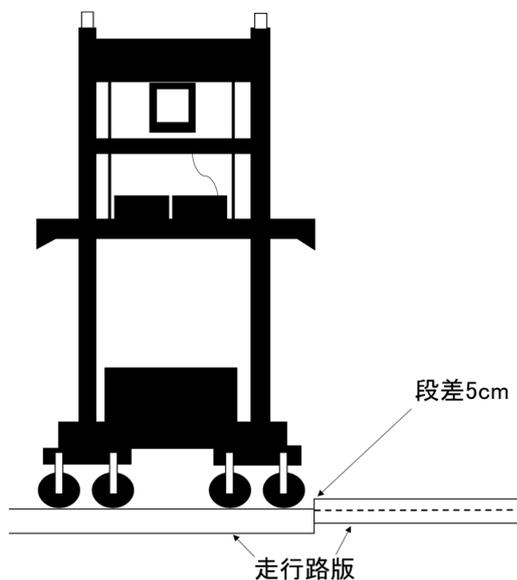


図-2.5 走行路版の走行方向に生じる段差に関するイメージ図

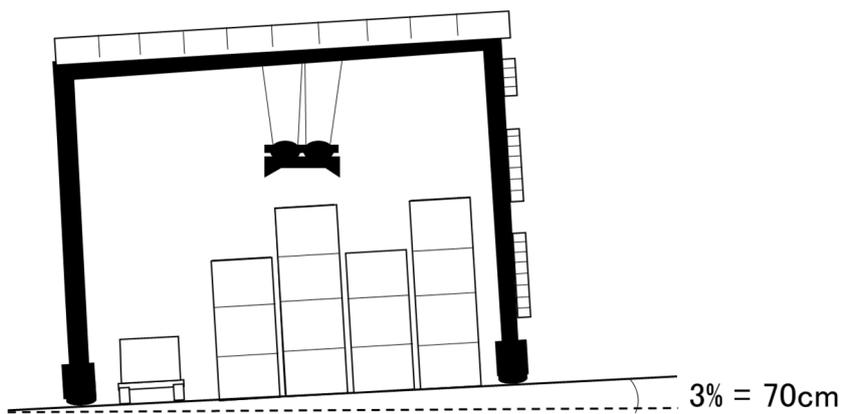


図-2.6 同一レーンにおける走行路版間の高低差に関するイメージ図①

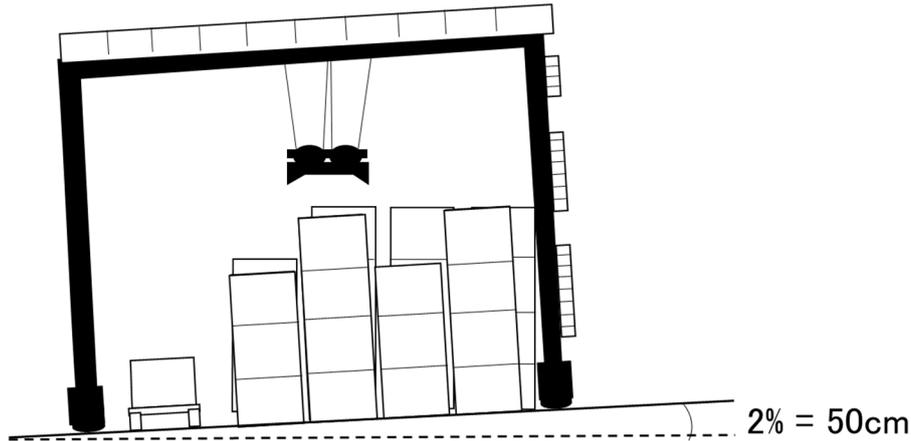


図-2.7 同一レーンにおける走行路版間の高低差に関するイメージ図②

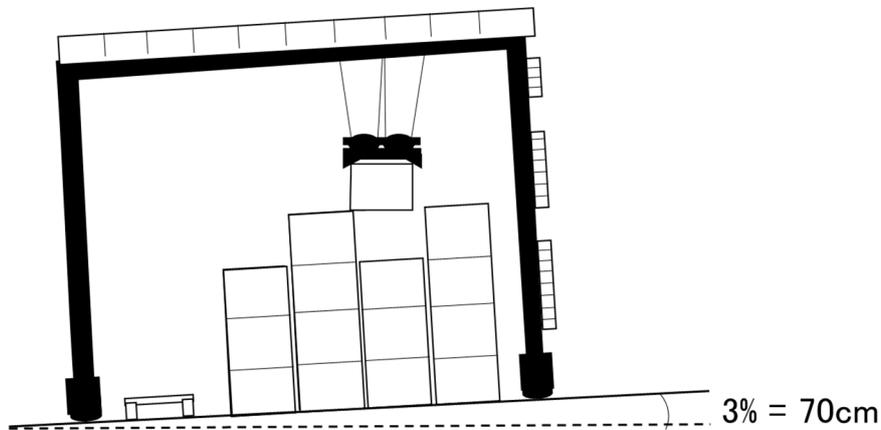


図-2.8 同一レーンにおける走行路版間の高低差に関するイメージ図③

2.4 荷役機械の地震後の走行等に必要となる荷さばき地の性能規定に関する設定事例

1. で述べたように、レベル2地震動後に必要となる荷さばき地の要求性能は修復性とされるが、その限界値に関する具体的な指標は示されていない。先述のヒアリング内容はその指標を設定する上で有用な情報であるが、あくまでも平常時の荷役作業において支障となる項目や内容を抽出したものであり、最大クラスの地震動であるレベル2地震動に対し、先述した全ての項目を満足（通常時の荷役に影響が出ないように設定される荷さばき地の性能と、地震後に必要とされる性能は必ずしも合致しない。）するように性能規定値を設定することは、現実的には難しいと考えられる。

一方、RTGに代表される荷役機械は、コンテナターミナル内の荷さばき地において比較的大規模なものであり、仮に地震後に当該機械の走行性が完全に損なわれた場合、ターミナル内で何らかの被害が発生した際、その修復作業の妨げになることが想定される。