

論文 津波外力時刻歴を考慮した既存 RC 造建築物の耐浪性診断手法に関する研究

鶴岡 七海*1・高橋 典之*2・崔 琥*3

要旨: 東北地方太平洋沖地震での甚大な津波被害の経験や、南海トラフ地震による大津波発生への懸念から、津波浸水地域における津波避難ビルの重要性が認識されている。津波避難ビルの耐浪性診断手法としてガイドライン等が整備されてきたが、いずれも想定浸水深から算定した津波波力と建物耐力の比較によって耐浪性を評価するものであり、情報量に応じてより詳細な診断をする方が適切な場合も考えられる。本研究では、浸水深に加えて流速や時刻歴が入手可能な場合に破壊メカニズム毎の耐力余裕度を統一的に表示・比較できる耐浪性診断手法を提案し、診断の高度化に伴い耐力余裕後評価が変わる事例を紹介しその要因を検討した。

キーワード: 耐浪性診断, 津波外力時刻歴, 限界浸水深

1. はじめに

2011年、東北地方太平洋沖地震が発生し、甚大な津波被害をもたらされた。また2019年に発生した山形県沖の地震では、津波による被害こそなかったものの、山形県鶴岡市では地震発生からわずか5分後に津波が到達した地点が存在した。日本の沿岸部ではどこでも津波被害を受ける可能性があり、近年、津波浸水地域における津波避難ビルの重要性が広く認識されるようになってきた。加えて、南海トラフ地震の発生による大津波が懸念されており、津波避難ビルの量的確保が津波災害対策における課題となっている。そこで、各自治体は津波避難ビルの新設のみならず、既存施設から津波避難ビルに適合する建物を指定することで避難場所の確保を急いでいる。津波避難ビルとして指定するにはその建築物が津波に耐えられることが大前提となる。その確認手段として、内閣府のガイドライン¹⁾や静岡県の対津波診断マニュアル²⁾が整備されたが、予算および人的リソースの関係で自治体によっては運用可能な耐浪性診断手法を模索しているのが現状である。

宮城県内の自治体 I では、津波避難ビルへの指定を検討している建物について国土交通省による「津波避難ビル等の構造上の要件の解説¹⁾」に基づいた「耐浪調査」を民間業者への業務委託で実施している。一方、静岡県では迫田ら³⁾による RC 造建築物を対象とした耐浪性の簡易判定法を参考に「静岡県既存建築物 (RC 造, S 造) の対津波診断マニュアル²⁾」を作成し、既存建築物の耐浪性の具体的な評価基準を定めている。ただし、いずれの耐浪性診断手法も、想定される浸水深を用いて算定した津波波力と建物耐力の単純な比較によって耐浪性を判定するものとなっており、情報量に応じてより詳細な診

断手法を採用する方が適切な場合がある。

日本建築学会「建築物荷重指針・同解説⁴⁾」では、浸水深のほか流速などの情報が得られる場合はこれを用いて波力を算定する方法が提示されている。具体的には、(A)浸水深と流速の時系列、(B)最大浸水深と最大流速、(C)最大浸水深を用いる3つに大別された津波波力算定方法が言及されている。現在検討されている耐浪性診断は基本的に学会指針⁴⁾のルート(C)でのみ検討されており、ルート(A)、(B)を踏まえた診断になっていない。

そこで本研究では、入手可能な情報量に応じて適切な診断レベルを選択する耐浪性診断フローを設定し、想定浸水深に加えて流速情報を利用することができる場合、また非線形解析を用いて津波による建物の時刻歴応答を算出することができる場合の耐浪性評価手法を提案するとともに、診断手法の高度化が及ぼす判定結果への影響について考察する。

2. 本論文で提案する耐浪性診断の概要

本論文における耐浪性診断のフロー概要を図-1に示す。1次診断では浸水深による外力評価、2次診断では浸水深と流速による外力評価、3次診断では津波外力時刻歴が利用できるものとする。ただし、2011年東北地方太平洋沖の被害調査に基づく既往の研究⁵⁾から津波による建築物の架構全体に及ぶ被害は「倒壊(層崩壊)」「滑動」「転倒」の3種類に分類されるが、本論では3次診断の津波外力時刻歴は「倒壊」の検討に適用するものとし、「滑動」「転倒」の検討は2次診断と3次診断と同様の評価とする。また「漂流物の衝突」や「洗掘」については、診断回数によらず静岡県既存建築物の対津波診断マニュアル²⁾で定められた方法を採用するものとする。

