

論文 津波避難ビルの漂流物衝突に対する構造性能評価に関する研究

大貫 かほり^{*1}・高橋 典之^{*2}

要旨：2011 年東日本大震災における甚大な津波被害を受け、国土交通省から津波避難施設の構造設計指針が示された。建築物の津波被害においては、津波流体力だけでなく漂流物衝突による被害も散見されており、設計指針においても衝突を想定した構造設計が要求されている。近年、建築物への漂流物衝突に関する基礎的研究が行われているが、いずれも外力評価・応答評価にとどまっており、衝突発生時およびその後の安全性、使用性の評価までは検討されていない。そこで本研究では、既存の津波避難ビルを対象とし、漂流物衝突が架構に与える影響と避難施設に求められる安全性および被災後の構造性能評価について検討を行った。

キーワード：耐津波性能、衝突、津波避難ビル、RC 造建築物、構造性能評価

1. はじめに

2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震は甚大な津波被害をもたらした。建築物被害においては、津波そのものの流体力だけでなく漂流物衝突力による損傷事例も見られた。これを受けて近年では港湾の津波避難施設の構造設計法において、漂流物衝突を想定する研究が行われ始めている。しかし、衝突に関する既往の研究の多くは衝突力やそれを受ける部材の応答評価にとどまっており、衝突が架構全体に及ぼす影響評価に関する研究は少ないのが現状である。漂流物衝突時の架構全体の応答に関する研究は 2012 年に本村らが示しているが¹⁾、漂流物による水のせき止めや衝突位置について、より実現象に近い条件での再現が必要である。また、実際の建物においては災害発生時および被災後の安全性の確保も検討されるべきである。

そこで本研究では既存の津波避難ビルを対象とし、時刻歴応答解析により漂流物衝突が架構に与える影響を評価する。さらに、避難施設に要求される災害発生時の安全性および使用性と、被災後の構造性能について考察する。

2. 検討対象建物のモデル

本研究では津波避難ビルに指定されている、宮城県

石巻市の I 庁舎をモデルとして検討を行う（写真-1、図-1）。本建物は 1 階部分に階高 6.1m のピロティを有し、上階は階高 4m の 4 階建て RC ラーメン構造物である。床面積は各階 21.4m×25.6m であり、単位床重量は 14kN/m² とする。1 階柱断面は 1000mm 角、2 階より上の柱断面は 800mm 角、大梁断面は 450mm×800mm、上部構造のコンクリート強度は $F_c=27$ である。ここで本検討では床を剛体と仮定して検討対象建物を 4 質点系モデルに置換し、外力として津波波力および漂流物衝突力を入力した。

各層の骨格曲線は一般的な RC 造建築物の構造特性および文献²⁾にない降伏変形角を 1/200rad. としたトリリニア型とし、ひび割れ強度 Q_c を降伏強度 Q_y の 1/3 倍、ひび割れ変位 δ_c を降伏変位 δ_y の 1/10 倍とした。各質点の履歴特性には Takeda モデルを用い、減衰は瞬間剛性比例型減衰で減衰定数を 0.02 とした。数値積分法は $\beta=1/6$ とした Newmark- β 法を用い、積分時間刻みは 0.001 秒とした。

なお、津波波力および漂流物衝突力に対する時刻歴応答解析に先立ち、津波の進行方向となる本建物 Y 方向について pushover 解析を行い、表-1 に示す各層の強度および剛性を算出した。



写真-1 I 庁舎 南東方向から

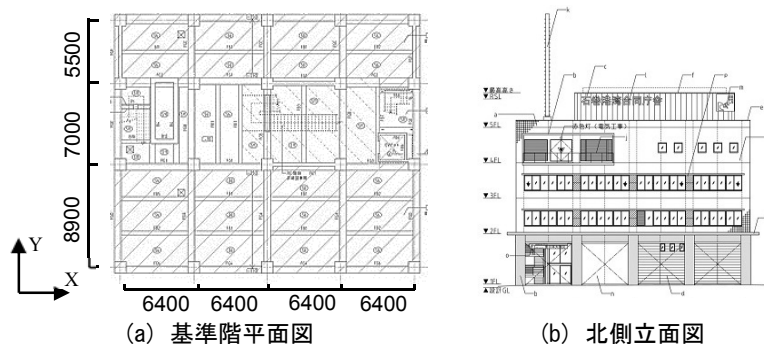


図-1 対象建物設計図

^{*1} 東北大学 工学部建築・社会環境工学科 (学生会員)

