

論文 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

鈴木 隆雄*1・高橋 典之*2

要旨：2011年東北地方太平洋沖地震における甚大な津波被害を受け、国土交通省から「津波避難ビル等の構造上の要件の解説¹⁾」において津波避難ビルの設計指針が示された。指針の前提条件は、現行の建築基準法の規定に適合する地震に対して十分な安全性を備えた構造物が対象としているが、耐震性と耐津波性の検討は別途行うことになっている。そこで本研究では、実現象を鑑み、地震動外力を受けた後に津波外力を受ける RC 造建築物を想定し、複合外力に対する時刻歴応答解析を通して地震による損傷を受けた構造物の有する耐津波性能の評価を行うとともに、地震動の耐津波性能への影響を検討した。

キーワード：耐津波性能、地震動・津波複合外力、RC 造建築物

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震における甚大な津波被害を受けて以来、耐津波設計に関する研究が行われている。国土交通省は「津波避難ビル等の構造上の要件の解説¹⁾」において津波避難ビルの設計指針を示しているが、指針における構造物の耐震性と耐津波性はそれぞれ別途検討するものとなっている。しかし、実現象では地震動外力が作用した後に津波外力が作用する。そのため、耐津波設計においては地震動により構造物が損傷を受け耐津波性能が低下することを考慮する必要があると考えられる。

そこで本研究では、既往の水理実験結果を参考に津波外力時刻歴モデルを作成するとともに、地震動波形と組み合わせ、多質点系にモデル化した RC 造建築構造物の動的時刻歴応答解析を行う。そして、津波荷重の動的効果についても検討を行うとともに、地震動による損傷が耐津波性能に及ぼす影響について検討を行う。

2. 津波外力の時刻歴モデル仮定

本論文で扱う津波外力の時刻歴波形のモデル化について以下に説明する。

2.1 津波波圧時刻歴の分類

既往の研究²⁾から、陸上に遡上し構造物に作用する津波波圧の過程は図-1のようにまず「衝撃的な波圧」が作用し、その後「準定常的な持続波圧」が作用する形態をとる。「衝撃的な波圧」は、河川を遡上するような津波の波圧である段波波圧と水の無い陸上に来襲する津波による波圧のサージフロント波圧とに区別されるが、本研究では、陸上に設計される建築物を想定し「衝撃的な波圧」としてサージフロント波圧が作用するものとして検討を行う。また、文献2によればサージフロント波

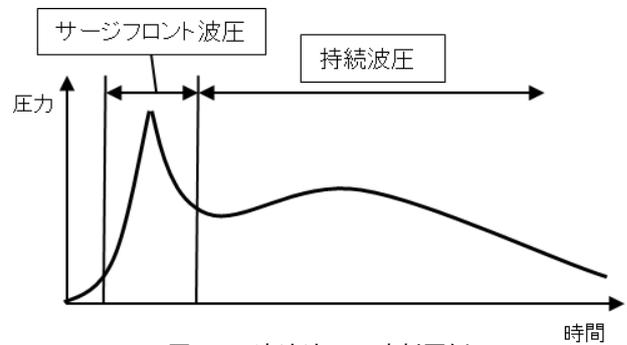


図-1 津波波圧の時刻歴例

圧は比較的作用時間が短く、後段の持続波圧は作用時間が長いことが分かっている。

2.2 各波圧最大値の設定

サージフロント波圧の最大値は、津波避難ビルのガイドラインから(1)式に示す水深係数及び浸水深で決まる静水圧式を参考に定めた。

$$Q_z = \rho g (ah - z) \quad (1)$$

ここに、 Q_z ：サージフロント波圧(kN/m²)、 ρ ：海水の単位質量(kg/m³)、 g ：重力加速度(m/s²)、 a ：水深係数(本論文では紙面の都合上 1.0 とした場合の結果のみ扱う。)、 h ：浸水深(m)、 z ：当該部分の地面からの高さ(m)である。

一方、持続波圧は文献3より津波の流れの中にある構造物に作用する流体力として最も支配的な抗力を想定し、(2)式に示す抗力係数及び津波流速から求まる抗力式を用いて算定する。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho \cdot C_D \cdot u^2 \quad (2)$$

ここに、 F_D ：持続波圧(kN/m²)、 C_D ：抗力係数(本検討では正方形の建築物を対象とするため 2.0 とする)、 u ：津波流速(m/s)である。本論文では、文献4において 2011

*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)