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 (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)

*3 静岡理工科大学 理工学部 准教授 博(工) (正会員)

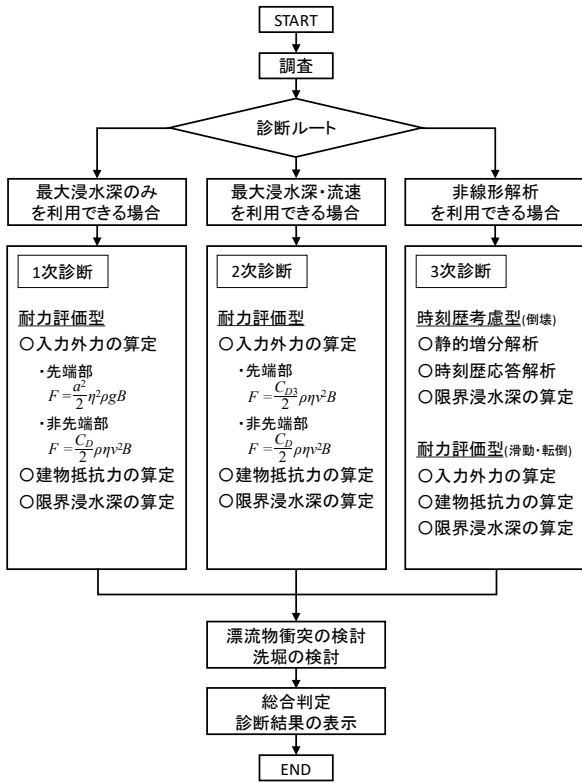


図-1 診断フロー

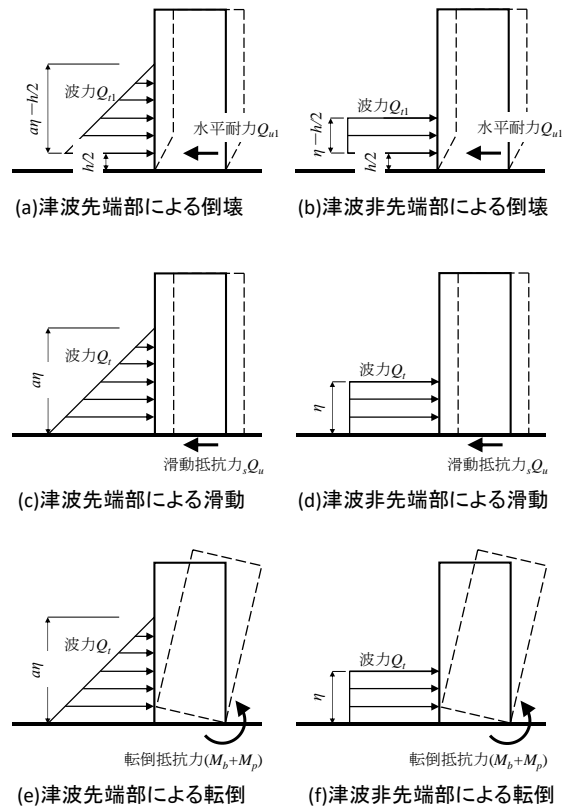


図-2 各破壊メカニズムにおける作用外力モデル

3. 耐力評価に基づく限界浸水深算定手法

本章では耐浪性能を評価するために必要となる限界浸水深の算定手法を、耐力評価型の場合について説明する。

3.1 作用外力の算定

「倒壊」「滑動」「転倒」それぞれの破壊メカニズムにおける作用外力モデルを図-2に示す。

津波先端部による作用外力は式(1)~(3)による。

$$Q_{u1} = \frac{\gamma}{2} \left(a\eta - \frac{h}{2} \right)^2 \rho g B \quad (1)$$