^{*2} 東北大学大学院 工学研究科 准教授 博(工) (正会員)

表-1 各層せん断力係数および降伏点割線剛性

層	各層せん断力係数 C_{ds}	各層降伏点割線剛性 $S_{cy}[\text{N/m}]$
4	0.862	3.31×10^8
3	0.778	5.97×10^8
2	0.697	8.02×10^8
1	0.632	6.36×10^8

3. 津波および漂流物による外力と応答評価

数値解析ソフト MATLAB³⁾を用いて多質点系非線形時刻歴応答解析を行う。前章で作成した建物モデルに、津波波力および漂流物衝突力を後述する式より算定し、外力として入力する。本検討においては外力入力時間を 90 秒間、衝突時刻 t_c を 45 秒、衝突時間 dt を 0.016 秒間⁴⁾とし、外力時間刻みは 0.002 秒とした。

3.1 津波波力および衝突力のモデル化

(1) 津波波力算定式

津波波力は文献²⁾に示される静水圧式(1)をもとに、浸水階の床高に上下階の階高の半分の津波波力が作用するものとする。ここで、建物の周辺状況に応じて設定される水深係数 a は 3 とする。また、水位が 1m 上昇するのに要する時間は、東日本大震災で観測された値をもとに 2.0 秒と仮定する⁵⁾。

$$Q_z = \gamma \rho g \int_{z_1}^{z_2} (ah - z) B dz \quad (1)$$

ここに、 Q_z ：構造設計用の進行方向津波波力[kN]、 γ ：開口による低減率、 ρ ：津波の単位体積質量[t/m³]（瓦礫等を考慮し 1.2 とする）、 g ：重力加速度[m/s²]、 a ：水深係数、 h ：浸水深[m]、 $z_1 \sim z_2$ ：当該部分の地表面からの高さ[m]（ $0 \leq z_1 \leq z_2 \leq ah$ ）、 B ：受圧面の幅[m]である。

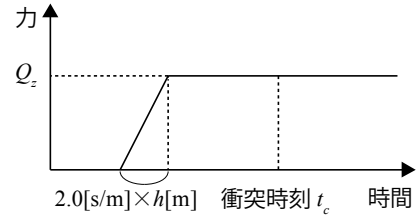
ここで、検討建物の 1 階部分がピロティであることから、後述する浸水深が 6.1m 以下のケースにおいては $\gamma=0.0$ とし、浸水深が 6.1m を上回るケースにおいては $\gamma=0.3$ とする。またピロティ部においては、漂流物が衝突後にせき止め力を生じさせることが想定される（図-2）。そこで衝突時刻以降は津波波力に代わり、式(2)に示す FEMA の算定式⁶⁾を用いたせき止め力を衝突階に作用させる。

$$F_d = \frac{1}{2} \rho C_d B_d (hu^2)_{\max} \quad (2)$$

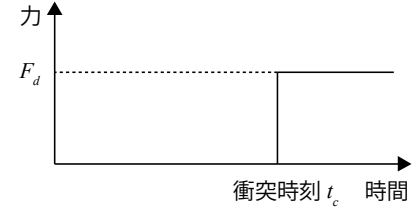
ここに、 F_d ：漂流物によるせき止め力[kN]、 C_d ：抗力係数（2.0 とする）、 B_d ：漂流物幅[m]、 u ：津波流速[m/s]、 (hu^2) ：流速運動量[m³/s²]である。なお、津波流速は沿岸技術研究センターらが示す式(3)を用いて算出する⁷⁾。