年東北地方太平洋沖地震での記録映像から算定された津波流速は最大浸水深によらず3~6m/s程度であったことが報告されていることを参考に、流速 u は浸水深によらず観測記録の上限である6.0m/sとした。

津波外力作用開始時刻から、後述するサージフロント波圧作用時間の半分の時刻にサージフロント波圧が最大波圧になり、その後、持続波圧に移行するまでは作用時間に対して線形に圧力が変化するものとし、持続波圧が一定時間作用したあと外力作用終了時刻までについても作用時間に対して線形に圧力が変化するものとした。津波外力の時刻歴モデルの概形を図-2に示す。

2.3 各波圧作用時間の設定

サージフロント波圧の作用時間については、これまでに様々な遡上津波を対象とした水路実験が行われているが、フルード相似則で時間スケールを揃えても、各実験条件で結果にばらつきが生じる。そのため、本研究ではサージフロント波圧の作用時間を0.1秒間から1秒間までのパラメータとし作用時間の違いが建物の応答に及ぼす影響についても検討することとする。

持続波圧の作用時間についても、フルード相似則に応じて時間スケールを揃えた水理実験での数十秒から、2011年東北地方太平洋沖地震で見られた数分単位まであることを踏まえ、20秒と600秒の2ケースについて検討を行うものとする。

本論文で扱う解析パラメータを表-1に示す。なお、津波外力作用前に建物に作用させる地震動には、実際に津波被害をもたらした地震波(2011年東北地方太平洋沖地震波等)を含め多数検討したが、津波浸水深が等しい地点でも地震動強さ及び地震動特性は異なり、両者に明確な相関を見いだせないため、本論文では地震動・津波複合外力を受ける建物の損傷をパラメトリックに解析することを主眼に、地震動記録として一般的な強震記録であるEl Centro 1940(NS)を用いた事例を示すことにした。

2.4 波圧の鉛直分布

波圧の鉛直分布については入力津波波形の各時刻の値が地表面での波圧になるものとし、サージフロント波圧作用時は三角形分布で、持続波圧作用時は等分布で、浸水深までの各質点に作用するものとした(図-3)。各質点の波圧の振り分けは、当該質点と上下階に隣り合う質点(または地盤面)との距離をそれぞれ二等分した区間の当該質点側にかかる波圧を負担するものとする。

3. 検討対象建物の解析モデル

検討対象建物はRC造建築構造物とし、設計用浸水深10m、第2種地盤の地域で設計される床面積20m×20mの整形な7階建建築物を想定し、各層質量を500t、階高を各層3mとする。対象建築物は図-4(a)のような多質

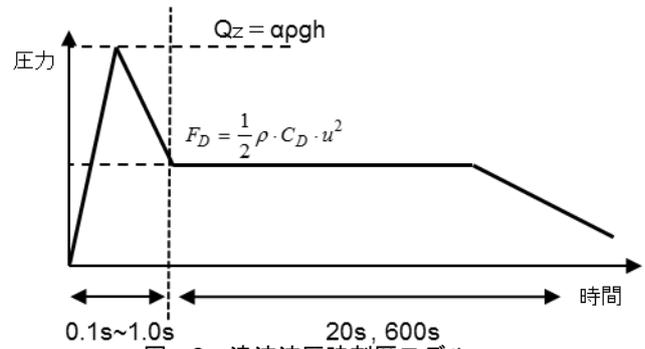


図-2 津波波圧時刻歴モデル

表-1 浸水深と波圧作用時間の組み合わせ

浸水深 (m)	地表面最大サージ波圧 (kN/m ²)	持続波圧 (kN/m ²)	サージ波圧作用時間 (s)
6	60.9	37.1	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0
7	71.0		
8	81.1		
9	91.287		
10	101.4		

