

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 27 日現在

機関番号：82115

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289192

研究課題名(和文) 構造物の崩壊荷重に基づく津波荷重の評価法に関する研究

研究課題名(英文) A STUDY ON EVALUATION METHOD OF TSUNAMI LOAD BASED ON THE COLLAPSING LOAD OF THE STRUCTURES

研究代表者

壁谷澤 寿一 (Kabeyasawa, Toshikazu)

国土技術政策総合研究所・建築研究部・主任研究官

研究者番号：10533953

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では鉄筋コンクリート造壁状構造物について静的載荷実験および水理実験を実施した。水理実験において高強度試験体では弾性変形が見られた。低強度試験体は引張側鉄筋が伸びて転倒した。標準強度試験体では引張側鉄筋が伸びて降伏し、原位置に復元する応答性状が観察され、構造物の保有耐力と被災に明確な相関関係があることが実験的に検証された。波先端部の衝撃的な荷重に対しては試験体の引張鉄筋の歪は反応しておらず、継続時間の長い後続波に対して大きな歪値が計測された。試験体前面の水位が浸水深3倍に相当する値までは静水圧と波圧積分による転倒モーメントが概ね一致するが、それ以上では転倒モーメントが頭打ちとなった。

研究成果の概要(英文)：The hydraulic test and the static loading test is carried out on the 1/20 scaled reinforced concrete standing wall specimens in order to evaluate the nonlinear response of the structure under the wave load. The different overturning moment strength is given by the position of the tensile rebar, while the specimen has identical shape. The strong specimen shows elastic response, and the weak specimen overturned by the identical tsunami wave load. The standard specimen deformed, but restore its original position after the yielding of the tensile rebar. The impulsive load was observed at the tip of the wave, and it was not effective to the strain of the tensile steel rebar. The overturning moment is consistent with the moment calculated with the hydrostatic wave pressure of water height in front of the specimen at lower water level, but it saturates the constant value when the water height shows three times higher than the inundation depth of wave without the object.

研究分野：鉄筋コンクリート造建築物の構造性能評価

キーワード：津波 鉄筋コンクリート造建築物 水理実験 転倒 浮力

1. 研究開始当初の背景

(1) 東北地方太平洋沖地震では東北地方沿岸部を中心として広範囲に津波が生じ、浸水深の高い地域では市街地であっても 10m を超える浸水深が計測された。この津波は建築物にも甚大な被害をもたらし、鉄筋コンクリート造建築物についても倒壊・転倒・流失といった被害が生じていることが確認されている。国土交通省では建築物の津波被害調査を実施し、津波避難ビルの構造設計法等について、東日本大震災の津波被害に鑑み、妥当性の検証および見直しの必要な項目・内容の検討を行った。その成果は、津波防災地域づくりに関する法律等に基づく告示「津波浸水想定を設定する際に想定した津波に対して安全な構造方法を定める件」に反映されている。

(2) 陸上に遡上する津波の作用波圧については既往の水理実験結果から流勢が大きくなって浸水深の3倍相当の静水圧に留まることが指摘されている。本震災で被災した鉄筋コンクリート造建築物の耐力推定値は計測された最大浸水深の静水圧荷重をいずれも下回っているが、これは実験室で検討されているような津波の流勢に達していなかったためと考えられ、遮蔽物や海岸線からの距離による条件に応じて外力を低減できる条件を提示している。しかしながら、本設計法では設計用浸水深が5mを超えると、大半の小規模な鉄筋コンクリート造ラーメン構造では必要保有水平耐力よりも耐津波設計における要求耐力が大きくなり、地方自治体等では既存建築物の補強や有効活用による津波避難ビルの指定は進められない状況にある。上記の背景から構造設計者からは学術的な見地から構造物の崩壊に有効な設計用津波荷重の明確化が望まれている。

2. 研究の目的

津波現地調査では計測された最大浸水深と被害を受けた構造物の推定耐力との相関について検討しているが、津波作用後の被害結果に関する考察に留まっている。したがって、津波の流勢以外に(1)崩壊メカニズム、(2)崩壊時の流況や波圧分布、(3)浮力・揚力の多寡、(4)開口部の影響、(5)漂流物の衝突や堰止めによる荷重増加等については一定の条件を設けた検証となっており、安全側の評価ではあっても、これらの影響により精緻な検討結果にはなっていない。一方、従来の水理模型実験では荷重計や波圧計による荷重計測が一般的であり、波力によって建築構造物が崩壊する場合の津波荷重についてはほとんど検証されていない。したがって、どの程度の津波荷重と継続時間によって構造物が倒壊に至らしめるのかについて実験的なデータはほとんど得られていないといえる。本研究では鉄筋コンクリート造模型試験体を用いて水理破壊実験および静的載荷実験を実施し、実験および解析に基づいて崩壊する建

