

船舶用コンテナの構造システムを用いた積層建物の動的応答評価

DYNAMIC RESPONSE ANALYSES OF MULTI-STORY BUILDINGS USING STRUCTURES AND STACKING SYSTEMS OF SHIPPING CONTAINERS

森 雄矢 ——— * 1 高木次郎 ——— * 2
遠藤俊貴 ——— * 3

Yuya MORI ——— * 1 Jiro TAKAGI ——— * 2
Toshiki ENDO ——— * 3

キーワード:

船舶用コンテナ, 有限要素法解析, 鋼板壁, ツイストロック, 動的解析

Keywords:

Shipping containers, FEM analyses, Thin steel walls, Twist locks, Dynamic analyses

The seismic response behavior of five-story building structures composed of shipping containers was evaluated analytically. During shipping, containers are connected to each other at their cast iron corners with unique connecting hardware. Various benefits can be obtained by applying this connecting and stacking system of shipping containers to building structures, such as rapid construction time and low cost. The nonlinear analytical models included the contact and friction behavior at the connections. Under multiple earthquake ground motions, the structural damage was found to be limited, suggesting that the use of shipping containers to create safe building structures is feasible.

1. 序

貨物の流通に用いられる船舶用コンテナは, ISO 規格¹⁾により国際的に仕様や強度が統一されている。生産体制が整備されていることから, 経済的な供給が可能である。運輸および仮置き時は積層され, 専用の接合金物により固縛される。このように移動と積層が容易な船舶用コンテナの建築構造躯体としての利用を考える。これにより, 迅速な建設や解体, 移動が可能な機動性に優れた経済的な建築構造システムの構築を目指す。コンテナを構造に用いた建築の事例²⁾は複数存在するが, 船舶用コンテナの積層システムをそのまま建物の構造に用いた場合の地震時の挙動を評価した事例は皆無である。本研究では, 5階建て集合住宅に船舶用コンテナの構造および積層システムを採用することを想定して, 地震時の挙動を解析的に評価する。これにより, 建物の耐震性能を把握すると共に, 同形式の建築構造システム構築に向けた基礎データを蓄積する。

1.1 船舶用コンテナの構成

船舶用コンテナは ISO¹⁾ や JIS³⁾ により仕様が規定され, 数種類の高さや長さの組み合わせがある。本研究では, 道路輸送上の制約が比較的少なく流通量の多い, 長さ 6,058mm (=20ft) のコンテナで建物を構成することを考える (図 1)。コンテナの幅 (短辺長さ) と高さはそれぞれ 2438mm と 2591mm である。コンテナを建物に利用することを前提に, その構成要素を建築構造部材として図 1-3 および表 1 のように整理する。コンテナには柱や梁に相当する部材が存在する。上側の梁は角型鋼管であり, 下側梁と柱はそれぞれ板厚 4.5mm および 6mm の変則的な開断面である。壁面は板厚 2mm の角波鋼板であり, 隅部にコンテナ同士を固縛固定するための鋳鋼隅角金物が存在する。隅角金物を除く主な構成材料は耐候性鋼や SS400 である。

1.2 船舶用コンテナの積層システム

コンテナ同士の固縛金物⁴⁾の一つに, ツイストロック (以下「TL」と略す) がある。TL は上下に接するコンテナの隅角金物同士を接合する金物である (図 1, 3)。隅角金物には, 内部に空洞があり, コンテナ外側の 3 面に楕円状の開口が設けられている。TL の上下部には, 鉛直軸まわりに回転する平面が楕円状の突起があり, 取手を回転させることで当該上下部が隅角金物内部で回転し, 隅角金物の楕円状の開口の縁に物理的に接触して, コンテナ同士の鉛直および水平方向の相対変位が拘束される。このような機構を有する TL を用いて積層を想定した建物の挙動を, 接合部のガタを考慮して評価する。