このため、荷さばき地のレベル2地震動後の性能規定に関する検討事例においては、RTGのターミナル内での走行性能をレベル2地震後においても最低限確保することを担保しようとするケースが見られた。その際の具体的な性能規定としては、1) RTGがレベル2地震動後も走行路版上を走行可能かどうか、2) RTGがターミナル内を走行する際の勾配（ターミナル縦断、横断問わず）に着目した事例があり、その勾配をヒアリング結果に基づき3%として設定された事例もある。

また、「港湾の施設の維持管理技術マニュアル」²⁾によれば、荷役作業時の安全性と荷役機械の走行性の観点から、エプロン上の沈下に関しての“変状許容限界”として3cm～10cmという数値が掲載されている。当該数値および段差に関するヒアリング結果を踏まえて、レベル2地震動発生後の荷さばき地における絶対沈下量を性能規定値として設定した事例もある。

3. レベル2地震動後の荷さばき地に対する性能照査事例とその概要

3.1 概要

本章では、今後の設計実務の参考となるよう、2次元地震応答解析結果を用いたレベル2地震動後の荷さばき地に対する性能照査事例を示す。なお、照査における解析対象範囲や解析結果の扱い方を中心に整理しており、解析条件や解析結果の詳細については本稿では示していない。以下、3.2では解析対象範囲および解析における留意事項について、3.3では地震応答解析結果に基づく性能照査事例について整理した結果を示す。

3.2 解析対象範囲および留意事項

(1) 解析対象範囲

荷さばき地のレベル2地震動後の性能照査においては、2.で触れたように性能規定値として、地震後の地表面の勾配や沈下量を考慮する必要があるため、地盤の沈下や変形を考慮することが望ましい。