築構造物に作用する津波荷重の評価法の精度を水理破壊実験より検証した。

3. 研究の方法

(1) 本研究では3種類合計6体の鉄筋コンクリート造試験体について静的載荷実験および水理実験を実施した。いずれの試験体も高さ700mm、幅800mm、厚さ120mmの壁状構造物である。試験体平面図および立面図を図1および図2に示す。試験体はモルタルおよび極細径鉄筋(φ2)により製作した。実験では津波により転倒崩壊が生ずる鉄筋コンクリート造建築物を模擬しており、試験体は引張鉄筋の降伏により波力および静的外力に対して全体転倒が生じるように計画した。試験体は外周および底面の壁厚は50mmとし、50mm間隔のシングル配筋としている。各試験体は厚さ12mmの鋼板上で打設し、圧縮側6本、引張側2本の縦筋が鋼板に溶接定着されている。3種類の試験体では外形は同一であるが、引張鉄筋の配筋位置のみを変えて、異なる転倒抵抗耐力を与えている。引張鉄筋のコンクリート圧縮縁からの距離は、高強度試験体では110mm、標準強度試験体では60mm、低強度試験体で35mmである。

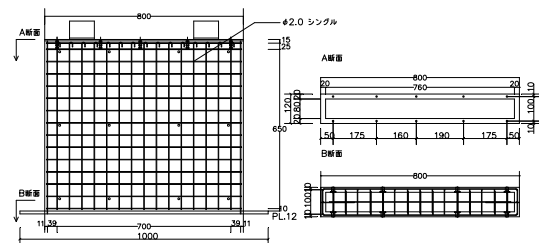


図1 試験体 平面配筋図

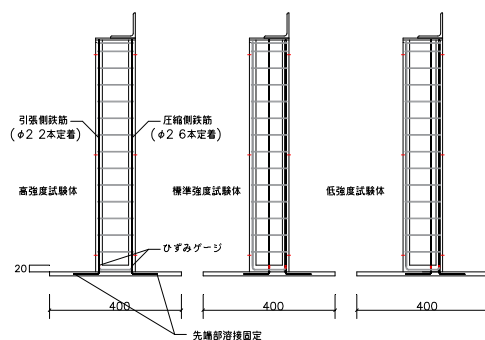


図2 試験体 立面配筋図

(2) 水理実験時には試験体の水平変形は壁体内部の上下端に設置した防水歪型加速度計の計測値を時刻歴積分して算定している。圧縮および引張鉄筋の鉄筋折り曲げ位置においてひずみを計測している。波圧計測位置は最下段を試験体底面から70mmの位置とし、高さ方向に140mm間隔で合計5段配置している。上記の計測装置等を含めた試験体質量は97kgである。試験体前面位置では波高計

および流速計により水位および流速を計測している。一方、静的載荷実験では重量を水理実験時と同一とするためアクリル板を取り付けた状態で実験を実施した。試験体頂部の変形はレーザー変位計により計測した。

(3) 水理実験では試験体設置前に通過波検定試験を行った。水理実験は港湾空港技術研究所が保有する大規模水理模型実験水路で実施した。模型を設置する護岸は防潮堤の無い直立型護岸とし、試験体は護岸から 2.5m 離れた位置に設置している。検定時の最大浸水深は 0.206m、最大流速と最大浸水深に基づくフルード数は 2.13 であり、浸水深に対する津波荷重としては上限を与える流速値となっている。静的載荷実験は東京大学地震研究所の保有する油圧ジャッキ加力装置により行った。静的外力は地震力作用時の試験体等価高さ(試験体高さの 2/3)に与える集中荷重とし、引張鉄筋が破断し、試験体が自重により転倒するまで水平変形を与えた。

(4) 図 3 に水平波力による転倒モーメントと自重および浮力を含んだ転倒抵抗耐力を比較した。通過波浸水深に相当する水位(0.20m)ではいずれの試験体においても津波波力は転倒耐力を超過していない。堰上げを伴う水位が 0.50m を超過すると静水圧が低強度試験体の転倒耐力に達し、試験体高さに達すると静水圧が高強度試験体の転倒耐力に達している。また、既往の研究で津波波力が上限に達すると指摘されている通過波浸水深の 3 倍に相当する静水圧は標準強度試験体の転倒耐力と概ね一致している。