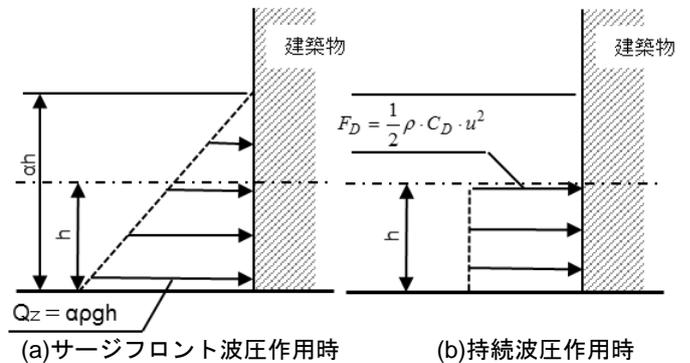


図-3 津波波圧時刻歴モデル

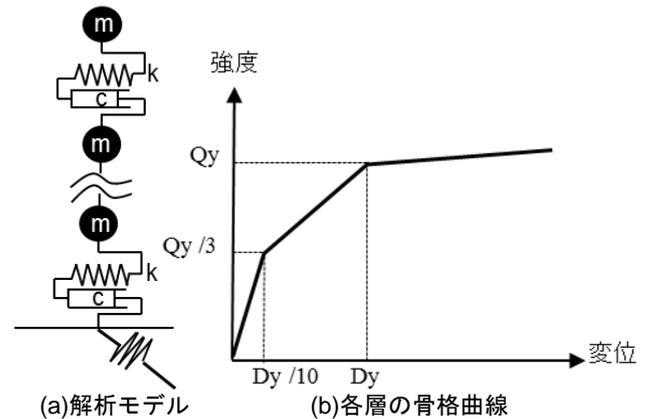


図-4 検討対象建築物のモデル化

点系モデルに置換する。なお、本建物は杭基礎構造を想定し、津波外力に対して滑動および転倒は生じないものとする。また、受圧面における開口率は0とする。各質点系の骨格曲線の概要を図-4(b)に示す。骨格曲線はトリリニア型とし、第2折れ点である降伏点強度は(3)式で求まるものとし、第1折れ点であるひび割れ点強度は降伏点強度の1/3とした。降伏点変位は階高に対して1/200rad.となる点(各層で0.015m)とし、ひび割れ点変

位は降伏時剛性低下率が0.3となるよう降伏点変位の1/10とした。また、各質点系の履歴モデルにはTakedaモデルとした。降伏後の剛性は初期剛性の1/1000と仮定し、内部粘性減衰は瞬間剛性比例型で減衰定数を0.05とした。

$$Q_i = C_i \cdot \Sigma W_i \quad (3)$$

ここに、 Q_i : i 層の層せん断力(kN), C_i : 層せん断力係数 (A_i 分布比例), ΣW_i : i 層より上層の総建物重量(kN)である。本論文では層せん断力係数の決定にあたり地域係数 Z , 振動特性係数 R_i をそれぞれ1.0とし、標準層せん断力係数 C_0 を0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0の5種類設定した全5ケースについて解析を行った。なお、解析では層間変形角が1/50rad.に達した時点を見逃しとみなした。

4. 津波波力の動的効果に関する検討

地震動外力と津波外力との複合外力を想定した応答解析に先立ち、2章で述べた津波波圧のみの時刻歴応答解析を行い、その結果として算出された最大応答津波波力に関する考察及び、津波避難ビルに記されている静水圧式から求められる静的な設計波力との比較、考察を行う。ここで、単位面積あたりの力である「波圧」に対して構造物全体に作用する力を「波力」として区別する。文献2において衝撃的な波圧が観測されていても構造物に実際に作用する力（波力）を考えた場合には、必ずしも衝撃的な最大値が現れない場合があることが報告されており、本論文においても津波が建物に及ぼす力である「波力」に着目して考察を進める。

4.1 サージフロント波圧作用時間の影響

図-5に標準層せん断力係数 $C_0=1.0$, 津波浸水深 $h=10m$, 水深係数 $\alpha=1.0$ とした時の1層での応答層せん断力の時刻歴をサージフロント波圧の作用時間が0.1秒, 0.5