以下に、係留施設（特に耐震強化施設）の耐震性能照査での活用実績が多い、2次元地震応答解析プログラムの一つであるFLIP³⁾を荷さばき地の性能照査へ適用した事例を示す。性能規定値として地震後に荷さばき地の地表面に生じる絶対沈下量を10cmとして設定する考え方もあるが、ここでは地震後に発生する地表面勾配を3%以下として設定した事例について記載する。

図3.1 - 図3.3は、性能照査に用いた解析対象範囲および解析メッシュの一例である。RTGのターミナル内における走行性能の照査においては、走行路版上のRTGの走行性能のみならず、ターミナル内をRTGが走行路版以外（例えば法線直角方向）に走行することも念頭に置いて実施する必要がある。

このため、解析メッシュは、ターミナル横断方向（岸壁法線に概ね平行する方向）及び係留施設の一般的な耐震性能照査と同じくターミナル縦断方向（法線鉛直方向）の断面について作成されている。この際、解析断面に対する2次元解析による検討となることから、面的な検討対象区域内に適切に解析断面を設定する必要がある。収集した検討事例においては、図-3.1中に示すように検討対象区域に対してターミナル縦断方向については、岸壁の変形に伴う荷さばき地の変形への影響の大きさを考慮し、岸壁と荷さばき地が最も近接する線上で、ターミナル横断方向については、液状化対象層が厚く堆積している線上で検討が実施されており、これらをそれぞれ代表断面として取り扱っている。

また、荷さばき地における地震後のRTG等の走行性能に着目する場合、解析メッシュの節点の位置および間隔の設定に際して、RTGの設置予定位置やコンテナ幅についても考慮する必要がある。検討事例では、RTGの走行路版位置付近に節点があるように設定されているほか、蔵置コンテナに生じる勾配を検討するため、蔵置エリアにおける節点間の水平距離は、コンテナ幅に合わせて概ね2m程度となっている。コンテナ蔵置エリア内においてコンテナ重量は、地表面への上載荷重（単位面積当たりの荷重）として設定されているものの、RTG本体はコンテナターミナル内を自由に走行する移動荷重として設定されているため、その重量は解析上考慮されていない。またコンテナの蔵置状況（実入りコンテナ、空コンテナ、コンテナ無し）によって上載荷重が異なることから、実態に応じた上載荷重が解析モデルに反映され、上載荷重の違いによる地盤の沈下や変形に与える影響も確認されている。

なお、図-3.2中には示されていないものの、岸壁上にコンテナクレーンが存在する場合はそのモデル化も行った上で、地震応答解析が実施されており、係留施設および荷さばき地を一体とした2次元地震応答解析が実施されている。

