

津波力による壁・柱部材の変形・破壊に関する大規模実験

Behaviors of Concrete Wall under the Impulsive Tsunami Force

有川太郎¹・中野史丈²・下迫健一郎³・山野貴司⁴

Taro ARIKAWA, Fumitake NAKANO, Kenichiro SHIMOSAKO and Takashi Yamano

Indian Ocean Tsunami 2004 made us to recognize of the power of the huge tsunami. To clarify the mechanism of failure due to tsunami and to make the assessment tool are important not only for the forecast of damage but also for the evaluation of evacuation towers. If the large tsunami occurs, large impulsive bore force may attack on the land structure near the coastline. But, the behavior of structures against such power is still unsolved. In this report, the physical model tests are conducted to clarify the mechanism of failure of concrete wall due to the impulsive tsunami power. Several types of concrete walls and brick typ. walls with column are tested. From the results, the failure mode of walls against the impulsive tsunami power was clarified qualitatively.

1. はじめに

津波力により陸域にある構造物、建築物が変形・破壊するメカニズムを解明することは、巨大津波の被害予測だけでなく、避難場所の指定などに対しても重要な課題である。現実的には、津波を認識してから避難する人が多いため、より近くに多くの避難場所が確保できることが望ましい。そのためには、精度の高い耐津波評価手法の構築が必須であり、津波力の予測精度の向上ならびに構造物の破壊メカニズムの解明が急務である。一方で、数値計算による津波波力を計算することも可能となりつつある。そのようななか、海岸線に近いところでは、大きな衝撃段波波力が作用する可能性があり、それに対して、構造物がどのような挙動を示すかということは未だ未解明である。そこで、本研究では、実スケールの大規模実験による衝撃段波波力による壁・柱部材の変形・破壊に関する検討を行った。

2. 背景および実験概要

(1) 背景

写真-1は、辰巳ら(2007)が、2006年に生じたジャワ島地震津波を調査した際に撮影したものであり、海岸線に近いところにある家屋の壁面が、遡上した津波(浸水深1m程度)により、点線の部分の壁面が一部破壊されたものである。壁面厚さなど正確なものは不明であるが、10cm程度はあるように見える、1m程度ではあるものの、射流状態であったと推測されているため、外力は衝撃段波津波波力を伴ったものとなっていることが予想される。

しかし、衝撃段波津波波圧と構造物の破壊過程についての関係は、現在までのところ推測する手法は確立されていない。その理由の一つには、基礎実験の蓄積不足であると思われる。そこで、本研究では、そのような知見の蓄積のため、基礎的な実験を行うものとする。



写真-1 津波で被災した海岸近くの家屋

(2) 実験概要

コンクリート壁面の強度・壁厚を変えた実験を行い、外力と破壊過程について考察することが本実験の主目的となる。また、日本では少なくなったものの、東南アジアなどの地区では、よく用いられる煉瓦壁についても比較のため実験を行うこととした。さらに、柱についても、壁面との破壊過程の違いを比較するために実験を行った。

実験は、長さ184m、幅3.5m、最大深さ12m、造波版最大ストローク14を有する大規模波動地盤総合水路で行った。海底断面、模型設置断面および津波条件は有川ら(2007)と同様とした。すべて、入射津波高は2.5mであり、衝撃段波津波波力を伴った外力を作用させている。

1 正 会 員 博(工)(独)港湾空港技術研究所
2 九州地方整備局別府港湾・空港整備事務所
3 正 会 員 博(工)関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所
4 修(工)東洋建設株式会社

3. コンクリート壁に対する検討

(1) 模型条件

図-1にコンクリート壁面模型図面を示す。横幅2.7m、高さ2.45mであり、両端の30cm角の柱と一体となった壁面である。よって、壁面部分は幅が2.1mとなっている。柱部の背後は固定し、模型上端は自由端となっている。下端も固定していないが床と接触している。コンクリート用の歪みゲージを前面および背面に11枚 (C1~C22) 貼り付けた。図に方向を示している。また、壁厚方向の中央部に6mmの鉄筋を20cm間隔で入れている。縦横に単鉄筋とし、コンクリートの前面・背面と同じ位置に同じ枚数、同じ方向の歪みゲージを鉄筋の表と裏に貼り付けた (S1~S22)。壁厚およびコンクリート強度については、表-1に示す通りであり、全部で8ケース、9枚とした。なお、圧縮強度に*を付けているものは、早強コンクリートで作成し、圧縮強度試験により試験した強度を入れている、印の無いものは普通コンクリートで作成し、圧縮強度試験が行えなかったため、設計強度を示す。