$$Q_t = \frac{\gamma}{2} a^2 \eta^2 \rho g B \quad (2)$$

$$M_w = \frac{\gamma}{6} a^3 \eta^3 \rho g B \quad (3)$$

ここに、 Q_{u1} : 1階にかかる津波波力(kN)、 Q_t : 全体にかかる津波波力(kN)、 M_w : 津波波力による転倒モーメント(kN m)、 γ : 受圧面の開口率による低減率、 a : 水深係数、 η : 最大浸水深(m)、 ρ : 海水の密度(t/m^3)、 g : 重力加速度(m/s^2)、 h : 1階階高(m)、 B : 建物幅(m)である。

なお、波圧高さ $a\eta$ が建物高さを超える場合は、超えた波圧を除外して計算することとする。

津波非先端部による入力外力は式(4)~(6)による。

$$Q_{u1} = \frac{\gamma C_D}{2} \rho B \left(\eta - \frac{h}{2} \right) v^2 \quad (4)$$

$$Q_t = \frac{\gamma C_D}{2} \rho B \eta v^2 \quad (5)$$

$$M_w = \frac{\gamma C_D}{4} \rho B \eta^2 v^2 \quad (6)$$

ここに、 C_D : 抗力係数、 v : 最大流速(m/s)である。

耐浪性1次診断では、式(7)から算出される v を最大流速として扱う。

$$v = a \sqrt{\frac{g\eta}{2}} \quad (7)$$

耐浪性2次診断では、水深係数 a の代わりに波力を静水圧分布に置き換えて得られる等価水深係数 a_q を用いる。 a_q は式(8)より求められる。

$$a_q = \sqrt{\frac{C_{D3} v^2}{\eta g}} = \sqrt{C_{D3} \cdot Fr} \quad (8)$$

ここに、 C_{D3} : 津波波力算定のための係数⁴⁾、 Fr : フルード数である。

3.2 建物抵抗力の算定

破壊メカニズム毎の建物抵抗力は式(9)~(12)による。

$$Q_{u1} = W_b' C_B \quad (9)$$

$$sQ_u = \begin{cases} \mu(W_b - Q_z) & \text{(直接基礎)} \\ n_p \cdot \min(Q_{su}, Q_{mu}) & \text{(杭基礎)} \end{cases} \quad (10)$$

$$M_b = \frac{1}{2} L (W_b - Q_z) \quad (11)$$

$$M_p = n_{pt} P_t d_e \quad (12)$$

ここに、 Q_{u1} : 建物1階の保有水平耐力 (kN), sQ_u : 滑動抵抗力(kN), M_b : 見かけの建物重量による抵抗モーメント(kNm), M_p : 杭の引き抜き力による抵抗モーメント(kNm), W_b : 建物重量(kN), W_b' : 建物重量 (基礎階を除く) (kN), C_B : 層せん断力係数, μ : 接地面の摩擦係数, Q_2 : 建物に作用する浮力(kN), Q_{su} : 杭のせん断耐力(kN), Q_{mu} : 杭の終局曲げモーメント時のせん断力(kN), n_p : 全杭本数, L : 建物の奥行(m), n_{pr} : 引張側杭本数, P_r : 杭の引き抜き耐力(kN), d_e : 転倒回転中心から引張側の杭重心間距離(m)である。浮力は津波の建物内への流入・非流入を区別して適切に設定する(流入時は梁下の空気溜まりと躯体排水体積分, 非流入時は建物の浸水体積分の浮力を設定する)。構造図面等の詳細情報が得られない場合(杭の設計情報不明, 外装材耐圧性能不明等)は, 建物を直接基礎と仮定し, 津波非流入として建物抵抗力を算定する。

3.3 限界浸水深の算定

各破壊メカニズムにおける入力外力に対する建物抵抗力の比(それぞれ Q_{u1}/Q_{u1} , sQ_u/Q_u , $(M_b+M_p)/M_w$ で表され, これを耐浪性指標値とここでは呼ぶこととする)がすべて 1.0 以上であれば想定する津波に対して必要な耐浪性を有していると評価できる。