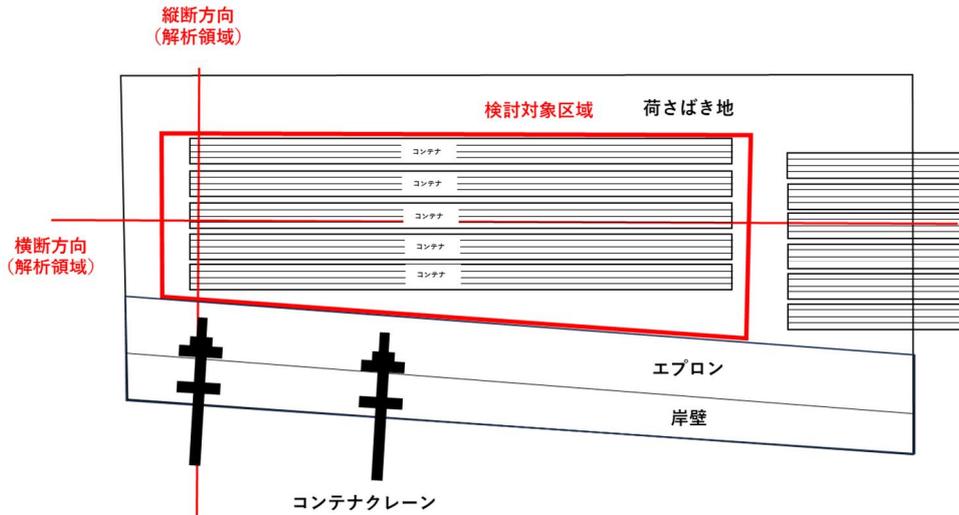


図-3.1 検討対象区域への解析断面設定の平面的なイメージ

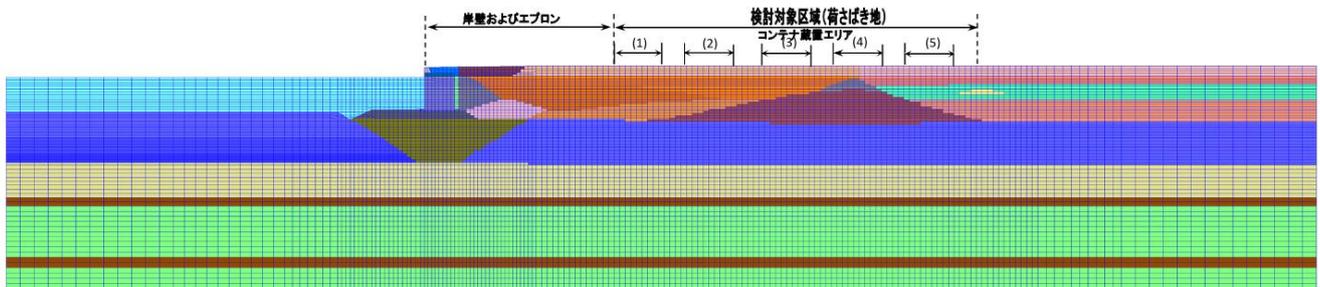


図-3.2 解析メッシュ例 (岸壁法線直角方向, ターミナル縦断方向)

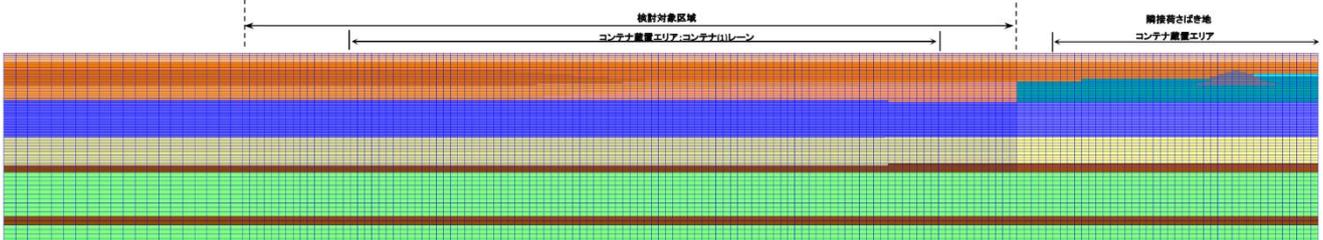


図-3.3 解析メッシュ例 (岸壁法線平行方向, ターミナル横断方向)

(2) 液状化に起因する地表面沈下量の解析における留意事項

レベル2地震動に対する地盤の液状化の発生は、設定された性能規定を満たす範囲内で許容される。FLIPを用いた解析では、解析メッシュ内の地盤パラメータまたは液状化パラメータを適切に設定することで、液状化を考慮した地震応答解析を実行することができる。しかし、設計実務において地盤の解析モデルに一般的に適用されるマルチスプリング要素を適用した解析の場合、液状化によって発生した過剰間隙水圧の消散に伴う沈下量は計算することができない。