2. コンテナ架構の有限要素法解析

コンテナ単体の短辺方向の角波鋼板を有する架構について水平耐力を静的増分解析により評価する。

2.1 解析条件

角波鋼板による耐震壁に関する既往研究では, 周辺架構の剛性が高い場合には鋼板に純せん断応力場が生じる⁵⁻⁷⁾ことが示されており, 周辺架構を含まない鋼板のみの解析がなされている。一方, 図 2 のようなコンテナ架構では周辺架構の挙動評価も必要と考えられ, 鋼板と周辺架構の両方を含む解析モデルを作成した。各部材をシェル要素でモデル化し, 隅角金物は剛体と仮定し下部の隅角金物の中心をピン支持した (図 4)。柱梁と波形鋼板との隅肉溶接部は先行破壊しないものと仮定した。また, 図 2 の G11 梁には隅角金物付近でフォークリフト用の断面欠きこみと補強があるが, それらはモデル化していない。ただし, 鋼板を有する架構の水平剛性と耐力は主として鋼板に依存し, 一部の部材の欠損による影響は小さいと考えら

本稿の一部は, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), 耐震壁, pp863-864,

¹⁾ 構想設計 修士 (工学)
(〒140-0002 東京都品川区東品川 2 丁目 1 番 11 号)

²⁾ 首都大学東京都市環境科学研究科 准教授・Ph. D.

³⁾ 首都大学東京都市環境科学研究科 助教・博士 (工学)

2013.8 で発表したものである。

¹⁾ Azusa Sekkei Co., Ltd., M. Eng.

²⁾ Assoc. Prof., Div. of Architecture and Urban Studies, Tokyo Metropolitan Univ., Ph. D.

³⁾ Assistant Prof., Div. of Architecture and Urban Studies, Tokyo Metropolitan Univ., Dr. Eng.

れる。材料特性は、SS400 と同程度と仮定し、降伏応力度を 235 N/mm^2 、ヤング係数を $2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ とした。降伏後は、ひずみ 15% で最大応力度 400 N/mm^2 に至り、その後は耐力を保持するトリリニア型とした。ポアソン比は 0.3 とした。上部の隅角金物に鋼板面内方向の強制水平変位を与える静的増分解析を実施した。解析には汎用解析ソフト ABAQUS/ Standard を用い、材料および幾何非線形を考慮した。

2.2 解析結果

荷重・変形角関係を図 5 に示す。初期剛性は 90 kN/mm で荷重 313 kN で G11 梁の端部が部分的に降伏し若干剛性が低下した。その後、荷重 476 kN で、純せん断応力場であった角波鋼板のせん断応力度が、せん断降伏応力度の 135 N/mm^2 を超え、一様に塑性化し、剛性が大きく低下した。そして、層間変形角 0.48% で角波鋼板の全体座屈により最大荷重 574 kN をむかえた。柱梁架構の寄与を無視して、最大耐力を角波幅 1980 mm と板厚 2 mm の積で除した平均せん断応力度は 144 N/mm^2 であった。ここで、解析の妥当性は十分に検証できているとは言えないが、後述の建物の動的解析では、接合部挙動が建物挙動に与える影響が大きく、角波鋼板架構の剛性が建物挙動に与える影響は小さいことを確認している。

3. コンテナ積層建物の動的解析

コンテナの積層システムを用いた 5 層建物を例に、固縛金物 (TL) による接合部挙動を含めて地震時の応答を評価する。

3.1 解析モデル

解析対象建物は集合住宅とし、各階同一平面を仮定する。複数のコンテナで構成される建物平面は、コンテナ長辺でコンテナ同士が接する配置を想定した。すなわち、コンテナ短辺と長辺のそれぞれが、建物の桁行と張間方向の架構を構成する。本章では、コンテナ短辺で構成される建物桁行方向架構を解析検討対象とする。集合住宅の桁行方向架構は開口が多くなることから、角波鋼板のある開口なしコンテナ架構 1 つに対して、開口あり架構 2 つの割合で同様の架構が平面的に連続すると仮定する。図 6 のように、それに応じた解析モデルを作成した。角波鋼板つきのコンテナ架構が中央に連層壁のように配置され、その両脇に鋼板なしコンテナ架構が連結する構成である。中央の鋼板つきコンテナがすべての水平荷重を負担すると考える。それに基づいて地震応答解析用の質量を算出した。地震時のロッキング変形の押さえこみ効果を評価する目的で常時鉛直下方向に自重が作用するよう重力加速度を設定した。