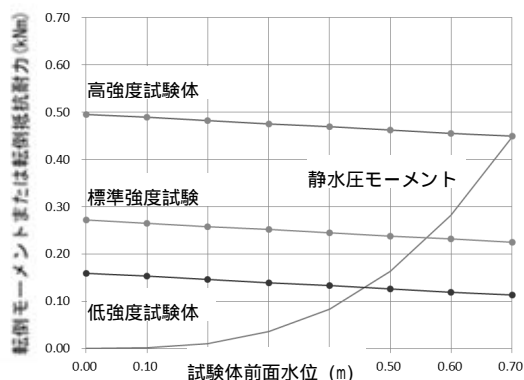


図 3 転倒モーメントと転倒抵抗の比較

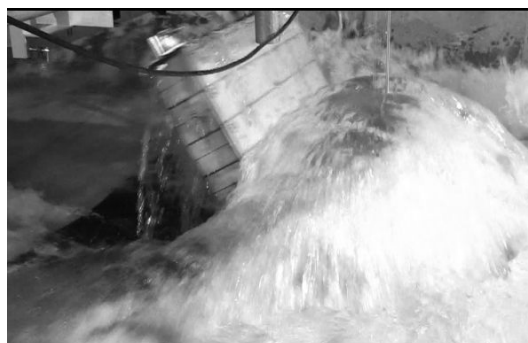
4. 研究成果

(1) いずれの実験においても堰上げにより波は試験体頂部を越流していた。高強度試験体では頂部で微小な変形が瞬間的に生じているが、実験後に試験体基部に残留ひび割れも見られず、試験体底面と鋼板間の不陸に伴う弾性的な回転変形であったと考えられる。一方、低強度試験体では引張側鉄筋が伸びて転倒し、最終的にはすべての鉄筋が破断して元位置から 0.3 m 程度離れた位置で横倒しの状

態となった。標準強度試験体では明らかに引張側鉄筋が伸びて降伏し、試験体頂部に大きな応答変形が観察されたものの、試験体前面の水位の低下に伴って変形前の状態に戻る現象が見られた。上記のように水理実験において試験体はそれぞれの転倒抵抗耐力に応じて、(1)弾性変形、(2)塑性応答後復元、(3)転倒破壊と異なる損傷状況を示しており、構造物の保有耐力と被災に明確な相関関係があることが実験的に検証された。



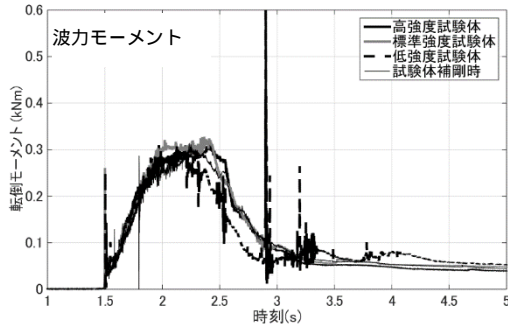
(a) 傾斜した標準試験体



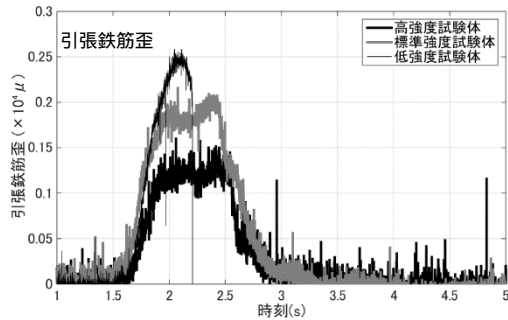
(b) 転倒した低強度試験体

写真 1 水理実験時の試験体応答性状

(2) 図 4 に各試験体の(a)作用する転倒モーメント、(b)引張鉄筋歪の時刻歴応答波形を示す。試験体前面での最大水位は概ね 0.85m であり、いずれの試験体もほぼ等しい値を示した。流速が極めて大きな状態では通過波浸水深の 3 倍を超える水位に達する可能性があることが検証された。転倒モーメントの最大値の継続時間は 2 秒程度であり、縮小スケール実験であることを考慮しても、波力は構造物を塑性変形させるには十分な継続時間を有していた。また、各試験体は耐力に応じて異なる応答を示しているが、試験体自体の応答は作用モーメントに影響していなかった。波先端部の衝撃的は波力については瞬間的ではあるが、転倒モーメント最大値をやや下回る程度の最大荷重が計測されている。しかしながら、衝撃的な荷重に対しては試験体の引張鉄筋の歪は反応しておらず、継続時間の長い後続波に対して大きな歪値が計測された。したがって、鉄筋の塑性化を伴う被害形態では波力が十分な継続時間を有することが必要となることが明らかになった。