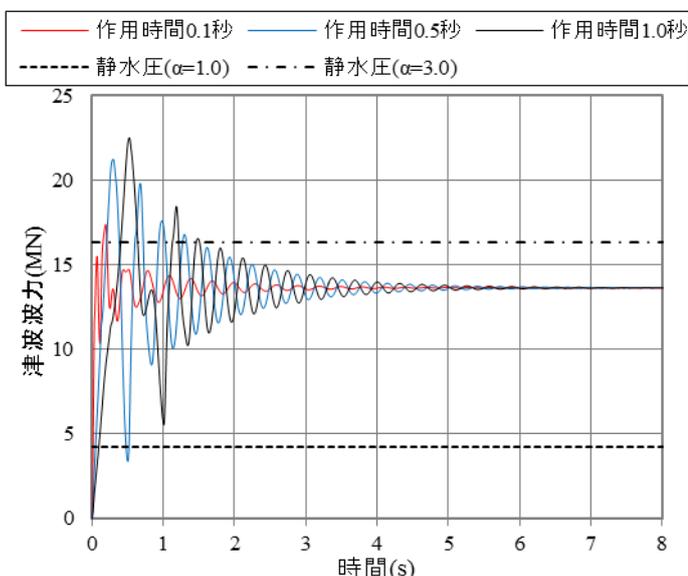


図-5 津波波力の時刻歴推移

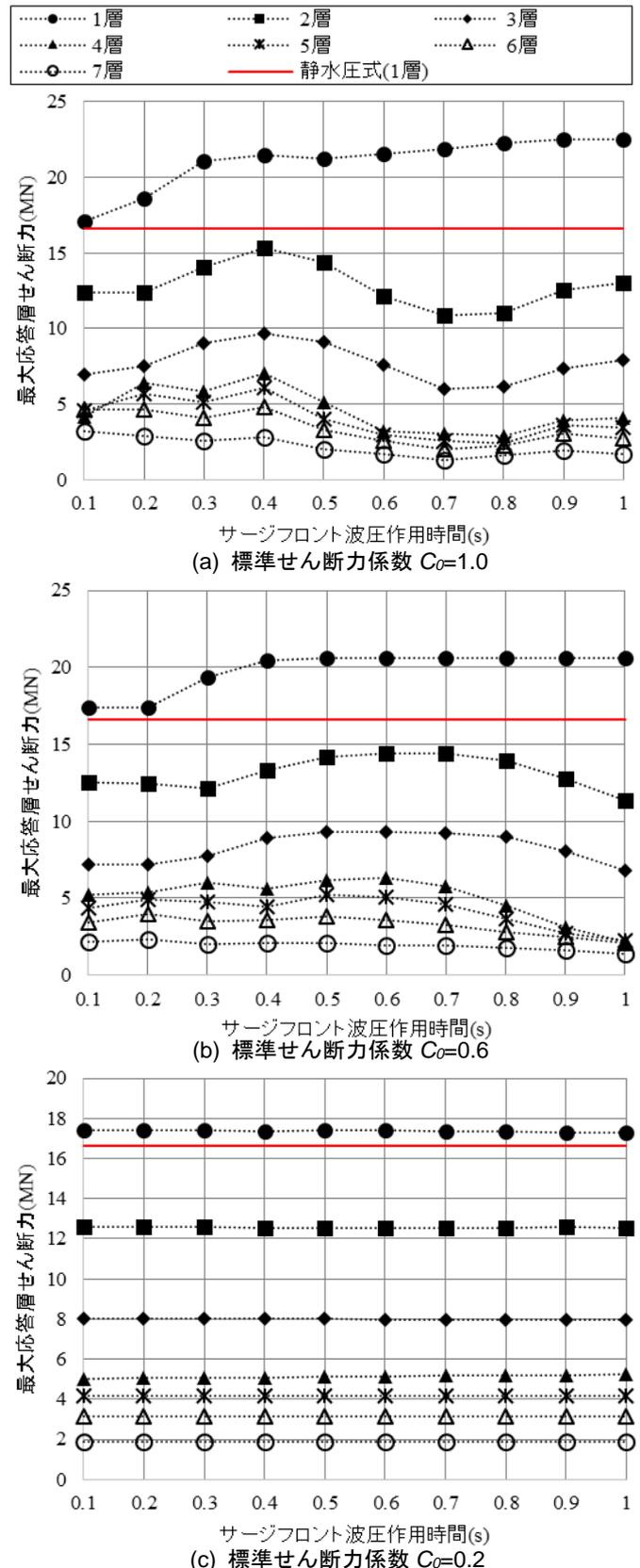


図-6 各解析ケースにおける最大応答層せん断力

秒, 1.0秒の場合について示す。静水圧式から求められる波圧を面積積分して算出した1層にかかる波力を破線で、同様に $\alpha=3.0$ とした静水圧から算出した波力を一点鎖線で示す。作用時間0.1秒とした場合、 $\alpha=3.0$ とした静

水圧から計算される波力とほぼ同程度の最大波力となった。作用時間が長くなると津波作用外力としての最大波力は大きくなる傾向が見られ、サージフロント波圧の作用時間が0.1秒の場合に比べて、作用時間1.0秒の場合では建物に作用する最大波力は瞬間的に約1.3倍になる。津波の時刻歴応答解析を行う際は、このサージフロント波圧の作用時間を実被害や実験値と比較し適切に設定する必要がある。