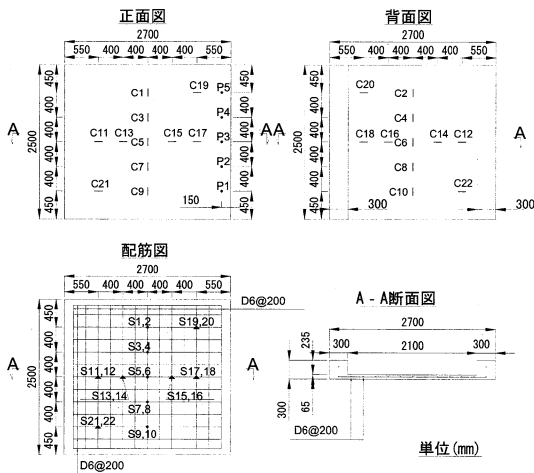


図-1 コンクリート壁面模型

表-1 コンクリート壁面の壁厚および強度

ケース名	壁厚 (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	枚数
1	60	21	2
2	60	33	1
3	75	21	1
4	75	33	1
5	80	32.7*	1
6	90	32.7*	1
7	100	21	1
8	100	32.7*	1

(2) 破壊過程の違い

a) ほぼ同一の壁面 (ケース1)

写真-2は、ほぼ同様と考えられる壁に対して、津波作用後の様子を正面から比較したものである。壁面の半分以上より上部での細かいひび割れの大きさ、柱部と壁部の境界部での破壊の高さに違いはある。これは、1枚目は作成されてから、材齢日数が規定よりもかなり超過していたため、2枚目よりは若干強度が増していたためであると考えられる。全体としては、押抜きせん断破壊で壁面の半分程度のところまで破壊されていることがわかり、破壊の形態は、同じであることが認められる。



写真-2 破壊後の様子(正面, ケース1, 上1枚目, 下2枚目)

b) 壁厚の違い

壁面の固さがほぼ同様のときに、壁厚の違いによってどのように破壊形態が異なるかを、ケース2, 4, 5, 6, 8と比較する。まず、60mm(ケース2)と75mm(ケース4)を比較する。写真-3はそれぞれ津波破壊後を正面から見たものである。似た破壊形態に見えるが、60mmの厚さの版の方が75mmに比べて破壊範囲がほぼ同じか小さいように見える。ところが、背面からの高速カメラの映像を見ると、その破壊過程の違いを見て取ることができる。まず、60mmおよび75mmに作用したP1~P3における波圧の全体を図-2, 図-3に示す。また、P1のみ拡大したものを図-4に示す。P3には衝撃波圧がほとんど作用しておらず、衝撃波圧が作用して約1.5s後にすべての点で同時に最大重複波圧が作用していることがわかる。

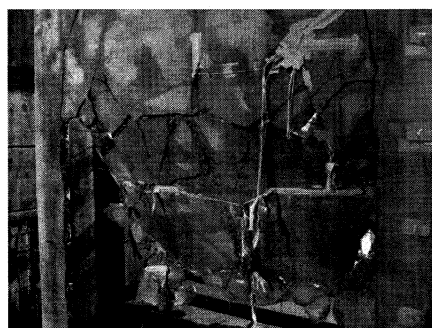
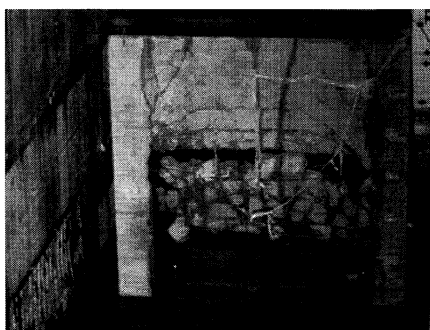


写真-3 P1～P3に作用する波圧の全体(ケース4)