$$u = F_r \sqrt{gh} \quad (F_r = 0.9) \quad (3)$$

図-2 は、2 階床高以上にまで浸水する場合、ピロテ



(a) 式(1)を用いる場合



(b) 式(2)を用いる場合

図-2 津波波力の時刻歴波形

ィ部のみ浸水する場合それぞれについての、外力時刻歴波形の概略図である。

(2) 漂流物衝突力算定式

漂流物衝突力は式(4)に示す水谷らの評価式⁸⁾を用い、衝突時間 dt の区間で矩形波として与える（図-3）。衝突力は衝突位置と上下階床高との距離に応じて上下階床高に分配されるものとする。

$$F_m = 2\rho\eta B_d V^2 + \frac{WV}{gdt} \quad (4)$$

ここに、 F_m ：漂流物衝突力[kN]、 η ：最大遡上水位[m]（本研究では浸水深 h と同義とする）、 V ：漂流速度[m/s]（津波流速 u と同値とする）、 W ：漂流物重量[kN]、 dt ：衝突時間[s]である。

また、図-4 に示すように、ピロティ部への衝突時は漂流物がピロティ柱に衝突しせき止められるが、非ピロティ部への衝突時には、漂流物は津波とともに建物の側面に回り込み、漂流物が建物の角をかすめるような衝突になることが流体力学的に想定される。そこで本研究では簡単のため、非ピロティ部への衝突時には、漂流物が建物 Y 方向に対し 45° の角度で短辺方向（船首）から衝突した場合を仮想状態として限定し、衝突力を解析検討方向に対し $F_m/\sqrt{2}$ として検討を行う。

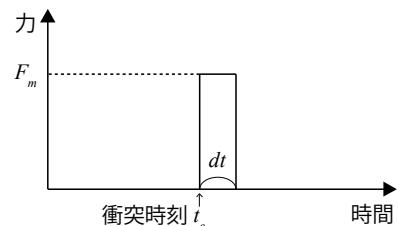
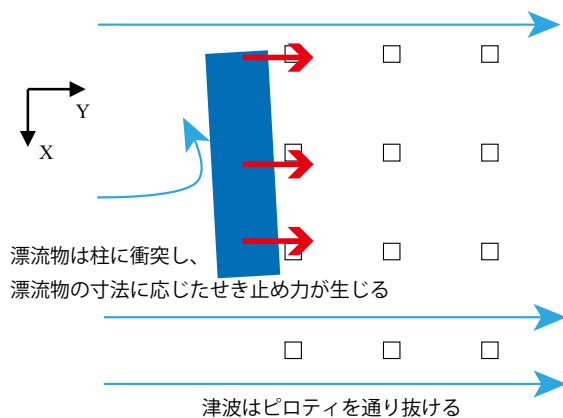
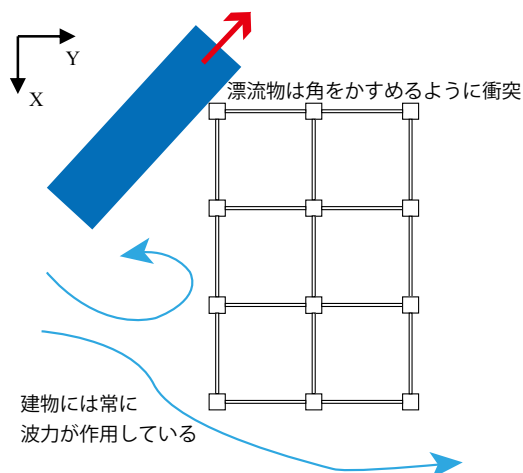


図-3 衝突力の時刻歴波形



(a) ピロティ部への衝突



(b) 非ピロティ部への衝突

図-4 浸水深により異なる衝突挙動

3.2 検討条件およびパラメータの設定

検討を行うにあたり、衝突高さ（浸水深）、漂流物規模をパラメータとして最大層間変形角および各層床応答加速度を比較した。

今回用いた算定式では、衝突力は漂流物の重量および寸法によるため、規模の異なる5つの漂流物を想定した（表-2）。ただし、170t船舶・400t船舶については喫水が3.05mを上回るため、浸水深3.05mでの漂流および衝突は検討していない。本論文で扱う解析ケースを表-3に示す。

