

遡上津波力による構造物の変形・破壊挙動の検討

Research on Destruction and Deformation of Structures due to Surge Front Tsunami

有川太郎¹・中野史丈²・大坪大輔³・下迫健一郎⁴・石川信隆⁵

Taro ARIKAWA, Fumitake NAKANO, Daisuke OHTSUBO
Kenichiro SHIMOSAKO and Nobutaka ISHIKAWA

This report investigates the relationship between the destruction of structures and surge front tsunami force. Many houses were destroyed by large tsunamis, so it is necessary to investigate what kind of power acted and how houses broke. For this purpose, large model tests with concrete boards and a framework structure were conducted. A concrete board with 100mm thickness was not damaged, but a concrete board with 60mm thickness was destroyed due to impulsive bore load of the surge front tsunami with 1.8m inundated depth. A framework structure made of steel was deformed due to the impulsive bore load. Therefore, it is necessary to consider not only the sustainable load but also the impulsive load of the tsunami according to the structure.

1. はじめに

遡上津波力に関する研究は、松富 (1991)、朝倉ら (2000) など数多く行われ、そのメカニズムや波圧分布が明らかになりつつある。それらの研究のなかで、遡上津波の作用波圧に関する最大値の鉛直分布、または構造物全体に作用する波力などについて、実験式がいくつか提案されている。そのような中、現況の避難ビルの設計指針では、朝倉ら (2000) の鉛直波圧分布を採用した設計方法を提案した。

しかし、陸上の建物は、土木構造物と異なり居住等のための空間を有することが多く、壁面の厚さ・柱の太さ・結合方法などの建築構造の違いや、遡上津波力の作用時間、立ち上がり速度など遡上津波の特性の違いにより、変形応答が異なることが予想される。

松富・首藤 (1994) は、現地調査データに基づき、家屋造別に浸水深と被害程度の関係性を明らかにしている。さらに最近の津波力と構造物の被災状況をまとめた例としては、中埜 (2005) がスマトラ沖地震津波による構造物の観点からのまとめを詳しく行っている。

しかし、様々な建築物に対して将来的に耐津波照査を行うためには、より定量的な評価手法の構築が必要となる。そこで、本研究では、構造体の違いによる変形・破壊挙動の違いを検討するため、コンクリート版、および骨組み模型を用い大規模実験を行い、それをとりまとめた。

2. 津波力の特徴

(1) 津波波圧の定義

津波波圧は、まず津波先端部が段波状に來襲する場合に生じる段波波圧、次に、定常流のようになった津波本体部の作用時に生じる重複波圧となる (有川ら, 2006)。それぞれの最大値を衝撃段波波圧、最大重複波圧と呼ぶ。また、陸上など、水が存在しないところに作用した力をサージフロント波圧と区別する場合もある (松富, 1991)。

(2) 津波力の特徴

津波力は、津波の浸水深と浸水流速、そして波面の形により、同じ津波高さであっても異なり、そのタイプを定性的に分類すると図-1 のようになる。ここでは、仮に越流タイプ、段波タイプ、砕波タイプと定義する。越流タイプと段波タイプの違いは浸水速度であり、段波タイプでは重複波圧が生じるまに、強い段波波圧が生じることがわかっている (有川ら, 2006)。砕波タイプに関しては、起こりにくいタイプではあるものの、急勾配になっているところなどでは起きやすいと考えられ、実際に生じていたという住民証言もある。

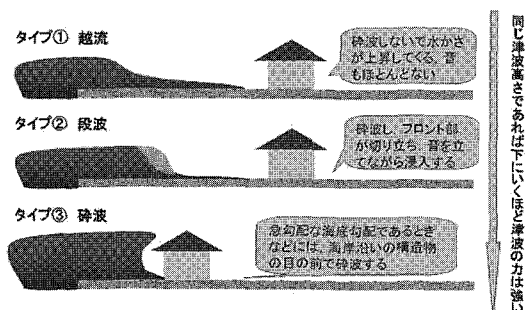


図-1 津波力のタイプ

1 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 主任研究官
2 (独法)港湾空港技術研究所 耐波研究室
3 シバタ工業(株)
4 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所耐波研究室長
5 正会員 博(工) 防衛大学 名誉教授