次に角波鋼板つきコンテナによる連層壁のモデル化について述べる。角波鋼板壁は上下辺の梁を剛な線材とし、両者の水平相対変位に対して、前述の解析で求めたせん断剛性ばねを設けた。せん断剛性は解析より 90 kN/mm とし、後述の応答解析では発生せん断力が降伏せん断力以下であったことから弾性ばねとした。コンテナ自体の曲げ変形は考慮できていないことになるが、応答解析では接合部の変形が全体変形に及ぼす影響がコンテナそのものの変形よりも支配的であることが確認されており、問題ないと考える。ばねの減衰は、せん断ばね剛性比例型減衰で減衰乗数を 2.0% とした。

質量は、図 6 のようにコンテナ上部と下部に分けて算出した。コンテナ上面、下面および壁の重量は仕上を含めてそれぞれ 0.80 、 1.92 、 0.24 kN/m^2 とした。ここで、下部重量には住宅用途の地震用積載荷重 0.6 kN/m^2 を含む。上部および下部質量の算出値はそれぞれ

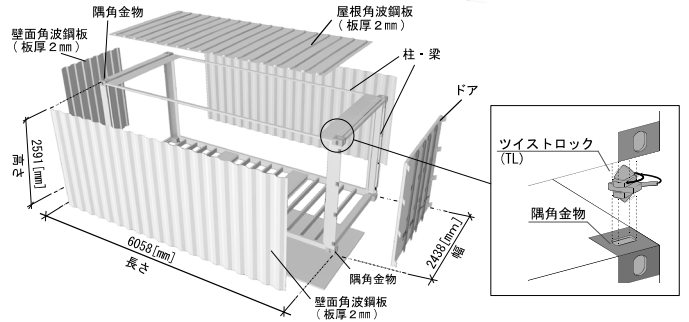


図 1 コンテナ構成部材

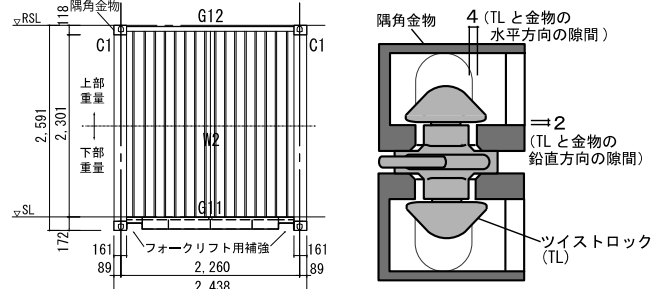


図 2 対象架構軸組図

図 3 ツイストロック (TL)

表 1 部材断面 (mm)

C1	G11	G12	W2

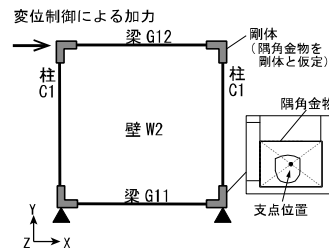


図 4 境界条件

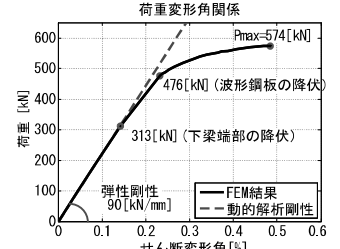


図 5 荷重変形角関係

2368 kg と 4753 kg である。これらの重量をコンテナ面積で除した単位面積当たりの重量は、 3.16 kN/m^2 である。

3.2 ツイストロック (TL) の復元力特性

隅角金物位置での上下に接続するコンテナの相対変位に対する反力を、TL の機構から非線形ばねでモデル化を行う。TL による上下のコンテナの相対変位には壁のロッキング変形に伴う鉛直上方向への浮き上がりや水平方向のずれがある。それぞれの方向における接合部の相対変位に対する反力を解析上は TL ばねの復元力特性として定義する。はじめに、鉛直方向の特性について述べる。図 3 の TL と隅角金物の断面図に示すように、TL 上下の回転部分と隅角金物の内部壁面の間には、それぞれ約 2 mm の隙間があり、金物の鉛直方向の相対離間距離が 4 mm に至ってから回転部と内側内壁の間の接触により金物の相対鉛直変位が拘束される。圧縮方向には、TL を介した隅角金物の接触により高い剛性と耐力を有すると考えられる。そこで、引張側は 4 mm の相対鉛直変位後に剛性が上昇するばねとし、既往研究⁸⁾での TL の引張試験の結果を参考に初期剛性 50 kN/mm 、荷