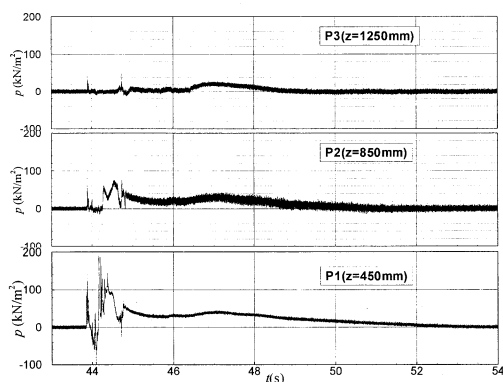


図-2 P1～P3に作用する波圧の全体(ケース2)

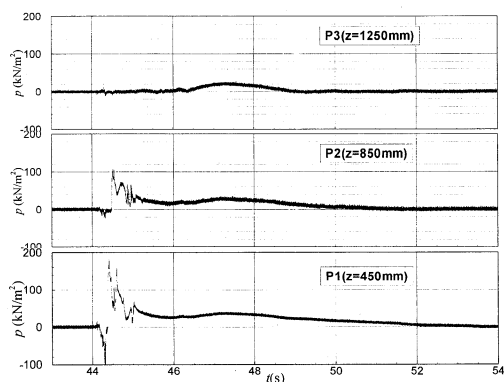


図-3 P1～P3に作用する波圧の全体(ケース4)

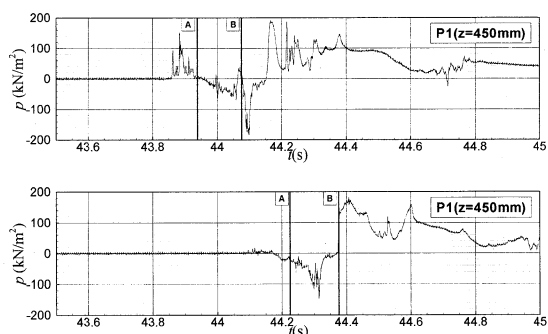


図-4 P1に作用する波圧の詳細(ケース2および4)

図-4におけるそれぞれのケースでのA点、B点の時刻における背面から撮影した秒速1000コマの高速カメラの写真を、それぞれ写真-4、写真-5に示す。それぞれA点においては壁面全体に曲げヒビが入り、それでは破壊せずにB点で壁の横方向に対して入ったヒビによって、壁がせん断破壊を生じる。これを見るとわかるように、75 mmの壁面は、60mmの壁面よりも耐力が大きいため、より大きな波力に対して持つ。よって、より上部まで波力が作用した時点で破壊したため、結果として、大きく破壊することになったことがわかる。また、P3より上部に対して衝撃的な波力が作用しなかったのは、下部が両方とも破壊され力が逃げたためと推測される。

写真-6から写真-8に80mm, 90mm, 100mmの壁厚(ケー

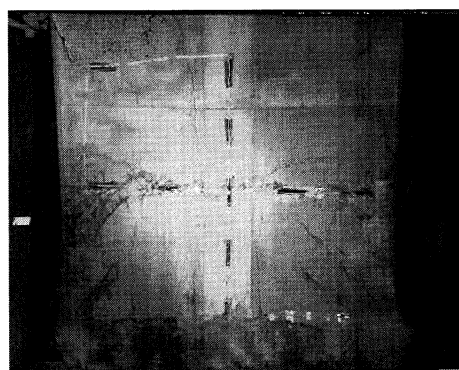
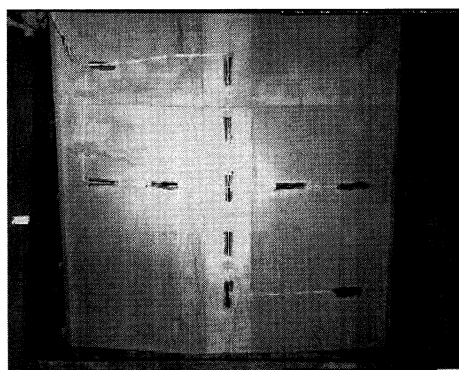


写真-4 背面よりみた破壊の様子(ケース2, 上: A, 下: B)

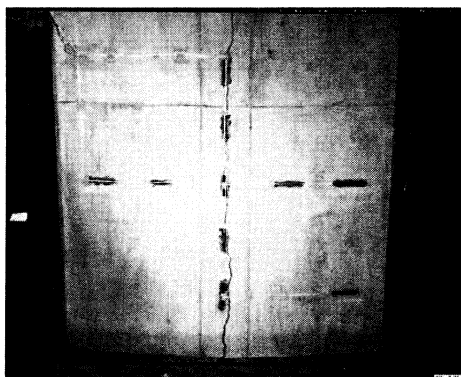


写真-5 背面よりみた破壊の様子(ケース4, 上:A, 下:B)