3. 構造物の津波による破壊・変形実験

(1) 実験水槽

1/10 勾配から続く陸上部先端に鋼製架台を設け、前面にコンクリート版を設置した (図-2)。

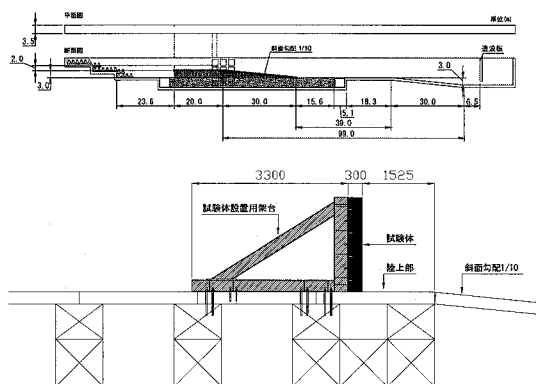


図-2 実験断面 (上: 断面図, 下: 架台の図)

(2) コンクリート版

a) 実験模型および計測器

図-3 に供試体の図面を示す。A タイプは、4 辺を 30 cm の枠で囲み、中央の版が 4 辺固定となるようにしたものであり、B タイプは、2 辺を 30 cm の柱とし、中央の版が 2 辺固定となるようにしたものである。全供試体の仕様を表-1 にまとめる。鉄筋が入っているものはどれも単鉄筋とした。また、コンクリート版の設計圧縮強度はすべて 18 kN/mm^2 とした。

表-1 コンクリート版の仕様

ケース	Type	厚さ (cm)	鉄筋	作用回数
1	A	7.5	10 mm 単鉄筋	10 回
2	A	10	10 mm 単鉄筋	8 回
3	A	12.5	10 mm 単鉄筋	3 回
4	A	12.5	無筋	3 回
5	B	6	6 mm 単鉄筋	1 回
6	B	10	無筋	1 回

図-3 には、計測器の位置も示しており、図中の P は圧力計、G はひずみ計をそれぞれ表している。歪み計は、コンクリートの正面、背面、鉄筋の表裏にそれぞれ 11 個取り付けた (偶数が表、奇数が裏)。コンクリート表面ならびに背面に取り付けた歪み計の番号と鉄筋に取り付けた歪み計の番号は同じとする。定格容量 200 kN/m^2 の圧力計、2 mm の鉄筋歪み計、120 mm のコンクリート歪み計を、それぞれ、2 kHz で測定した。また

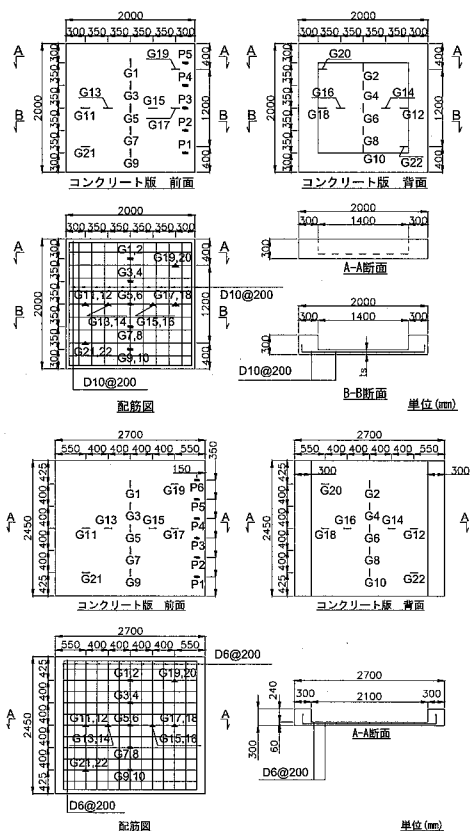


図-3 コンクリート版模型図面 (上: A, 下: B)