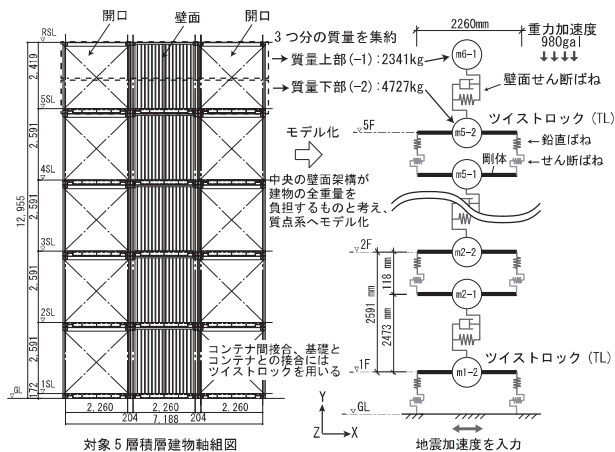


図6 動的解析モデル

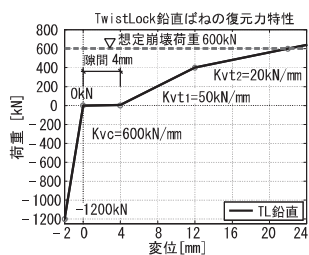


図7 TL鉛直ばね特性

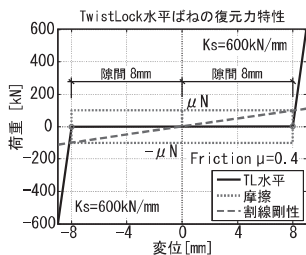


図8 TL水平ばね特性

表2 固有値解析

解析ケース	解析条件のばね特性			解析結果	
	壁面ばね (kN/mm)	TL鉛直 (kN/mm)	TL水平 (kN/mm)	モード周期 1次 (sec)	支配的なモード
S-1	90	*1)	割線剛性	0.92	ロッキング+スウェイ
S-2	90	600	割線剛性	0.63	スウェイ
C-1	90	*1)	600	0.75	ロッキング
C-2	90	600	600	0.33	ロッキング

*1) 片側 50kN/mm, 他方 600kN/mm

表3 各応答の最大値

入力地震波	建物全体変形角 (%)	引抜力 (kN)		層せん断力 (kN)	TL ずれ (mm)	残留変位 (mm)	
		引張	圧縮				
25kine	El Centro	0.57	120	-483	97	7.05	3.67
	Kobe	0.56	107	-516	89	3.91	3.94
	Taft	0.35	55	-423	74	0.84	0.99
50kine	El Centro	1.19	331	-809	171	8.34	1.54
	Kobe	1.65	455	-953	217	8.40	7.12
	Taft	0.87	203	-597	132	8.25	12.70

重 400kN で塑性化により剛性 20kN/mm となるよう入力した。圧縮側は、接触ばねとして剛性 600kN/mm で入力した (図 7)。ここでの圧縮剛性値は相対的に十分大きな値として設定したもので特に根拠がないが、同値を 10 倍にしても解析結果に与える影響はごく軽微であることを確認している。既往研究⁸⁾では、詳細な実験条件や挙動に関する記述はないが、引張方向の最大耐力は 600kN 程度と報告されている。本研究では、復元力特性に引張方向耐力の上限は設けていないが、後述の解析結果では、発生引張力が上記の最大耐力に達していないことを確認している。降伏後は初期剛性 (Kvt1) により除荷する復元力特性とし、減衰は離間方向の接触後剛性 (図 7 の Kvt1=50kN/mm) に対する剛性比例型とした。減衰乗数を 2.0% とし、後述の表 2 中の固有周期 0.75 秒を用いて算出した。