ここで耐浪性1次診断に着目すると, 津波波力は水深係数を乗じた静水圧で評価されるが, 式(2)より全体にかかる津波波力は浸水深の2次関数, 式(3)より転倒モーメントは浸水深の3次関数になる。このように浸水深を変数としたときに異なる次数を有する関数で波力が表現される場合, 建物限界浸水深に対する建設地点における想定浸水深の余裕度は, 建物の耐浪性における余裕度に単純に読み替えることができない。そこで本研究では, 波力に対する建物抵抗力の比を耐浪性指標値として, これを限界浸水深に換算しなおすことで, 浸水深規準での余裕度が異なる破壊メカニズムに対しても統一的に表現できるようにした。

津波先端部の耐浪性指標値は, 迫田ら⁶⁾の提案式を用いて限界浸水深に換算する。倒壊・滑動・転倒に対する各指標値をそれぞれ β_1 , β_2 , β_3 とすると, 津波先端部波力に対する限界浸水深 η_{max} は式(13)~(15)で表される。

$$\frac{\eta_{max1}}{\eta} = \sqrt{\beta_1} - \frac{h}{2a\eta} (\sqrt{\beta_1} - 1) \quad (13)$$

$$\frac{\eta_{max2}}{\eta} = \sqrt{\beta_2} \quad (14)$$

$$\frac{\eta_{max3}}{\eta} = \sqrt[3]{\beta_3} \quad (15)$$

津波非先端部については, 想定される浸水深と流速から得られるフルード数のもとで限界浸水深を算定する。迫田ら⁶⁾の提案式を参考に, 津波非先端部における想定フルード数での倒壊に対する限界浸水深は式(16)から求

められ, 滑動, 転倒に対する限界浸水深は(津波先端部波力と同じ)式(14), (15)から求められる。

$$\frac{\eta_{max1}}{\eta} = \frac{h}{4\eta} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{h^2}{4\eta^2} + 4\beta_1 \left(1 - \frac{h}{2\eta}\right)} \quad (16)$$

4. 津波外力時刻歴を考慮した限界浸水深算定手法

耐浪性能を評価するために必要となる限界浸水深の算定手法を, 時刻歴考慮型の場合について説明する。

4.1 津波波圧分布時刻歴モデル

建築物に作用する津波波力の時刻歴特性として, 鈴木ら⁷⁾は図-3の津波外力モデルを提案している。しかしこの外力モデルは, フルード数が大きい場合の波圧最大時の波圧鉛直分布を再現できない問題がある。

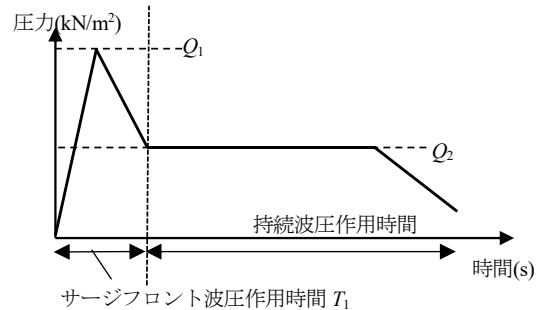


図-3 津波外力時刻歴のモデル化

そこで鉢呂ら⁸⁾は, 流体解析結果を参考に図-4に示す波圧鉛直分布時刻歴を定め, 鈴木らの外力モデルを踏まえて「フルード数の大小による波圧鉛直時刻歴変化」「サージフロント波圧作用時間, 移行期, 持続波圧作用時間の3つの時間帯による波圧鉛直時刻歴変化」を考慮できるようにした新たな外力モデルを提案した。外力モデルの概略を表-1に示す。

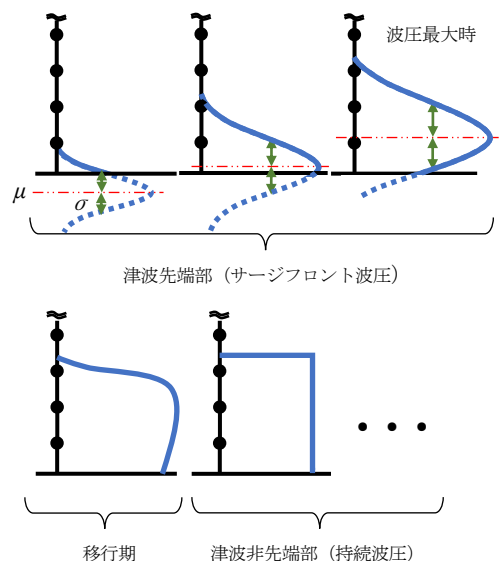


図-4 波圧鉛直分布の推移(概略図)