特に本稿で取り扱っている事例のように、地震後の地表面の変形に着目する場合、過剰間隙水圧消散に伴う沈下量の影響は必ずしも無視することができない。より高度な方法としてはFLIP内において排水を考慮できるモデル(カクテルグラスモデル等)を用いることや、圧密沈下の問題に置き換えて解く手法もあるが、簡易的な方法として、FLIPの計算結果において過剰間隙水圧比が一定値を超過した液状化層に、文献⁴⁾によって求められる体積圧縮率によって、排水に伴う地表面沈下量を算出する方法もある。ただし、当該手法では鉛直方向の沈下量は算定できるものの、地盤の2次元の挙動(特に排水に伴う水平方向の変位)は考慮できないことに留意する必要がある。

3.3 地震応答解析結果に基づく荷さばき地の性能照査事例

次に、荷さばき地に2.4に示した観点を基にレベル2地震動に対する性能を規定した場合の既往の性能照査事例について整理した。結果は以下の①～③に大別される。①RTGが走行路版上を走行することが可能な程度の勾配等以下となっているか（走行路版上の勾配、および同一レーンの走行路版間の高低差（または勾配））、②RTGがターミナル内の縦断方向を、またはコンテナトレーラーがターミナル内を走行する上で支障がない勾配以下となっているか（ターミナル内の縦断および横断勾配）、③ターミナルエリア全体として、規定された絶対沈下量となっているかなどが照査されている。既往の検討事例における①、②の勾配は、3%として設定されている例が多い。

既往事例のうち、①、②については、過剰間隙水圧消散に伴う沈下量を考慮したうえで、全ての節点間の勾配が3%以下となっていることを確認することで性能照査している。勾配の算定方法をターミナル縦断方向について図-3.4に横断方向について図-3.5に模式的に示す。図中の「地震後地盤高」は過剰間隙水圧消散に伴う沈下量を考量した地盤高である。

実際には、図-3.6に示すように、ターミナル縦断および横断方向のそれぞれの隣接メッシュ間隔（地震応答解析後の間隔）及び節点沈下量から隣接する節点間の勾配を算定し、すべての勾配が3%以下となっていることで照査されている。本事例は、荷さばき地内の性能規定値を満足するための対策（液状化対策工）を考慮した上でのものである。なお、地表面の沈下量から得られる勾配には正負があるが、順勾配でも逆勾配でも、節点間の勾配（の絶対値）が規定値以下であれば、荷役機械の走行は可能であるという考え方が適用されている。ただし、節点間は直線として仮定されている。

また、①のうちRTGの同一レーンの走行路版間の勾配については、図-3.7に示す考え方が用いられている。図-3.4と比して同図では、RTGの走行路盤間の節点間距離と沈下量の差を用いて勾配の検討がなされている。

なお、地震後の荷さばき地の性能規定値として、③を照査した事例では、図-3.8に示すように、ターミナル内の各節点の絶対沈下量に着目した照査が行われている。その際の沈下量は、解析前後の各節点の沈下量の差分（過剰間隙水圧消散に伴う沈下量も考慮）として検討されている。