次に、水平方向の隅角金物の相対変位に対する TL ばねの復元力特性について述べる。水平方向の TL と隅角金物の内壁の間には、8mm の隙間がある。すなわち、中央に TL が設置された場合、その両側に 4mm ずつの隙間がある。上下の隅角金物部で TL との間それぞれ 4mm の隙間があると仮定すると、金物の相対水平変位 8mm で、TL と金物

内壁が接触することになる。接触後のばね剛性は、600kN/mm とした。この値についても、引張方向の接触後の剛性同様に明確な根拠はないが、十分大きい値であり、値そのものの解析結果への影響は小さい。破壊形式は、TL のせん断破壊あるいは隅角金物との接触部の支圧破壊などが考えられるが、いずれの耐力も本解析内では十分大きく、それらの挙動は考慮していない。除荷時経路は載荷時と同じである。また、TL と隅角金物の水平方向のずれに対しては摩擦力が発生すると考えられるが、摩擦係数に関する資料は確認できていない。ここでは、亜鉛めっき構造用鋼材プラスト処理と同程度と仮定して⁹⁾、摩擦係数 $\mu=0.4$ として、瞬間軸力に応じた摩擦力が作用すると仮定した。この設定に関連して、摩擦係数の変化が応答結果に与える影響については後述する。