表-2 漂流物質量および寸法

漂流物	質量[t]	幅[m]	高さ[m]	奥行[m]
20ft コンテナ	24	6	2.6	2.4
40ft コンテナ (HiCube)	30	12	2.9	2.4
船舶	75	27.5	2.9	6.5
	170	32	2.9	6.8
	400	48	3.8	8.6

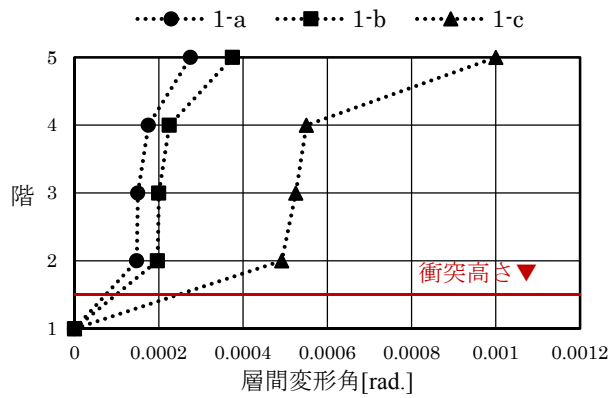
表-3 衝突高さと漂流物の組み合わせ

解析 ケース	衝突高さ [m]	漂流物
Case1-a	3.05 ($\gamma=0.0$)	20ft コンテナ
Case1-b		40ft コンテナ(HiCube)
Case1-c		船舶(75t)
Case2-a	6.1 ($\gamma=0.0$)	20ft コンテナ
Case2-b		40ft コンテナ(HiCube)
Case2-c		船舶(75t)
Case2-d		船舶(170t)
Case2-e		船舶(400t)
Case3-a	8.1 ($\gamma=0.3$)	20ft コンテナ
Case3-b		40ft コンテナ(HiCube)
Case3-c		船舶(75t)
Case3-d		船舶(170t)
Case3-e		船舶(400t)
Case4-a	10.1 ($\gamma=0.3$)	20ft コンテナ
Case4-b		40ft コンテナ(HiCube)
Case4-c		船舶(75t)
Case4-d		船舶(170t)

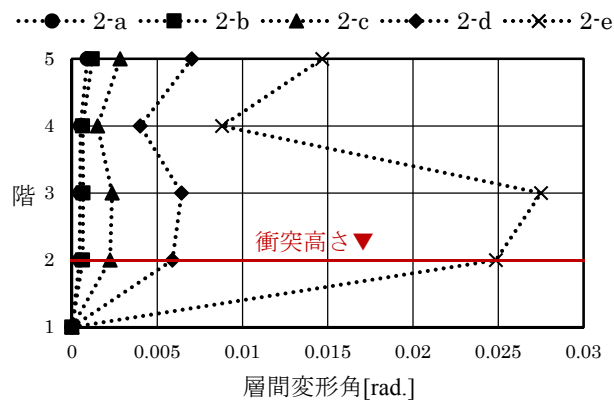
3.3 解析結果

図-5 は衝突高さごとに各層の最大層間変形角を示したものである。衝突高さの低いケース（衝突高さ3.05mのケース）においては上階の変形が大きくなる傾向が見られる。これは、衝突発生までは建物に津波波力が作用していないものの、衝突の衝撃により生じる慣性力が上階に作用するためと考えられる。図-6(a)はCase2-dの衝突前後の時刻歴応答層間変位である。ここからも、衝突を受けた2階床のみ正方向に変位が生じ、上階は下から順に負の変位を生じていることが見て取れる。また衝突後は2階床を除き、残留変位が0.01m以下に収まっている。