表一 時刻 t における津波波圧分布のモデル化

	サージフロント波圧 作用時間 $0 \leq t \leq T_1/2$	移行期 $T_1/2 \leq t \leq T_1$	持続波圧 作用時間 $T_1 \leq t$
$F_r \geq 1$	$Q_1 = \rho(h', t)\rho gh_{\max}$	$Q_m = (1 - \alpha)Q_1 + \alpha Q_2$ $\left(\alpha = \frac{t - T_1/2}{T_1/2}\right)$	$Q_2 = \frac{1}{2}\rho C_D u^2$
$F_r < 1$	$Q_1 = \rho g(h'_{\max} - h')$		

なお、既往の研究⁸⁾より T_1 と建物固有周期が近接していると応答が大きくなることから、本研究では T_1 が建物固有周期と等しいとして診断を行う。

4.2 限界浸水深の算定

時刻歴考慮型による倒壊限界浸水深の算定は、以下の手順に従って行う。

- (i) 静水圧分布を仮定して、静的増分解析により各層の層せん断力-層間変位の関係を算出する。
- (ii) 柱部材・壁部材の曲げ耐力時・せん断耐力時の層間変位を算出し、それらの最小値(建物の限界層間変位) δ_{\max} を算出する。
- (iii) 層の復元力特性をモデル化する。
- (iv) 多質点系モデルの非線形時刻歴応答解析により、浸水深-最大層間変位の関係を算出する。
- (v) 限界層間変位 δ_{\max} に対応する浸水深を倒壊に対する限界浸水深 $\eta_{\max 1}$ とする。

5. 診断結果の表示方法

波力に対する建物抵抗力の比から算定される限界浸水深を、津波による構造物の破壊メカニズム別に求め、これらを統一的に表示する指標(以下、構造耐浪性指標 I_T とする)にまとめると式(17)のようになる。 I_T が 1.0 以上であれば建物の耐浪性が確保されていることになる。

$$I_T = \frac{\min[\eta_{\max 1}, \eta_{\max 2}, \eta_{\max 3}]}{\eta} \quad (17)$$

波力に対する建物抵抗力の余裕度を構造耐浪性指標として表示することで、複数の RC 造建築物の耐浪性判定結果の比較、耐浪性のグレード分けが容易になる。 I_T 値による耐浪性表示は、設計者や津波避難ビル指定者だけでなく、避難者にとっても有用な情報となり得る。

6. 既存建築物における検討

提案した耐浪性診断を検討対象建物に適用した場合に診断手法の高度化が及ぼす影響について検討する。

6.1 検討対象建物概要

検討対象建物は、日本の沿岸自治体 K にある地上 4 階建て鉄筋コンクリート造の教育施設である(写真-1)。



写真-1 検討対象建物外観

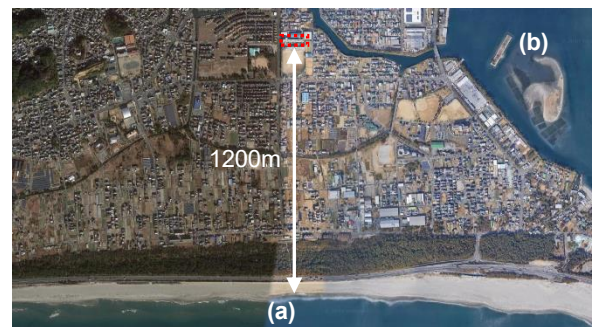


写真-2 検討対象建物周辺の航空写真

周辺には外海(写真-2(a))、内海(写真-2(b))が広がり、付近には河川が流れている。本論文では外海から津波が遡上するものと仮定し、津波波力を受ける建物南面(図-5において紙面下方向が南)に対する耐浪性の診断を行う。検討対象建物は海岸線から 1200m の場所に位置するため、文献1)より水深係数を $a=1.5$ とし、ベースシア係数は $C_B=0.55$ 、受圧面の開口による波力低減率は $\gamma=0.7$ とする。杭は地業として施工され、杭頭の呑込みが無い(杭頭の接合が適切ではない)ことから、滑動