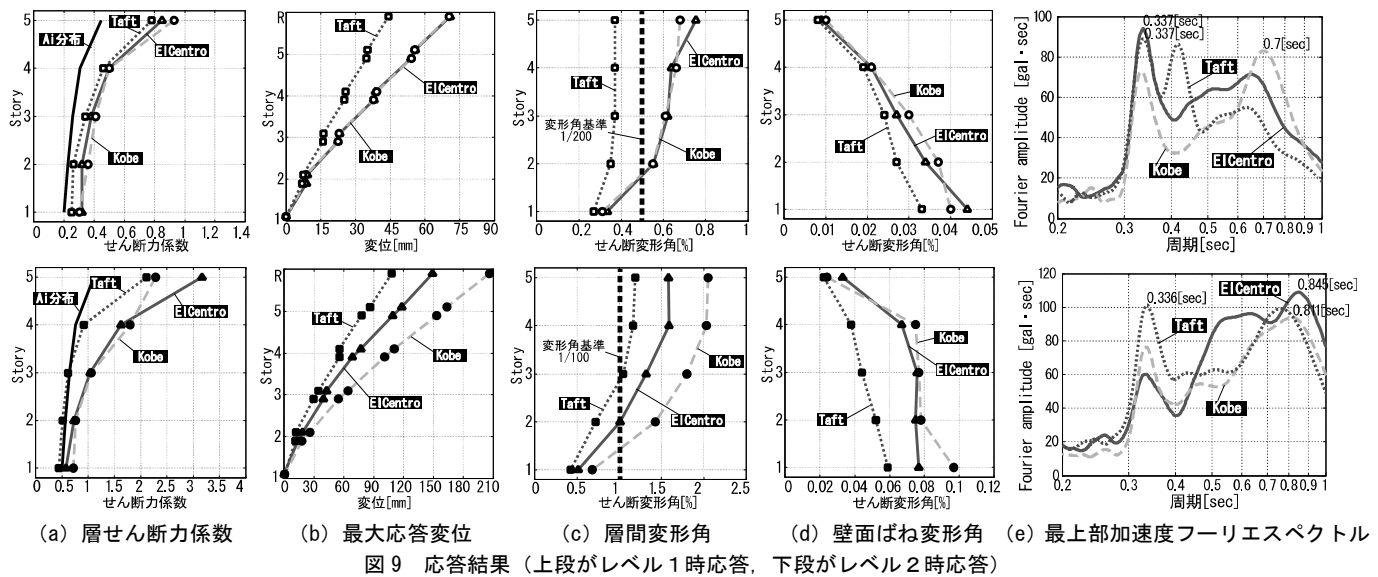
3.3 固有モードの推定

本解析モデルの主な地震時の変形成分は、隅角金物の相対鉛直変位に起因するロッキングと金物の相対水平変位によるスウェイであり、コンテナ架構そのものの変形の影響は相対的に小さい。そこで振動性状の把握のため固有値解析により固有周期とモードを算出した。TL ばね特性は鉛直と水平方向共に非線形であり剛性値の設定が困難であることから、それらを評価変数として複数解析した。鉛直方向については、圧縮時剛性 (図 7 の Kvc=600kN/mm) と離間方向に 4mm 以上の変位時の剛性 (図 7 の Kvt1=50kN/mm) に対して評価した。水平方向の剛性については、変位 8mm 以上時の剛性 600kN/mm と図 8 に示すように長期軸力と摩擦係数 0.4 から算出した摩擦力を隙間変位 8mm で除した割線剛性の 2 つとした。それらの組み合わせに対する固有値解析結果を表 2 に示す。ここで、鉛直方向ばねについては、すべてのばねについて図 7 の Kvc を適用した場合 (解析ケース S-2 および C-2) と連層で片側のみ Kvc で他方を Kvt1 とした場合 (解析ケース S-1 および C-1) について解析した。鉛直、水平方向共に TL ばね剛性が高い場合 (C-2) の周期は 0.33 秒であるのに対し、共に低い場合 (S-1) の周期は 0.92 秒であった。前述の鉛直方向変位に対する減衰乗数計算では、表中の C-1 の場合の固有周期を用いた。動的解析では各ばねが別々の挙動をすることが考えられることから、0.33~0.92 秒までの固有周期で変化をすることが予想される。

3.4 応答解析

El Centro NS, Kobe NS (JMA), Taft EW の 3 地震波を、最大速度 25kine (レベル 1) と 50kine (レベル 2) で基準化して入力波とした。ここで、地盤による増幅は考慮せず、地震波の入力時間を 60 秒、時間のステップ幅を 0.001 秒とした。

図 9、表 3 に解析結果を示す。いずれも上段と下段とでレベル 1 とレベル 2 入力波に対する応答である。各階の層せん断力係数はレベル 1 と 2 の両入力時で Ai 分布よりも上階で大きくなる傾向が確認できた (図 9a)。1 階の層せん断力係数の最大値はレベル 1 で 0.32 (El Centro)、レベル 2 で 0.72 (Kobe) となった。最大応答変位 (図 9b) は、レベル 1 で 70.9mm (El Centro)、レベル 2 で 206mm (Kobe) であり、層間変形角 (図 9c) は、上階ほど大きく、レベル 1 と 2 の最大値はそれぞれ 0.75% (El Centro, 5 階) と 2.05% (Kobe, 5 階) であった。ここで、層間変形角は各階上部質量位置での層間変形角とした。これらの最大変形角は、限界指標¹⁰⁾である 1/200 (レベル 1) と 1/100 (レベル 2) を上回るが、TL ばねの変形の影響が大きく、コンテナ架構の変形は小さい。TL ばねの水平変位について、レベ



レベル1ではEl Centroの5階, レベル2ではすべての波の3, 4, 5階でTLと隅角金物接触変位である8mmに達している。TLばね変位8mmは層間変形角0.31%に相当し, 図9cとdを比較しても, TLばねの鉛直方向変形によるロッキングが層間変形に占める割合が高いことが分かる。一方, 層せん断力と引張引抜力(表3)は, それぞれ最大217kN(せん断耐力の38%)と455kN(TLの引張耐力の76%)であるのに対して, TLばねに作用する鉛直方向の最大圧縮力は, 953kN(Kobe, 1階)であり, 柱断面積に降伏応力度(235N/mm²)を乗じた降伏軸力723kNを超えている。これに対しては, 柱に添板を設けるなどの補強が必要と考えられるが, 開断面として局部座屈に対する耐力や角波鋼板による座屈拘束効果なども含めて今後精査が必要である。地震エネルギーは, 主としてTL接合部で吸収されており, 同接合部の摩擦と粘性減衰の割合はレベル2のKobe地震波の場合で1:2である。最後に最上部質量位置での加速度フーリエスペクトル(図9e)は, レベル1で卓越周期が0.34秒に対して, レベル2では0.7~0.9秒となった。レベル1は固有値解析結果のC-2と周期が一致しており, レベル2はS-1とC-1に近い値を示した。TL鉛直ばねがロッキングによる浮き上がりにより剛性が低下し周期が変化したと考えられる。