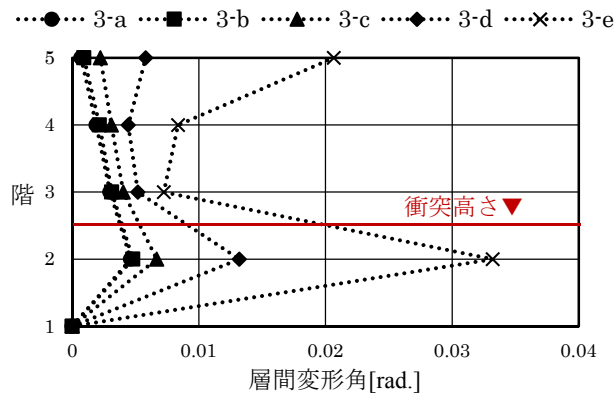
一方、衝突高さの高いケース（衝突高さ8.1mおよび10.1mのケース）においては1層部分が大きく変形した。特に、高さ10.1mへの衝突時は全ケースで1層の変形角が1/50radを超えている。これは、建物に津波波力が作用した状態で、1層のベースシア係数が相対的に低いところに衝突力に伴う付加せん断力が生じたため、変形が安全限界を越えたものと考えられる。図-6(b)はCase3-eの衝突前後の時刻歴応答層間変位であるが、1層は津波波力の作用により衝突前から変位が生じている。衝突後は全層が塑性化し、1層と4層は大きく変形したまま残留変位が大きく残っていることがわかる。



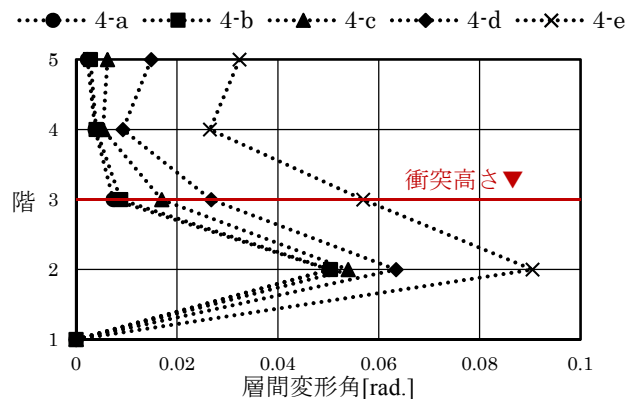
(a) 衝突高さ 3.05m



(b) 衝突高さ 6.1m

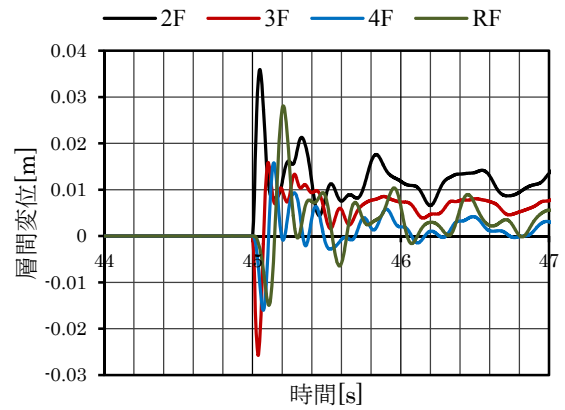


(c) 衝突高さ 8.1m

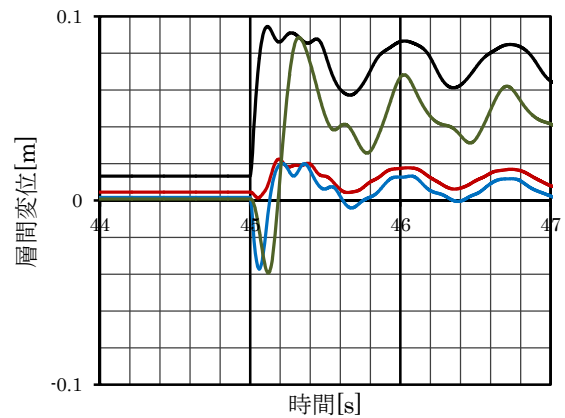


(d) 衝突高さ 10.1m

図－5 漂流物規模による最大層間変形角の比較



(a) Case2-d



(b) Case3-e

図－6 衝突前後の時刻歴応答層間変位

4. 衝突発生時の安全性に関する考察

任意の解析ケースにおける各層の最大応答加速度を表－4 に示す。これらはいずれも衝突直後に記録された値である。いずれのケースにおいても衝突階あるいはその上下階で大きい加速度が見られる。ピロティ上端すなわち2階床高に400t船舶が衝突するCase2-eでは、2階床の応答加速度が 235.2m/s^2 と、非常に強い衝撃が生じている。