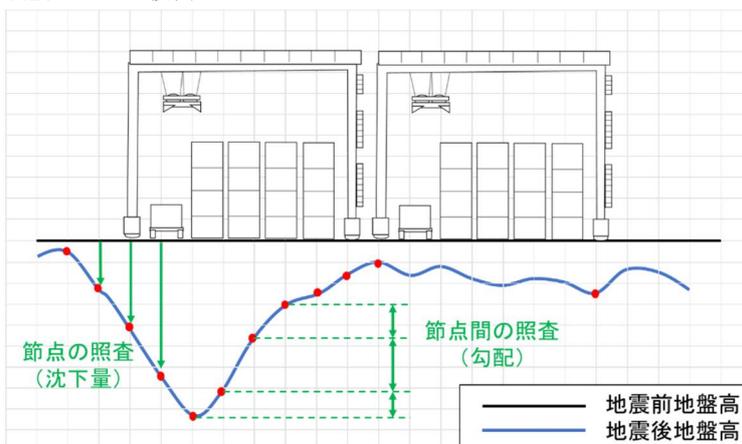


図-3.4 ターミナル縦断方向の勾配・沈下量

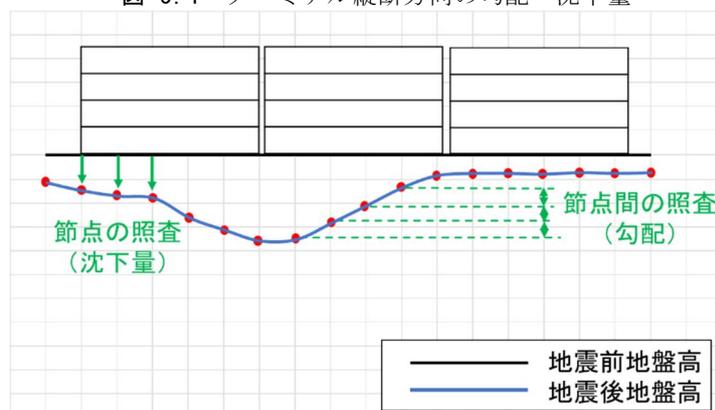


図-3.5 ターミナル横断方向の勾配・沈下量

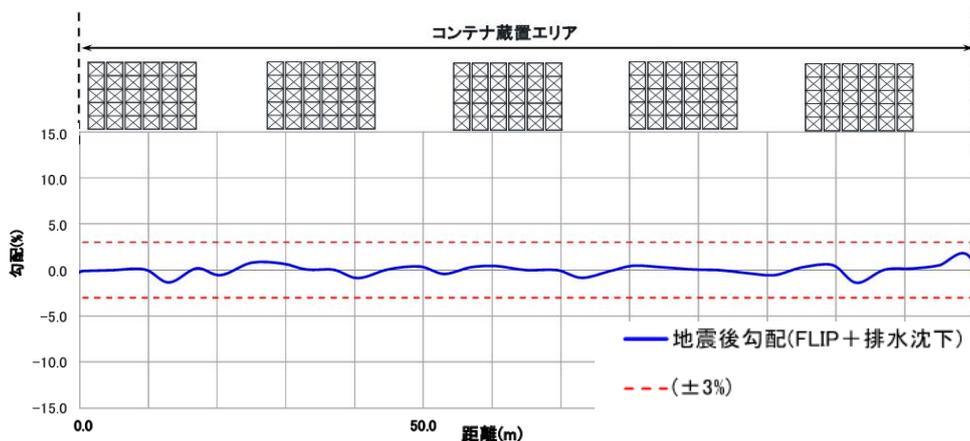


図-3.6 ターミナル内の検討対象区域における勾配
(縦軸勾配 (%) は解析メッシュの隣接節点間の勾配)