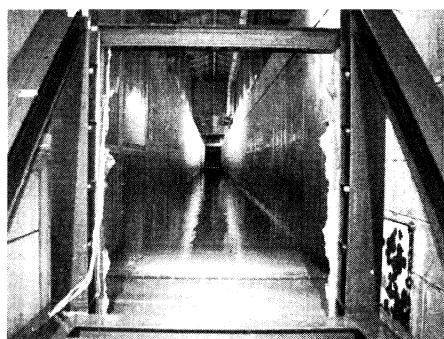


写真-7 背面よりみた津波作用後の様子(ケース6)

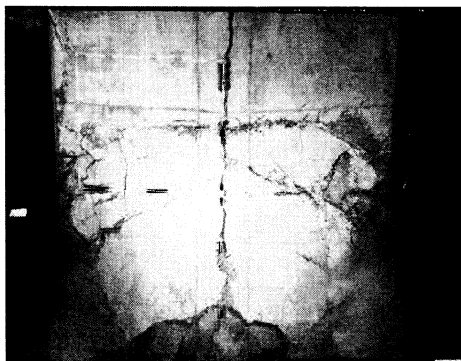


写真-8 背面よりみた津波作用後の様子(ケース8)

ス5, 6, 8)のケースにおける, 津波作用後の背面から撮影したものを示す. ケース5とケース4を比べると, 全体の曲げヒビにより下端部が弱くなり, 上部は耐力的に持ったものの下部が破壊した. ケース8は, ヒビが全体的に入り, 柱部と壁体部の境での破壊も見られたが, 全体が流れるには至らなかった. ケース6では, ケース7と同じく衝撃に対して, 全体的にヒビが入り, その後の波力により柱部と境から全て破壊され, さらに壁体部すべてが流されたため, あとには何も残らなかった. ケース5, 6, 8においては柱部に大きなヒビが入った. これは壁体部の耐力が上がったためと考えられる.

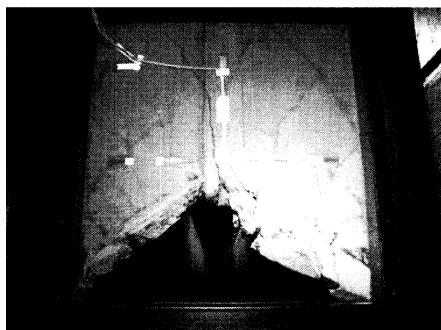


写真-6 背面よりみた津波作用後の様子(ケース5)

c) 壁面強度による違い

ケース1とケース2を比較すると, 破壊形状の違いはあるものの, 破壊過程に大きな違いはなかった. また, ケース3は, ケース1と似た破壊形状であった. ケース7とケース8には, 大きな差はないが, 柱部と壁体部との境の破壊はケース8の方が大きかった. これは, 壁体部がケース7の方が弱いいため, より大きくヒビが入り, 波力が逃げたためでと考えられる.

(3) 破壊過程に関する考察

これまでの結果より壁体の強度に応じた破壊形態(過程)の違いについて考察する.

図-5は, 今回の結果から, 壁体の強度と衝撃段波津波波圧を伴った津波外力による破壊形態との関係を図示したものである. 図中aからfの順で壁体の強度が強くなっていくことを示し, またグレーで色を付けた部分は破壊され, 流出したことを示す. 衝撃段波津波力の最初の威力により, aのように弱い壁体では, 全体曲げ破壊を生じさせる. 次に, その時点で全体曲げ破壊が生じなければ, b, cのように, 下部に大きな衝撃力が働き破壊する. さらに耐力が強くなると, dのように下部の壊れる範囲が小さくなり, さらに耐力が増すと, 衝撃段波津波力では破壊・流出に至らなくなる. そうすると, 外力を逃がさなくなるので, 壁体部と柱部の接合部がその力を負担するため, 壁全体が流出する(e). 結果として, aとeは,

似たような痕跡となって現れる。そして、それよりも強いとfのように壁全体にヒビが入るものの、壁体と柱部の耐力が増し、持ちこたえる一方で、柱部は、より多くの負担がかかるようになり、致命的なヒビが入るようになる。これが、陸上部に遡上したボア状の津波による壁体の破壊モードの違いである。