検討対象建物は津波避難ビルに指定されており、屋上階に避難場所を設けていることから、津波襲来時には建物使用者および近隣の避難者がここに集まることが想定されている。しかし屋上階床高でも応答加速度は $1.6\sim 12.3\text{m/s}^2$ と、大地震レベルの衝撃が瞬間的にかかっている。避難施設には、避難者の安全を確保すべく、非常時に活用が想定される非構造部材および什器が備え付けられており、これらの建付けには十分配慮すべきである。また、中間階には自家発電装置等の非常用設備が備えられているが、これらの耐津波・耐衝撃性能に大きく影響することから、特に津波避難ビルにおいては衝撃に対する配慮を必要とすることが示唆される。

表－4 各階床高の最大応答加速度[m/s²]

階	1-a	1-c		2-a	2-c	2-e
2	5.0	16.2		14.7	48.8	235.2
3	2.8	8.9		8.1	14.8	22.4
4	2.2	7.0		6.3	9.9	15.1
R	1.6	3.4		3.3	5.7	9.0
階	3-a	3-c	3-e	4-a	4-c	4-e
2	6.0	19.7	96.6	1.9	3.1	9.1
3	5.9	19.7	96.4	13.4	44.6	216.7
4	2.1	6.8	17.4	3.4	11.8	28.7
R	1.9	5.0	10.5	3.2	8.1	12.3

5. 被災後の構造性能

図－5 で示したように、400t 船舶級の規模の漂流物が衝突した場合、または 10.1m の高さに衝突した場合には、一部あるいは全部の層の層間変形角が安全限界 1/50rad を超え、建物の継続使用が困難になる。一方その他のケースにおいては、いくつかの層が降伏変位に至るもの、または全層が弾性範囲内に収まるものがある。さらに、衝突高さが階間にある場合は、局所部材レベルでの柱の損傷、流失も想定される。そこで、これらのケースの中から被衝突部材の局所破壊も考慮した損傷建物モデルを仮定し、2 章で述べた pushover 解析を再度行うことで構造性能の低下について考察する。