ノイズ除去のため、歪みに対しては 100 Hz のローパスフィルタをかけた。作用津波は有川ら (2006) に示す入射津波高 2.5 m のものを用いた。

b) 作用波圧

図-4 は、構造物を設置したときのケース 1 における P1 と P2 の圧力である。また、図-5 は、10 回作用させたときの衝撃段波波圧および最大重複波圧の平均値である。これを見ると、おおよそ三角形分布していることがわかる。最大重複波圧のほうは、構造物の高さが 2.0 m であるので、その高さまで作用しているが、最大値は静水圧の 1.5 倍程度になっていることがわかる。

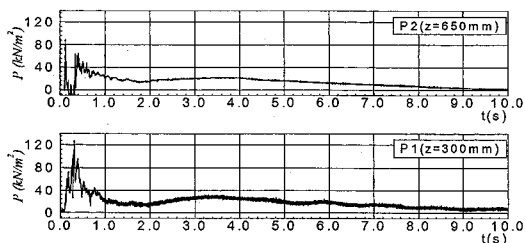


図-4 P1 と P2 の圧力計の時系列

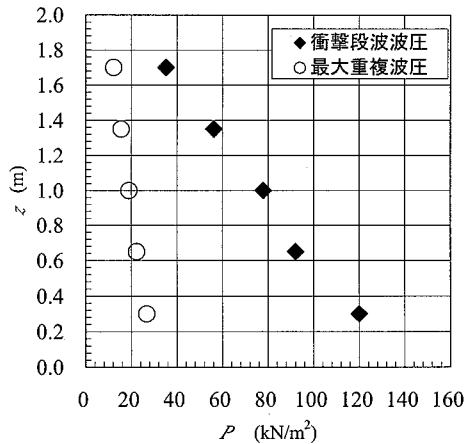


図-5 衝撃段波波圧と最大重複波圧

c) 実験の様子

写真-1 にケース 3 における実験の様子を示す。造波板から発達した波が、コンクリート版に強く衝突していることがわかる。

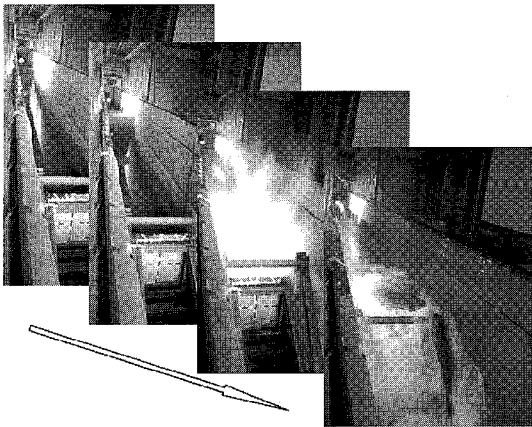


写真-1 実験の様子 (ケース 3)

d) 破壊変形の様子

ケース 1～4 を比較すると、7.5 cm の版厚のときにヒビが入ったものの (写真-2)、その他のケース 2～3 では、コンクリート表面には変化はなかった。

次に 2 辺固定のケース 5, 6 を比較する。版厚 100 mm のケースに関しては、コンクリート版にヒビ等は見あたらなかったが、ケース 5 の版厚 60 mm のケースに関しては、1 回目の波の作用で破壊された。半分より下部に破壊が生じ、写真-3 のようになった。中心から円形にヒビが入り、その穴の部分はバラバラに壊された。また、柱部分でクラックは止まり、柱までは、破壊されなかった。