次に、図-6にサージフロント波圧作用時間と最大応答層せん断力の関係を各層毎に示す。それぞれ、標準層せん断力係数 $C_0=0.2, 0.6, 1.0$ の場合を示している。実線で水深係数 3.0 として静水圧式によって算出された1層での津波波力を示している。標準層せん断力係数 $C_0=1.0$ の場合、1層ではサージフロント波圧作用時間が増加するにつれ最大応答層せん断力が増加している。2~7層では、作用時間が0.1秒から作用時間0.4秒までは応答層せん断力が最大となりそこからは作用時間が長くなるにつれ応答波力が低下している。標準層せん断力係数 $C_0=0.6$ の場合についても同様の傾向が見られるが、 $C_0=1.0$ の場合と比べ、作用時間の増加に対する応答層せん断力の増加率は低く、2層より上層での応答波力の増加は概ね0.6秒までとなった。標準層せん断力係数 $C_0=0.2$ の場合では耐力に到ったため最大応答層せん断力に作用時間による変化は認められなかった。

ちなみに持続波圧作用時間については、20秒のケース、600秒のケースともに結果に違いは見られなかった。

サージフロント波圧の作用時間によっては静水圧換算時の水深係数 α が3を上回る場合もあり、耐力的に余裕があると思われる構造物でも、瞬間的な応答に与える影響を考慮した対津波設計を考える必要がある。

4.2 静水圧式による静的波力との比較

図-7に解析時の浸水深と層間変形角との関係を示す。それぞれサージフロント波圧作用時間が1.0, 0.5, 0.1秒のケースでの解析結果を示している。前項の応答層せん断力と同様にサージフロント波圧作用時間が長いほど各層の層間変形角は大きくなった。このことから、異なる場合では建物の応答が異なり、津波外力として波力およびその力積を考慮する必要性が確認された。文献5では、静水圧式による静的外力と建物の耐力との比較から算出した「限界浸水深」が耐津波性能の指標として示されている。本論文では動的解析結果とその限界浸水深とを比較する。表-2に本論文での検討対象建物の限界浸水深を標準層せん断力係数毎に示す。建物に作用する津波波圧が同等でも波圧の作用時間が図-7で各ケースにおいて層間変形角が降伏変位である0.005radを超える津波浸水深を見てみると、 $C_0=0.2$ では降伏時浸水深が6~7mとなり、静的外力により算出した限界浸水深よりも動的