5.1 損傷建物のモデル

Case1-c、2-d、3-d についてそれぞれ簡易な損傷建物モデルを作成した。

Case1-c

1 階 Y1 通り（南面）全 5 本の柱中央（3.05m）に局所損傷を仮定し、ピン節点とした仮想ヒンジを設ける。

Case2-d

降伏した 1、2、4 層の全柱脚・柱頭を塑性ヒンジと仮定する。

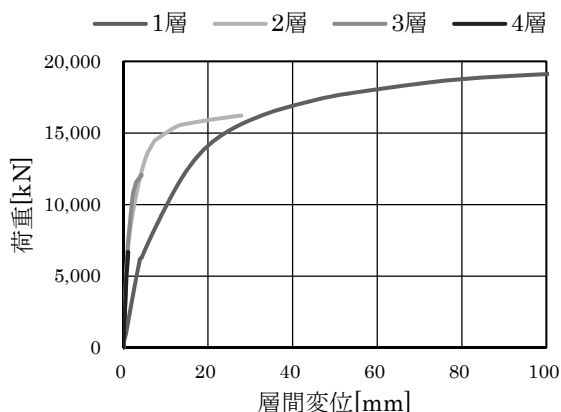
Case3-d

1、2、4 層の全柱脚・柱頭を塑性ヒンジと仮定し、さらに 2 階南東の隅柱および壁の流失を仮定する。

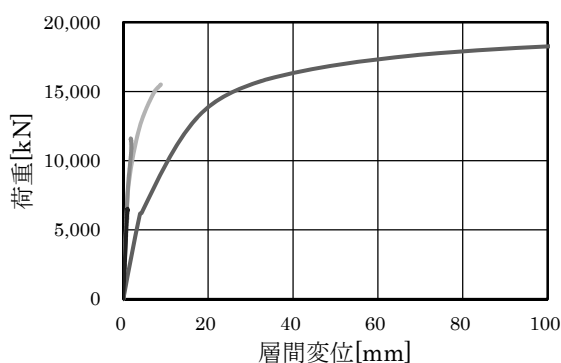
5.2 損傷前後の建物の構造性能比較

pushover 解析による各ケースの荷重－層間変位関係を図－7 に、また、ケース間で架構全体の構造性能の比較を行うため建物を 1 質点系に縮約した場合の荷重－変位関係を、図－8 に示す。なお、2 章において作成した損傷前の解析結果を Case0 として掲載している。

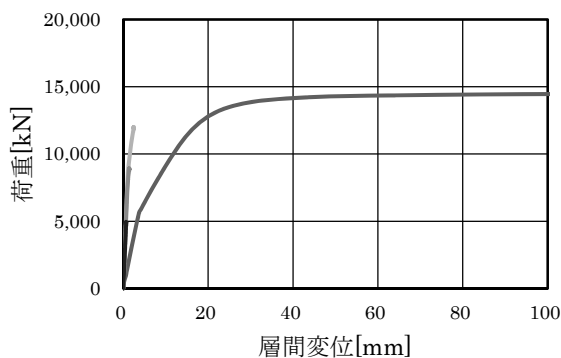
全損傷ケースにおいて、損傷前ケースと比較して剛性低下が小さい変形領域から始まり、最大耐力は Case1-c では大きな低下にはならなかったが、Case2-d および Case3-d では 2 割以上低下した。