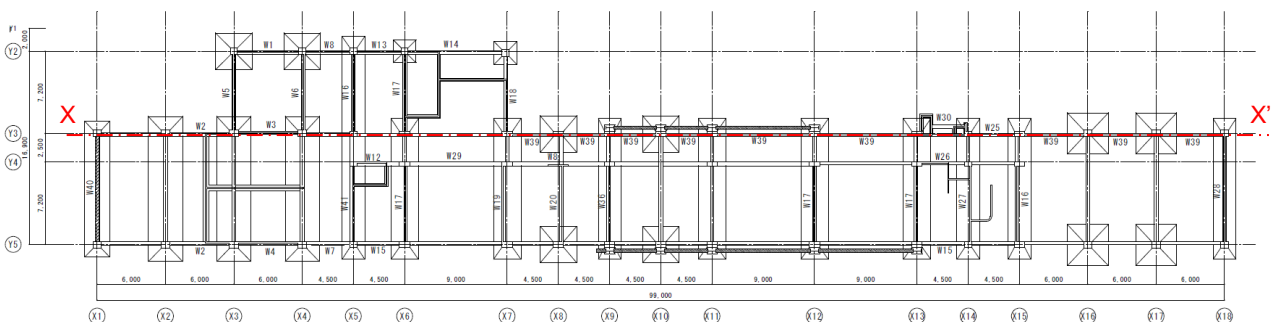


図-5 検討対象建物基礎伏図

抵抗力は基礎下の摩擦力を採用する（直接基礎として算定する）こととし、文献2)より接地面の摩擦係数 μ を0.5とする。転倒の検討を行う際には、平面突出部を無視した矩形平面と考え、転倒回転の支軸を図-5のXX'とする。浮力は津波非流入時・流入時のどちらも検討する。また、漂流物の衝突や洗掘はないとする。本論文では、最大浸水深5.0m、最大流速7.0m/s、フルード数1.0の検討用遡上津波を仮定する。建物の階高と重量を表-2に示す。

表-2 検討対象建物の階高及び重量

階(層)	階高(mm)	重量(kN)	Σ 重量(kN)
4F(R層)	3900	8861	8861
3F(3層)	3800	12693	21554
2F(2層)	3800	12705	34259
1F(1層)	3800	13727	47986
基礎		22867	70853

6.2 検討対象建物の解析モデル概要

(1) 静的増分解析

構造解析ソフト SNAP Ver.7 を用いて静的増分解析を行う。簡単のため耐力壁を含む X 構面を対象に面内方向に力を受ける平面フレームモデルとして解析を行う。柱・梁部材は材端ばねモデル、壁部材は3本柱モデル（軸ばねはピン接合として軸力のみを負担）に置換する。

(2) 非線形時刻歴応答解析

数値解析ソフト MATLAB を用いて非線形時刻歴応答解析を行う。検討対象建物を図-6(a)のような多質点系モデルに置換する。各質点ばねの骨格曲線概要を図-6(b)に示す。骨格曲線はトリリニア型で、ひび割れ点強度 Q_c は降伏強度 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、静的増分解析により得られた各層の層せん断力-層間変位の関係から等価線形剛性を設定する。降伏時剛性低下率は0.3、降伏後の剛性は初期剛性の1/1000とする。各質点の履歴モデルには Takeda モデルを