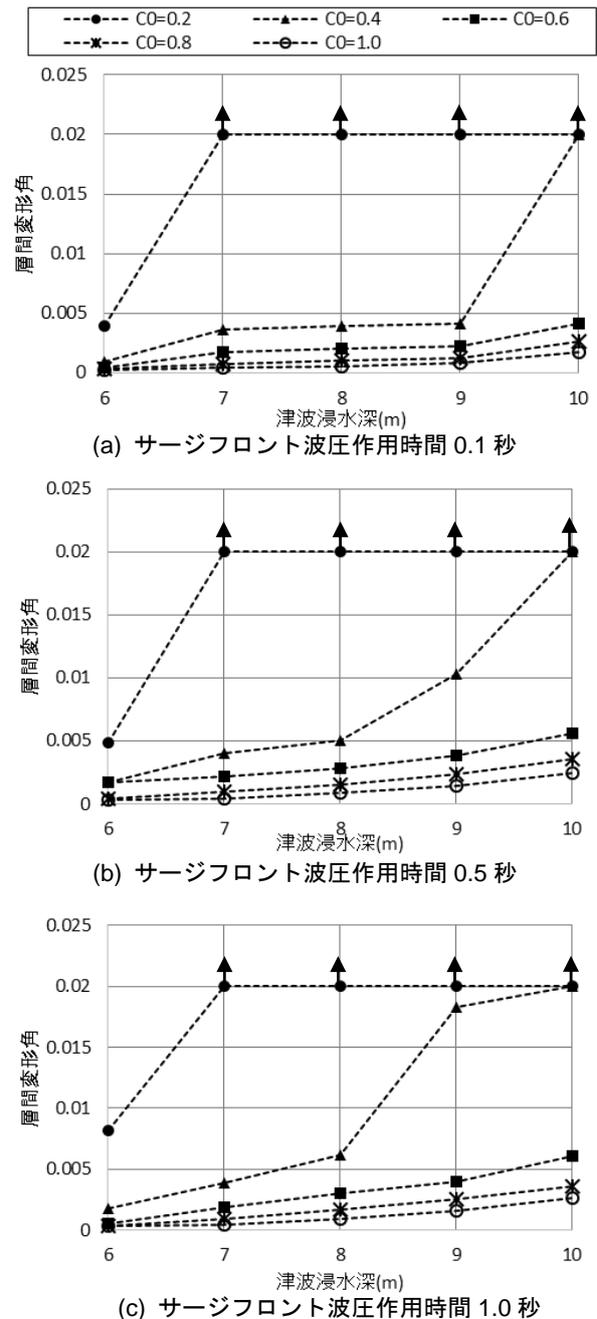


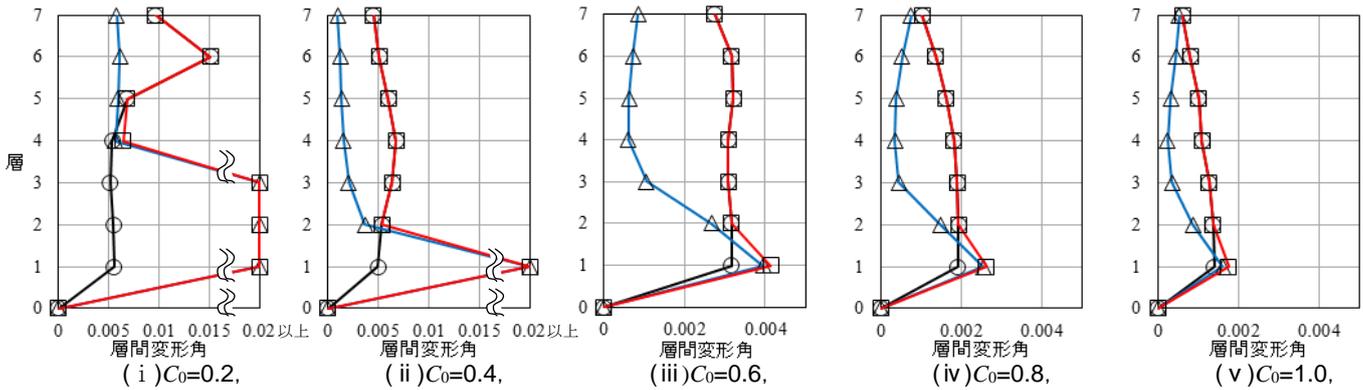
図-7 津波浸水深と層間変形角の関係

解析結果の浸水深が大きな数値となっている。それに対して $C_0=0.4$ ではサージフロント波圧作用時間で異なり、作用時間0.1, 0.5, 1.0秒での降伏時浸水深は 其々9~10m, 8m, 7~8mとなった。水深係数 $\alpha=2.0$ とした静的外力による限界浸水深と比較すると、作用時間0.1秒のケースでは動的解析による降伏時浸水深の方が大きくなり、作用時間0.5秒, 1.0秒のケースでは静的外力による限界浸水深の方が大きい結果になった。そこで本論文では、動的解析による降伏時浸水深が、静的外力による限界浸水深を上回るケース（作用時間0.1秒）と、下回るケース（作用時間1.0秒）について、地震動と津波の複合外力による応答解析を行った。解析結果を次章に記す。