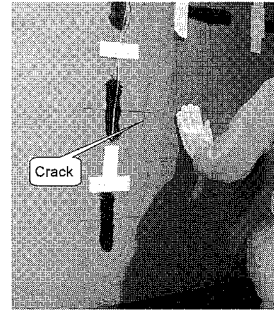
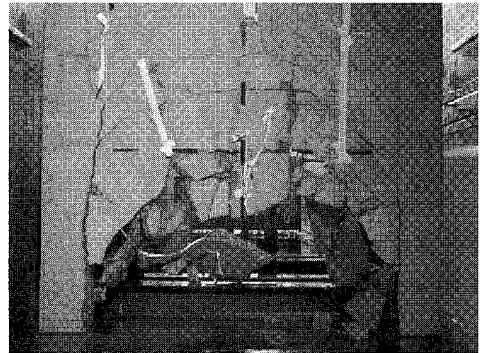
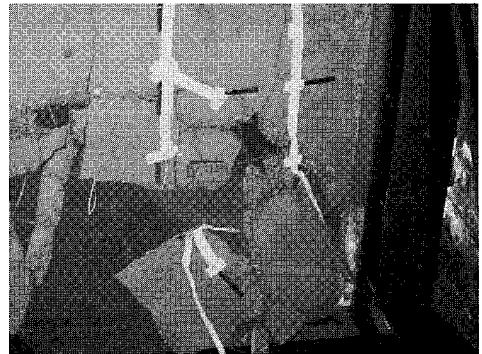


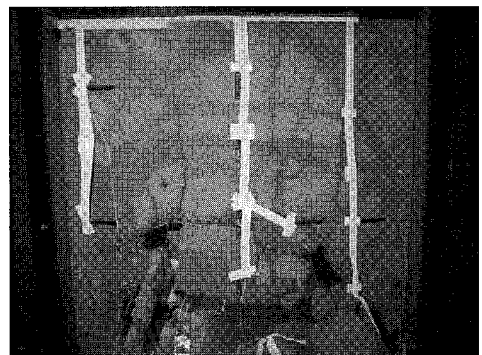
写真-2 ケース 1 の実験後に入ったヒビ



(a) 表面から見た様子(全体)



(b) 表面から見た様子(詳細)



(c) 裏面から見た様子

写真-3 ケース 5 で破壊されたコンクリート板

e) 破壊と歪みの関係

ケース2の100mmの版厚に作用させたときの表側に貼り付けた鉄筋ひずみ1, 3, 5, 7ならびに9番の時系列波形と同時に測定した波圧の時系列波形を比較したものを図-6に示す。ひずみ3番, 5番, 7番が大きくなっていることがわかる。ここでは, ローパスフィルタが作用しているものの, 衝撃的な力が作用している部分(0~0.5s)においては, ひずみが反応しておらず, この構造物のときには, 衝撃的な部分は, 構造物の破壊・変形には寄与しなかったことがわかる。ゆっくりと揺れているように見えるものは, 架台を含めた固有振動ではないかと考えている。

一方で, 破壊されたケース5におけるコンクリート表面に取り付けたひずみの時系列と同時に測定した波圧の時系列波形を比較したものを図-7に示す。測定がとぎれた瞬間に破壊したものと考えられるため, 破壊が始まったのはおよそ0.2s程度からであり, 衝撃段波力による破壊がなされたことがわかる。

ケース1, 2, 5の版についての固有周期を求めたところ, 表-2のようになった。よって, 動的応答に影響があらわれるような大きさではないために, これらの違いは, コンクリートの版厚, 固定方法(2辺固定・4辺固定)の違いから生じた強度の差から生じたものであると考えられる。