3.5 摩擦係数の違いによる応答への影響

TL水平ばねの摩擦係数 μ を0.2から0.5まで変化させ, 応答への影響を確認した。入力波の最大速度レベルを漸増させた解析において, 接合部の水平ずれ発生時最大速度は, $\mu=0.2$ で3kine(Taft), $\mu=0.5$ で8kine(Taft)であった。また1階の層せん断力係数の最大値はいずれもKobe波で確認されており, レベル2では $\mu=0.2$ で0.58, $\mu=0.5$ で0.77であった。一方, Taft波レベル2では, $\mu=0.2$ と0.5のそれぞれで0.54と0.43であり, 摩擦係数に応じてずれ発生時最大速度が増加するという訳ではなく, 地震波特性に依存すると考えられる。エネルギー吸収は, 摩擦係数が小さいほど摩擦でのエネルギー吸収率が大きくなる傾向を示した。

4. 結論

本研究では, 船舶用コンテナの本体及び接合方法を5階建て建物に利用した場合の耐震性能を地震応答解析により評価した。El

Centro, Taft, Kobeの3波の最大速度入力を25kine(レベル1)と50kine(レベル2)に基準化した地震波に対して, コンテナ短辺の鋼板壁架構により連層壁を構成した場合の接合部を含めた挙動を分析した。1階の層せん断力係数はレベル1で0.32およびレベル2で0.72であった。層間変形角の最大値はレベル1で0.75%, レベル2で2.05%であったが, 建物の変形は接合部の変形に起因するロッキングが支配的で, コンテナ架構の変形は小さかった。1階のレベル2時最大層せん断力は217kNであり, 有限要素法解析による短辺壁面架構の最大せん断力の38%であった。引抜力も455kNと接合部引張耐力の76%であった。また, 接合部の水平方向のずれに関しては, 摩擦と隙間での接触を考慮しており, 摩擦係数 μ を0.2~0.5で変化させた解析を行った。ずれ変位発生時最大地震速度は, 3kine($\mu=0.2$)および8kine($\mu=0.5$)であった。

コンテナや同形式の建築構造システム構築には固有な接合部の挙動が与える全体応答へ与える影響が支配的であることから, 隙間および摩擦を含めた評価が重要であり, それらを考慮した上でのコンテナの建築構造躯体への利用可能性を示した。

参考文献

- 1) ISO 3874: Series 1 freight containers -- Handling and securing, 1997
- 2) Slawik, et al.: CONTAINER ATLAS a practical guide to container architecture, (Berlin:Gestalten, 2010)
- 3) JIS Z1626: 国際大形コンテナの取り扱い, 1987
- 4) 財団法人日本海事協会: コンテナの積付け及び固縛に関するガイドライン, 2009
- 5) 五十嵐規矩夫, 他: 矩形形状を有する波形鋼板のせん断弾性座屈耐力評価, 日本建築学会構造系論文集第73巻第632号, 1883-1890
- 6) 池田崇, ほか7名: 波形鋼板耐震壁の力学性状に関する研究 その3 解析モデル, 日本建築学会大会学術梗概集, C-1 構造III, pp. 1121-1122, 2007. 7
- 7) 帖佐和人, ほか3名: 波形鋼板を耐震壁として利用したRC門型架構の力学性状に関する研究, コンクリート工学次論文集, Vol. 29, No.3, 2007
- 8) V. A. de Souza: Study on the Dynamic Response of Container Stacks Using Non-Linear Finite Element Analysis, 東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻博士論文, 2011
- 9) 日本建築学会, 鋼構造接合部設計指針, 2012
- 10) 一般財団法人ベターリビング, 時刻歴応答解析建築物性能評価業務方法書, 2011

[2014年2月18日原稿受理 2014年4月1日採用決定]