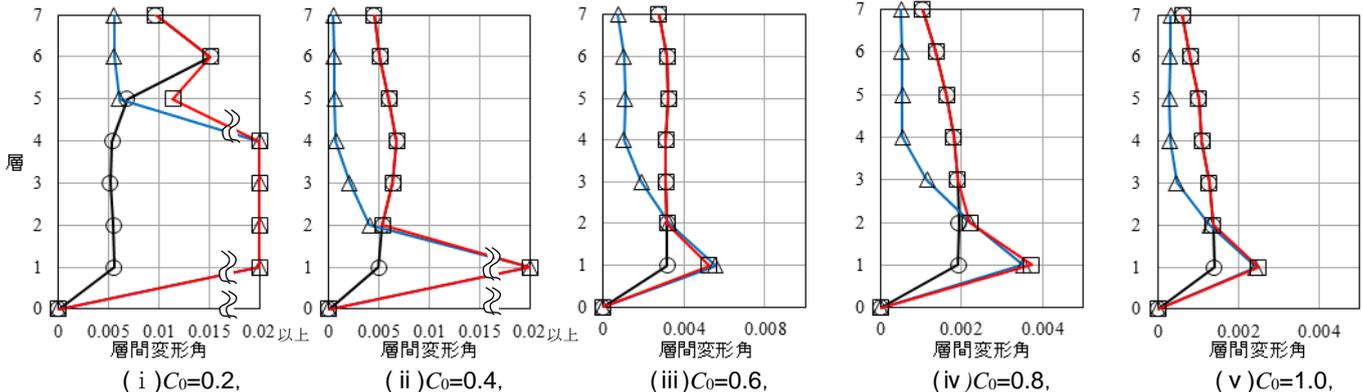
表-2 静水圧式により算出した限界浸水深

水深係数 α	標準せん断力係数 C_0				
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
$\alpha=1.5$	4.8m	11.8m	18.9m	26.0m	33.0m
$\alpha=2.0$	3.6m	8.9m	14.2m	19.5m	24.8m
$\alpha=3.0$	2.4m	5.9m	9.4m	12.9m	16.5m

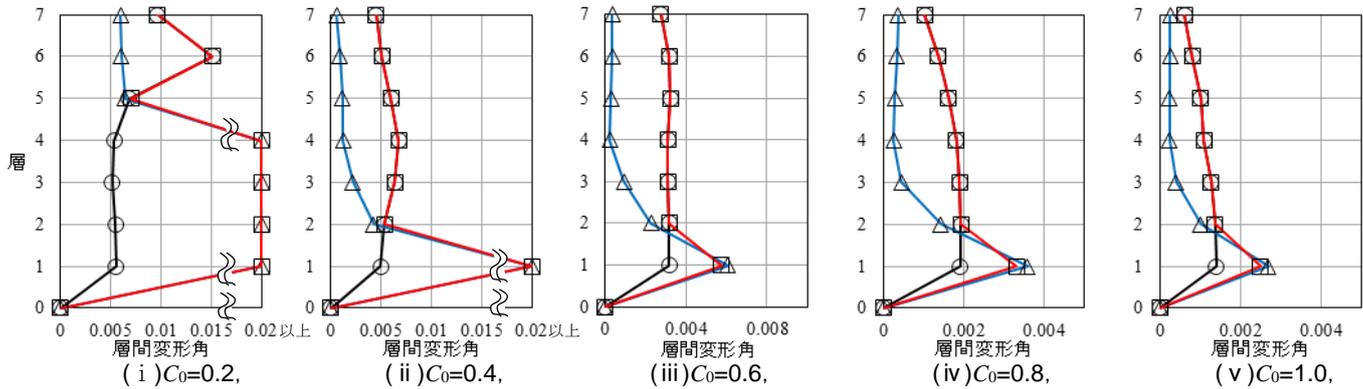
—○—地震動 —△—津波 —□—地震動・津波複合



(a) サージフロント波圧作用時間 0.1 秒



(b) サージフロント波圧作用時間 0.5 秒



(c) サージフロント波圧作用時間 1.0 秒

図-8 各解析ケースでの最大層間変形角

5. 地震動・津波複合外力における地震力の影響の検討

図-8に地震動・津波複合外力による最大層間変形角を地震動応答解析のみ、および津波外力応答解析のみの結果と合わせて示す。紙面の都合上特定の解析結果のみ

示すものとし、ここでの解析条件は津波浸水深 $h=10\text{m}$ 、サージフロント波圧作用時間 0.1 秒、0.5 秒、1.0 秒、持続波圧作用時間 20 秒、水深係数 $\alpha=1.0$ となっている。図-8より、標準せん断力係数 $C_0=0.2$ の場合のみ 2 層以上

の最大応答層間変形角で地震動単独よりも津波波力単独の方が上回るケースも見られたが、その他の場合では地震動単独による最大層間変形角を津波波力単独で上回ったのは1層のみである。

そこで、津波波力単独による最大層間変形角と地震動・津波複合外力による1層の最大層間変形角とを比べると、サージフロント波圧作用時間0.1秒の場合では複合外力による最大層間変形角の方がわずかに大きく、作用時間1.0秒の場合では津波波力単独による最大層間変形角がわずかに複合外力による最大層間変形角を上回る結果となった。作用時間0.5秒の場合では、標準せん断力係数 $C_0=0.6$ のときは津波波力単独による応答が複合外力による応答を上回り、標準せん断力係数 $C_0=0.8$ および 1.0 のときは複合外力による応答が津波波力のみによる応答を上回った。