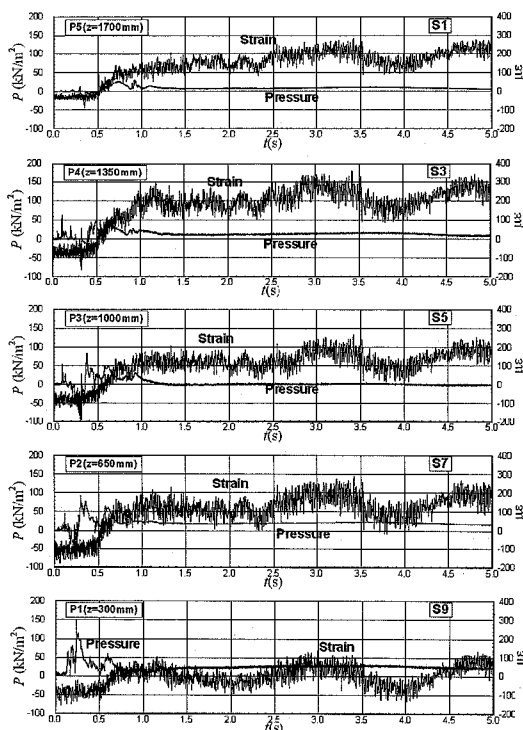


図-6 歪みと波圧の結果 (ケース2)

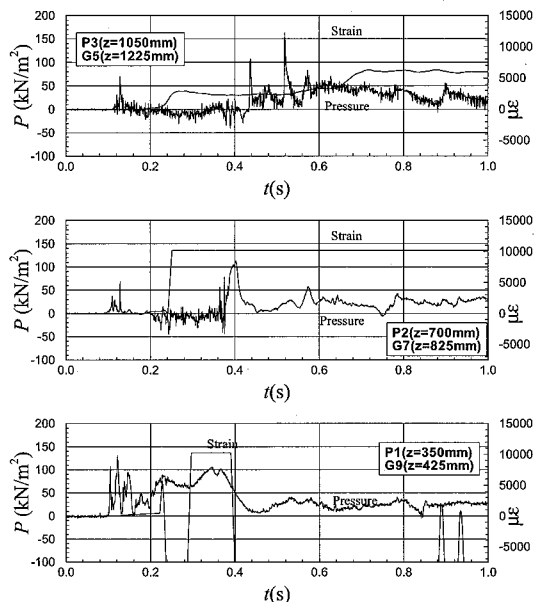


図-7 歪みと波圧の結果 (ケース5)

表-2 各ケースの固有周期(単位 s)

ケース名	case1	case2	case5
版 厚	75mm	100mm	60mm
固 定 辺	4	4	2
モード1	0.005737	0.004557	0.024276
モード2	0.002888	0.002337	0.021004
モード3	0.002887	0.002335	0.014069

(3) 骨組み構造模型

構造物としての応答がどのようなかを検討するために, 骨組み鉄骨模型について実験を行った。

a) 実験模型および計測機器

水路断面は, 図-2上図と同じ1/10勾配の斜面から陸上部を設けた。斜面先端から6.0m離れた位置に7.5cmの鋼製角材により高さ1.6m, 幅1.6m, 奥行き1.6mの大きさの骨組構造とし, 各柱梁の間には厚さ6mmの鉄板の壁面を取り付けた。波圧計は定格容量20kN/m²のものをP1, P2, P5~P8番の位置に取り付け, 定格容量100kN/m²のものをP3, P4の位置に取り付けた。これは事前に作用させP3, P4の位置に大きな波力が作用することがわかっていたため対応したものである。

ひずみ計は, 7.5cmの角材の壁面から見て裏側に2mmのゲージを角材の方向と同じ方向に取り付けた。また, 表面だけでなく, 裏面, 側面にも角材の方向と同じ方向に取り付けた(図-8)。測定は100Hzのローパスフィルタを用いて, 2kHzで取得した。

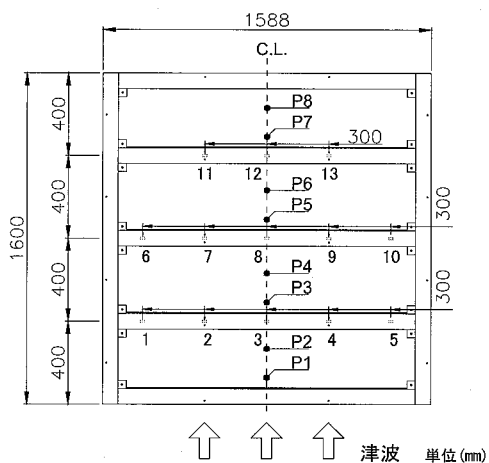


図-8 ひずみゲージの取り付け位置

b) 作用させた津波波圧

作用津波波圧は、構造物の無い状態での津波の状況として、浸水深52cm、浸水流速2.5m/sのものであり、Froude数は1.1程度であるが、構造物前面で碎波しているために、衝撃としては非常に大きな力を持つものである。全部で10回実験を行い、そのときの衝撃段波圧および最大重複波圧の平均の分布を図-9に示す。