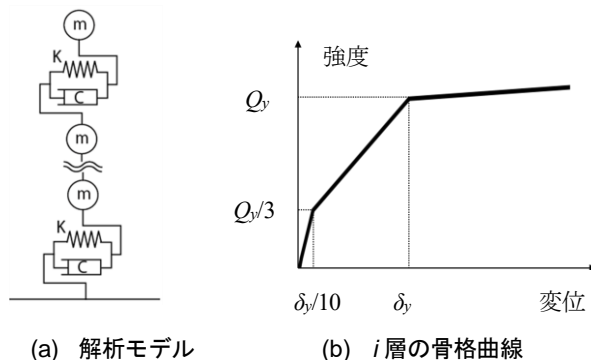


図-6 検討対象建築物のモデル化

用いる。建物の減衰は瞬間剛性比例型とし、減衰定数を0.05とする。

6.3 解析結果

(1) 静的増分解析

1階の部材種別毎に算定した負担層せん断力-層間変位の関係を図-7に示す。部材種別毎の耐力は、1階柱が $Q_u=879$ [kN]（曲げ破壊）、1階壁が $Q_u=10180$ [kN]（せん断破壊）であることから、限界層間変位を図-7より壁耐力に到達した $\delta_{max}=34.26$ [mm]とする。

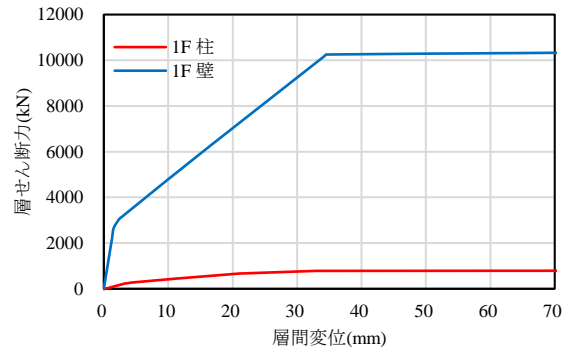


図-7 層せん断力-層間変位の関係（1階）

(2) 非線形時刻歴応答解析

1階の浸水深-最大層間変位の関係を図-8に示す。前述のとおり $\delta_{max}=34.26$ [mm]であるため、図-8より倒壊に対する限界浸水深を $\eta_{max1}=7.04$ [m]とする。

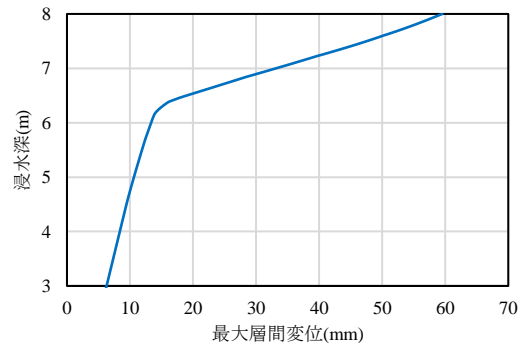


図-8 浸水深-最大層間変位の関係（1階）

6.4 診断結果

診断次数毎に、各破壊メカニズムでの限界浸水深を図-9に、限界浸水深と I_T 値を表-3に示す。どの診断次数においても、津波非流入時の滑動及び転倒に対する限界浸水深 η_{max2} 、 η_{max3} は津波流入時と比較して大幅に小さくなっており、 I_T 値が1.0を下回っている。本論文では、最大浸水深が5.0mの遡上津波を対象に検討を行っており、津波を受けた際に検討対象建物の1階が完全に浸水することになるため、浸水体積分の浮力と躯体・空気溜まり体積分の浮力とで結果に大きな差が生じたものと考えられる。一方で、倒壊に対する限界浸水深 η_{max1} の大きさは津波流入の有無によらないことが確認できるが、こ