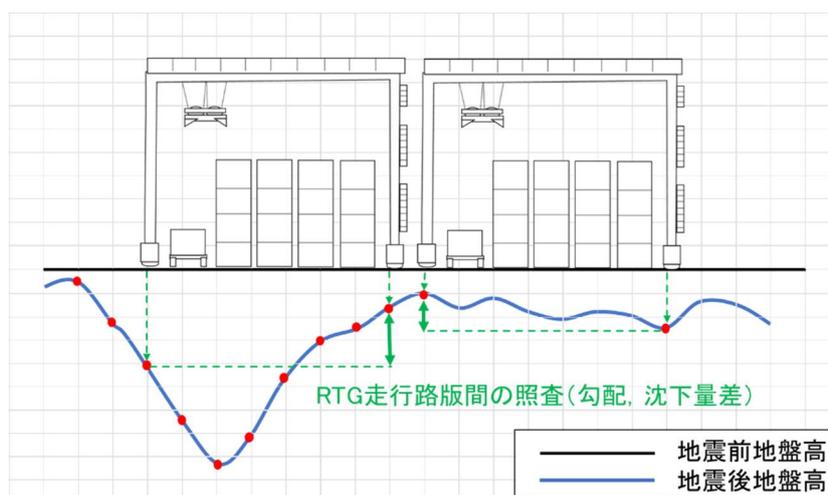


図-3.7 RTGの走行路版間の勾配に関する照査の考え方

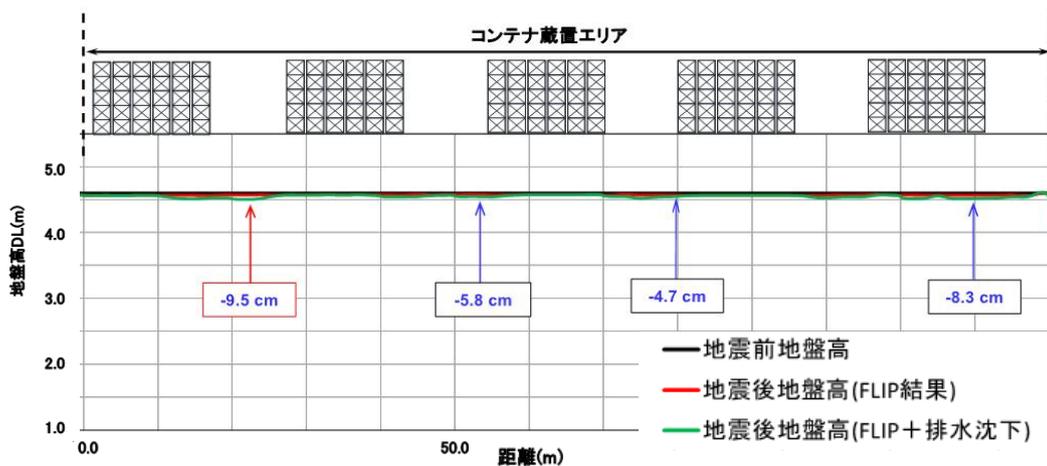


図-3.8 ターミナル内の検討対象区域に関する沈下量に関する照査事例

4. おわりに

本資料は、同様な事例に対する設計実務上の参考となるよう、レベル2地震動に対する荷さばき地の具体的な限界値の設定事例が増えつつある、耐震強化施設（特定（幹線貨物輸送対応））背後のコンテナターミナル内における荷さばき地を対象とし、荷さばき地のレベル2地震動後の性能規定値の設定事例およびその性能照査手法の考え方の一例を、既往検討事例を収集、整理しとりまとめた。

具体的には、移動式荷役機械等がコンテナターミナル内の平常時の運用において支障となる条件について、荷役機械メーカーおよびユーザーヒアリングに基づく整理を行った上で、レベル2地震動後の荷さばき地における性能規定値の検討事例を整理した。既往検討においては、コンテナターミナル内でのRTGの走行性能をレベル2地震後においても最低限確保することに着目し、荷さばき地の性能規定値が設定されている事例を確認した。

また、上記の性能規定値を確認するための手法として、2次元地震応答解析を適用し、RTGの走行路版上の勾配やターミナル内の縦断・横断方向の勾配や沈下量を照査した事例を整理した。

(2025年2月12日受付)

謝辞

本稿をとりまとめるにあたり、近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所および関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所より貴重なご意見をいただきました。ここに記して、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，公益社団法人 日本港湾協会，2018，pp.1400-1401.
- 2) 一般財団法人沿岸技術研究センター：港湾の施設の維持管理技術マニュアル（改訂版），2018，pp.103.
- 3) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, 1992, pp.1-15.
- 4) 石原研而・吉嶺充俊：地震時の液状化に伴う砂地盤の沈下量予測，第26回土質工学研究発表会平成3年度発表講演会集，1991，pp.768.