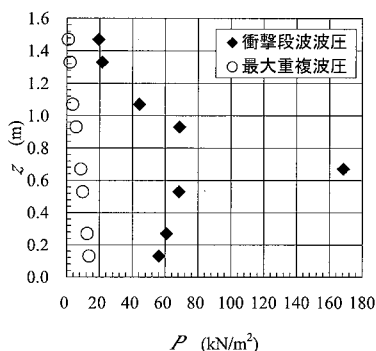


図-9 作用させた津波波圧の最大値の鉛直分布

c) 実験の様子

写真-4に実験の様子を示す。このときには碎波タイプの津波が作用し、大きなしぶきが上がり、非常に強い力が衝撃的に作用していることがわかる。

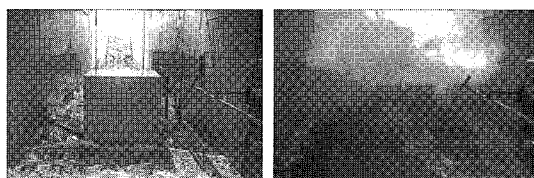


写真-4 実験の様子（左：津波作用前、右：津波作用後）

d) ひずみと波圧の関係

波圧計P4番と正面ひずみ8番の時系列の一例を図-10に示す。この図から衝撃的な波圧にตอบสนองした変形をしていることがわかる。

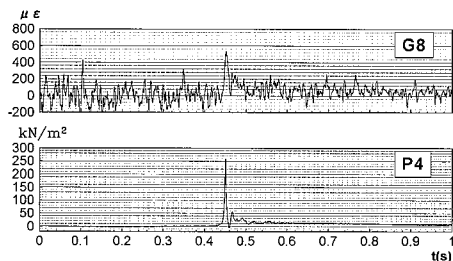


図-10 ひずみ8番と波圧4番の時系列波形

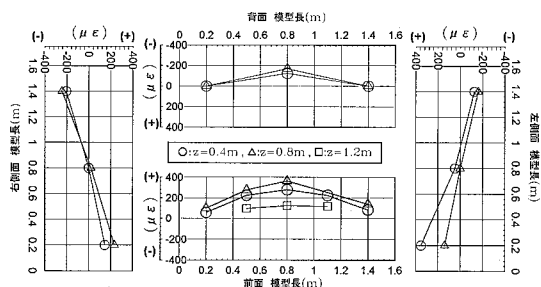


図-11 ひずみの最大値（10回の平均値）

4. ま と め

津波力による構造物の破壊・変形に関する大規模な実験を行った。その結果、コンクリート版が衝撃的な津波力でも十分に破壊することがわかり、さらに、構造物によっては、衝撃的な津波力にตอบสนองした変形が生じることがわかった。

参 考 文 献

- 朝倉良介・岩瀬浩二・池谷 毅・高尾 誠・金戸俊道・藤井直樹・大森政則(2000)：護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第47巻，pp. 911-915.
- 有川太郎・大坪大輔・中野史丈・下迫健一郎・高橋重雄・今村文彦・松富英夫(2006)：遡上津波力に関する大規模実験，海岸工学論文集，第53巻，pp. 796-800
- 松富英夫(1991)：碎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
- 松富英夫・首藤伸夫(1994)：津波の浸水深，流速と家屋被害，海岸工学論文集，第41巻，pp. 246-250
- 中埜良昭(2005)：2004年12月26日スマトラ島沖地震による津波被害を受けた構造物の調査報告（オンライン），<http://sismo.iis.u-tokyo.ac.jp/Research.files/topic4.files/topic4-007.html>