地震力の有無が津波波力による応答に与える影響を見てみると、地震力を経験することで津波波力による応答が低減する場合と増大する場合がある。そこで、津波波力のみによる最大層間変形角を R_S 、複合外力による最大層間変形角を R_C として、2つの変形角の比 R_C/R_S とサージフロント波圧作用時間との関係を図-9に示す。ただし、図-9は津波波力による応答が大きい1層について $C_0=0.6, 0.8, 1.0$ の結果を示している。

図-9より、サージフロント波圧作用時間が長くなるにつれ津波波力による応答が低減する大まかな傾向が見られ、サージフロント波圧作用時間が0.3秒以上では(2つのケースを除き)津波波力のみによる最大層間変形角 R_S に対する複合外力による最大層間変形角 R_C の比 R_C/R_S が1.0を下回っている。この傾向から外れている2ケース(サージフロント波圧作用時間0.5秒、標準せん断力係数 $C_0=0.8$ および 1.0)について以下に考察する。

標準せん断力係数が $C_0=0.8, 1.0$ の建物一次固有周期はそれぞれ0.30秒、0.27秒である。本論文で用いた地震動によって建物一次固有周期はそれぞれ0.47秒、0.38秒に長周期化する。サージフロント波圧の時刻歴モデルにおいて、応答に影響を与えると考えられるサージフロント波圧立ち上がり部(半周期分)はサージフロント波圧作用時間のちょうど半分(例えばサージフロント波圧作用時間を0.5秒とした場合0.25秒)で設定しているので、サージフロント波圧は波圧作用時間と同じ周期をもつパルス波のようなものと考えることができる。 $C_0=0.8$ および 1.0 の建築構造物において、津波波力のみによる最大層間変形角 R_S はサージフロント波圧作用時間が0.3秒のときに大きめの値を示す一方、複合外力による最大層間変形角 R_C はサージフロント波圧作用時間がそれぞれ0.5秒のときに大きめの値を示すため、これらの比を取った図-9の R_C/R_S は、作用時間0.3秒周辺に一つの

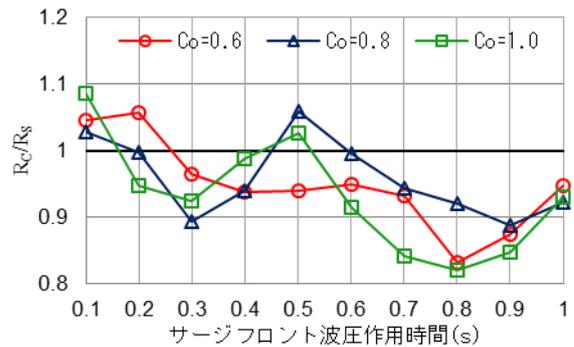


図-9 層間変形角比 R_C/R_S と波圧作用時間との関係

谷が現れ、作用時間0.5秒周辺に一つの山が現れたのではないかと考察される。ただし本考察においては、慣性力として作用する地震動と異なり、浸水した特定階にのみ作用する津波外力についても、地震動と同じように共振応答を示し得るのか検証する必要がある。

6. まとめ

本論文では、津波波圧の時刻歴を仮定し津波応答解析及び地震動・津波複合応答解析を行い動的解析による耐津波性能評価、地震動が耐津波性能に与える影響について検討した。本研究で得られた主要な結論を以下にまとめる。

- 1) 津波外力時刻歴を線形(5折れ線)モデル化した。モデル化した津波外力(波圧)の最大値が等しい場合でも、サージフロント波圧の作用時間長さによって建物への応答は異なる。一方、持続波圧の作用時間長さによる建物応答への影響は見られない。
- 2) 多質点せん断バネモデルに、地震動単独、津波外力単独、地震動・津波複合外力をそれぞれ作用させた結果、地震力を経験することで津波波力による応答が低減する場合と増大する場合があり、特にサージフロント波圧作用時間が長くなるにつれ津波波力による応答が低減する大まかな傾向が見られた。

今後の課題として、慣性力とは異なり特定の階にのみ作用する津波外力についても、地震動と同じような共振を系として示し得るのか検証する必要がある。

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解説, 国土技術政策総合研究資料 No.673, 2012.3
- 2) 松富英夫: 砕波段波衝突時の圧力分布と全波力, 海岸工学論文集第38巻, pp.626-630, 1991
- 3) 飯塚秀則, 松富英夫: 津波氾濫流の被害想定, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.381-385, 2000
- 4) 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「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), 2011.10
- 5) 鈴木隆雄, 高橋典之: 目標性能を考慮するRC造建築物の耐・対津波設計法に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1-6, 2014