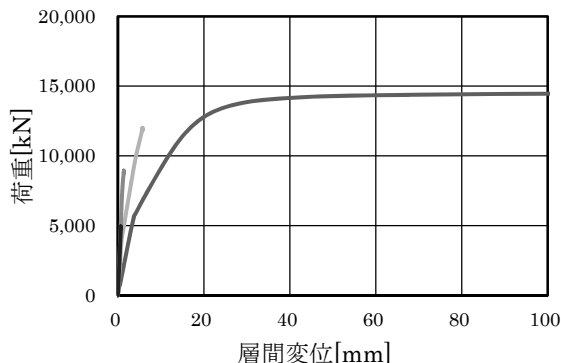
(a) Case0



(b) Case1-c



(c) Case2-d



(d) Case3-d

図－7 荷重－層間変位関係

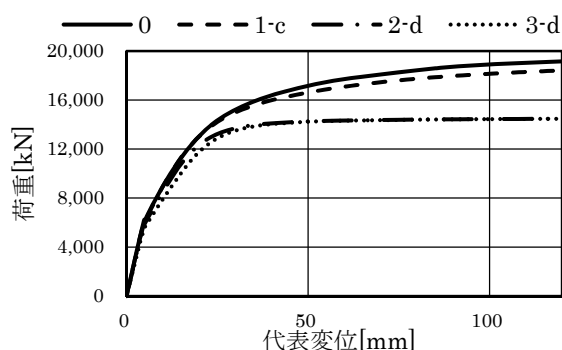


図-8 1 質点系縮約モデルの荷重－代表変位関係

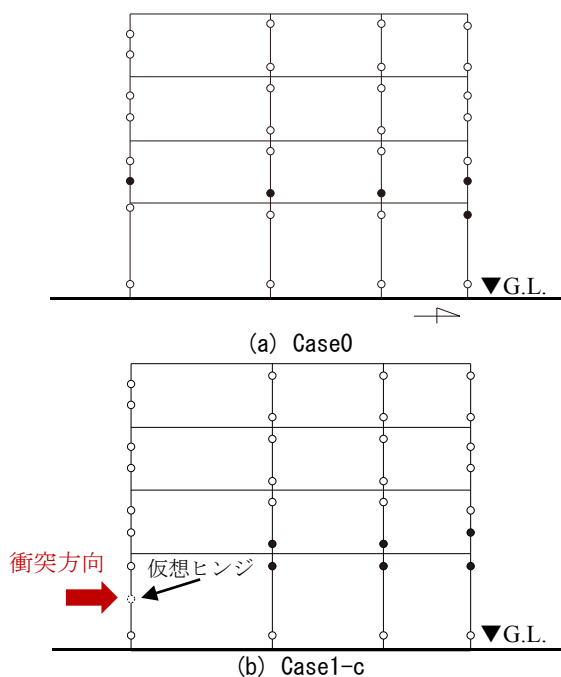


図-9 X3 通りヒンジ図
(○はひび割れ位置, ●は降伏位置を示す)

Case3-d は Case2-d と同様の仮想塑性ヒンジに加えて 2 層の隅柱およびその脇の壁を取り払ったモデルであるが、2 層の剛性の低下は見られたものの、1 質点系に縮約した場合の架構全体への影響は微少であった。

Case0, Case1-c の安全限界時の X3 通り (図-1 の X 方向左から 12800mm) のヒンジ図を比較すると、Case1-c では 1 階内部の柱頭が降伏するようになっている (図-9)。衝突を受けて仮想ヒンジを設けた南側柱の応力を 1 階内部の柱で余計に負担するためと考えられる。

5.3 漂流物衝突が架構に与える影響

架構全体の耐力曲線においては 1 層の構造性能の影響が支配的であるが、津波避難ビルは一般にピロティ部を有する構造であることから 1 層の剛性が低く、衝突を受けて塑性化しやすい。階間への衝突では衝突力が上下階に分配される代わりに構造部材の局部損傷も想定されるが、床高への衝突で層全体が降伏する場合の方がより構造性能への影響が大きいと言える。

6. まとめ

本論文では、津波波力および漂流物衝突力の津波避難ビルに対する影響について、まず時刻歴応答解析を行い、加えて被災後の建物モデルを作成して pushover 解析を行うことにより検討した。本研究では主に以下の知見を得た。

- 1) ピロティを有する建物について、浸水深により異なる外力入力モデルを作成し、津波と漂流物衝突を想定した時刻歴応答解析を行った。床応答加速度はいずれのケースでも衝突を受けた階で最大となったが、層間変位は、衝突高さが低いケースでは慣性力の作用する上階で大きくなった。一方衝突高さ（すなわち浸水深）が高くなると津波波力の影響が大きくなり、1 階ピロティ部が大きく変形する傾向が見られた。
- 2) 時刻歴応答解析の結果を踏まえ、損傷建物モデルを作成し pushover 解析を行った。階間への衝突で柱の局部損傷が生じる場合よりも、層全体が降伏し部材が流失する場合の方が被災後の耐力低下割合は大きくなった。それでも耐力低下は 2 割程度 ($C_B=0.47$) であり、余震に対して即危険というわけではない。一方で床応答加速度が極めて大きくなることから、避難階での設備・什器の転倒により安全性が損なわれないよう留意する必要がある。

参考文献

- 1) 本村友一：津波漂流物の衝突による建築物の応答特性に関する基礎的研究, 東京大学修士論文, 2012
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所：津波避難ビル等の構造上の要件の解説, 2012.2
- 3) MathWorks : MATLAB R2007b
- 4) 廉慶善ほか：陸上遡上津波によるコンテナの漂流挙動と漂流衝突力に関する研究, 海岸工学論文集 第 54 巻, 土木学会, pp.851-855, 2007
- 5) 東京大学生産技術研究所：平成 23 年度 建築基準整備促進事業「40. 津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」中間報告書 その 2, pp. 参-13, 2011.10
- 6) FEMA : Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis, FEMA P646, pp.78, Jun.2008
- 7) 一般財団法人 沿岸技術研究センター, 一般社団法人 寒地港湾技術研究センター：津波漂流物対策施設設計ガイドライン, pp.37-38, 2014.3
- 8) 水谷法美ほか：エプロン上のコンテナに作用する津波力と漂流衝突力に関する研究, 海岸工学論文集 第 52 巻, 土木学会, pp.741-745, 2005