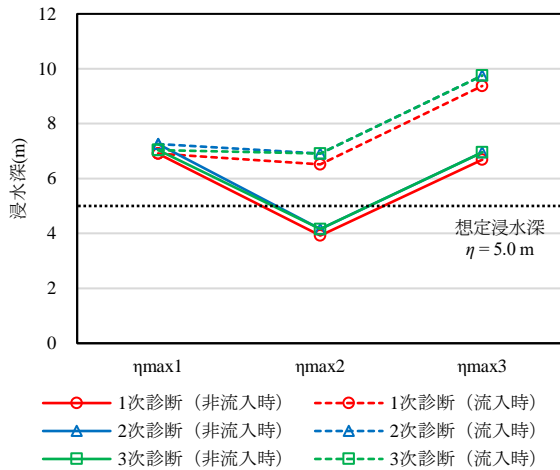


図-9 各診断レベルにおける限界浸水深

表-3 限界浸水深と I_r 値

		限界浸水深(m)			I_r
		η_{max1}	η_{max2}	η_{max3}	
1次診断	非流入時	6.90	3.92	6.68	0.78
	流入時	6.90	6.52	9.37	1.30
2次診断	非流入時	7.26	4.16	6.95	0.83
	流入時	7.26	6.91	9.75	1.38
3次診断	非流入時	7.04	4.16	6.95	0.83
	流入時	7.04	6.91	9.75	1.38

これは倒壊に関するパラメータには浮力が含まれていないためである。

また一般に、耐浪性1次・2次診断では津波の最大浸水深や最大流速のみを考慮して津波波力を算定するため、建物の限界浸水深が過小評価されることとなり（安全側ではあるが）、耐浪性3次診断において時刻歴を考慮して診断を行うと過小評価された建物の限界浸水深が適切に評価されることが考えられる。しかし本論文における検討では、耐浪性3次診断時の倒壊に対する限界浸水深 η_{max1} が、耐浪性2次診断時よりも小さくなった。耐浪性3次診断では壁部材せん断破壊時を倒壊状態としているが耐浪性1次・2次診断では部材のせん断破壊を考慮していないため、本論の検討事例では倒壊に対する限界浸水深を過大評価したものと考えられるが、時刻歴を考慮した津波外力モデルによる影響も考えられるため、より詳細な検討が必要である。

7. まとめ

本論文では、耐力評価に加えて時刻歴を考慮した評価手法を取り入れた耐浪性診断フローを提示し、診断次数の高度化が診断結果に及ぼす影響について考察した。本

研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 耐力評価型と時刻歴考慮型それぞれについて限界浸水深の算出手法を示し、各破壊メカニズムに対する波力に対する建物抵抗力の余裕度を統一的に表示・比較できる方法を提案した。
- 2) 津波流入の有無に伴う浮力の影響で、滑動及び倒壊に対する限界浸水深が大きく変化する可能性がある。耐浪性診断においては、建物に津波が流入するか入念に検討することが重要である。
- 3) 津波外力時刻歴を考慮することで耐力評価では過小評価されていた建物の限界浸水深がより適切に評価できると考えられる。ただし、せん断破壊で耐力が決まる建物の場合、耐浪性1次・2次診断のほうが限界浸水深を過大評価する可能性もある。

既往の研究⁸⁾では、建物が地震動を受けて損傷した直後に続けて津波を受ける場合の建物応答について分析しているが、本論文ではそのようなケースは考慮していないため、考慮する必要があるのかどうかを今後の検討課題とする。また、耐浪性3次診断における滑動・転倒評価時のより詳細な波力の設定手法についても検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 静岡県建築士事務所協会：静岡県既存建築物（RC造，S造）の対津波診断マニュアル，2015.8
- 3) 迫田丈志，太田勤ほか：RC造建築物を対象とした耐津波性能の簡易判定に関する基礎的検討 その2 簡易手法の提案とその検証，日本建築学会大会学術講演梗概集 2013(構造IV)，Vol.C-2，pp.651-652，2013.8
- 4) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説(2015)，2015.2
- 5) 国土交通省 国土技術総合政策研究所・独立行政法人建築研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料No.674/建築研究所資料No.136，2012.3
- 6) 迫田丈志，太田勤ほか：建築物の対津波性能評価に用いる限界浸水深の簡易算定法，日本建築学会大会学術講演梗概集 2015(構造I)，Vol.B-1，pp.3-4，2015.9
- 7) 鈴木隆雄，高橋典之：地震動及び津波荷重の複合外力を受けるRC造建築物の耐津波性能評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.2，pp.745-750，2015.7
- 8) 鉢呂友惟，高橋典之：建築構造物に作用する津波外力時刻歴モデルの開発に関する研究，コンクリート工学会年次論文集，Vol.41，No.2，pp.19-24，2019.7