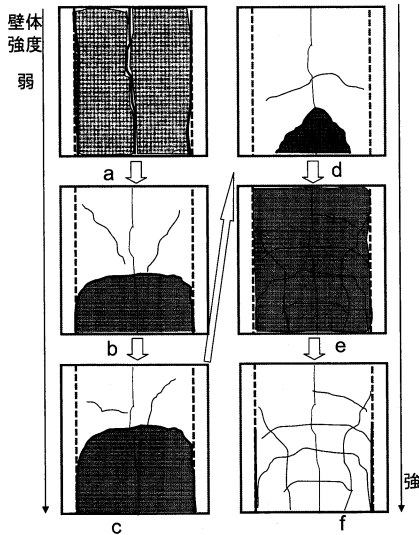


図-5 壁体強度と津波外力による破壊の形態の関係

(4) 衝撃段波津波力と歪みとの関係

もっとも破壊が少なかったケース5における同じ高さの波圧(P3)と鉄筋の歪み(S15~18)との関係を図-6に示す。

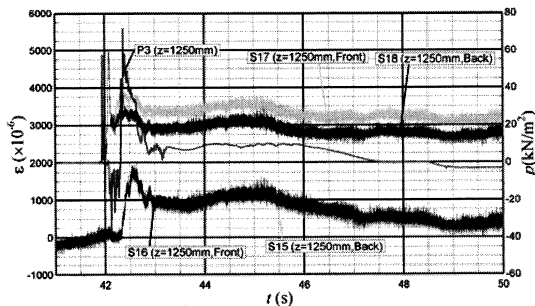


図-6 波圧と鉄筋歪みの関係(ケース5)

す。

これを見ると、最大重複波圧が作用している付近での最大歪みと衝撃段波津波波圧が作用している付近での最大歪みの関係は比例関係にない。S15(16), S17(18)ともに、最大歪み比はSB:SC=1.5:1程度であるが、最大波圧比はPB:PC=7:1程度である。これは、衝撃力のエネルギーが小さいためと考えられる。これより、静的な作用に比べて、衝撃的な作用の場合、歪みに及ぼす効果は約0.214(=1.5/7)倍となる。全ての条件に適用できるとは思えないが、衝撃的な作用力に対する構造物の応答の一つの目安にはなると考える。今後、FEM解析

等により荷重と変形との関係を定量的に明らかにする。

4. 煉瓦壁に対する検討

(1) 模型条件

1つ6cm×10cm×21cmの煉瓦を1段の小口積みし、コンクリート壁と同様の津波を作用させた。下端および両端は固定した。また6cm×10cmの面を作用する方向に向けて積んだケース(壁厚21cm), 6cm×21cm(壁厚10cm), 10cm×21cmの面のケース(壁厚6cm)の3種類の壁面を作成した。煉瓦と煉瓦は漆喰で接着した。付着強度などは紙面の都合から別報告するものとし、ここでは、コンクリート壁面との破壊過程の違いを検討する。

(2) 破壊過程

壁厚が21cmのケースでは破壊に至らなかった。壁厚10cm, 6cmのケースはそれぞれ、粉々に破壊された。写真-9は、壁厚6cmのときの破壊の様子であるが、衝撃による破壊範囲はコンクリート版と変わらないものの、付



写真-9 背面より見た煉瓦壁の破壊の様子(壁厚6cm)

着している煉瓦同士が離れ、流れに乗って煉瓦が飛散し、10m以上一気に飛ぶものもあった。また一端壊れ始めると支えのない上部もろく破壊された。そのため、最終的には、写真-7のように、支え以外何も無い状態となった。図-5でc→eに移行する形態である。

5. まとめ

衝撃段波津波力による壁体の破壊過程を検討するため、壁厚、強度の異なるコンクリート壁面および煉瓦壁を用いた大規模実験を行った。そして、壁体強度の違いによる破壊過程の違いを定性的に明らかにした。

参考文献

- 有川太郎・中野史文・大坪大輔・下迫健一郎・石川信隆(2007): 遡上津波力による構造物の変形・破壊挙動の検討, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.836-840.
- 辰巳大介・高橋重雄・藤間功司・嶋原良典・松富英夫・幸左賢二・庄司学・村嶋陽一(2007): 2006年ジャワ島津波の被害調査, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.1416-1420.