(a) 作用する転倒モーメント



(b) 引張鉄筋歪

図4 水理実験時の時刻歴応答波形

(3) 図5に試験体前面水位と転倒モーメントの関係を示す。また、同図には比較のため水位相当の静水圧分布から算定される転倒モーメント算定値についても重ねて示した。試験体前面の水位が0.6m程度までは静水圧にと波圧積分による転倒モーメントは概ね一致しているが、0.6m以上では転倒モーメントが概ね頭打ちとなっている。これは既往の研究において作用荷重の上限として指摘されている通過波浸水深の3倍に相当している。波の越流や試験体の応答性状による作用モーメントの変化はほとんど見られなかった。

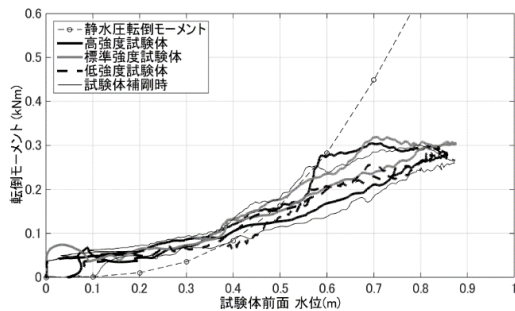


図5 水位モーメント関係図

(4) 図6に水理実験における各試験体の最大波圧分布および最大転倒モーメント時の波圧分布を示す。また、通過波浸水深3倍の水位(0.60m)および試験体前面の最大水位(0.85m)相当の静水圧分布を重ねて示す。下部位置での計測最大波圧は水位0.85mに相当する静水圧を超過しており、これは津波先端部

の作用波圧による影響である。最大計測波圧は試験体補剛時に実験した値に比べていずれも小さい値となっており、試験体の応答が先端部の最大波圧や波圧分布に影響を与えたと考えられる。一方、最大転倒モーメントが生じた時刻における波圧分布は概ね三角形分布となっており、最大値はいずれも水位0.60mに相当する静水圧と整合している。波は試験体を越流しているため、上部でも波圧が計測されているが、非常に小さい値に留まっている。

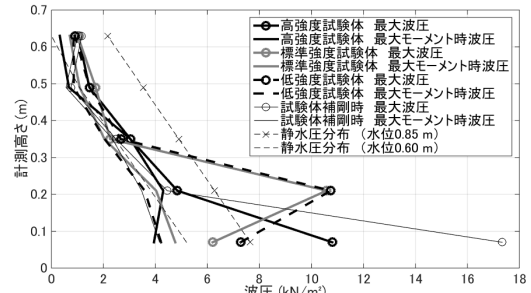


図6 高さ方向の波圧分布

(5) 静的載荷実験および水理実験における各試験体の荷重変形関係を図7に示す。水理実験については最大応答までの履歴曲線を示した。静的載荷実験については水理実験後残存した試験体についても結果を示している。転倒抵抗耐力は高強度試験体で0.50kNm,低強度試験体で0.25kNm程度であった。水理実験時に水平波力により作用した転倒モーメントは最大0.30kNm程度であり、試験体の応答(弾性・転倒)と転倒抵抗耐力に相関があることが実験的に確認された。標準強度試験体では水理実験前後の応答の比較から経験最大応答は2つの曲線の交点であったと推察されるが、水理実験における水平波力による転倒モーメントの最大値はこの値を若干下回っていた。本差異は試験体基礎底面位置において浮力が生じ、付加モーメントが作用したためと考えられる。図6より浮力は底面全面に最大波圧相当の浮力を仮定したとしても転倒モーメントの計算値は最大0.05kNm程度であり、上記の差異とも整合している。

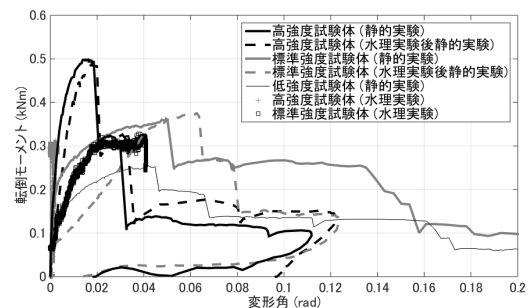
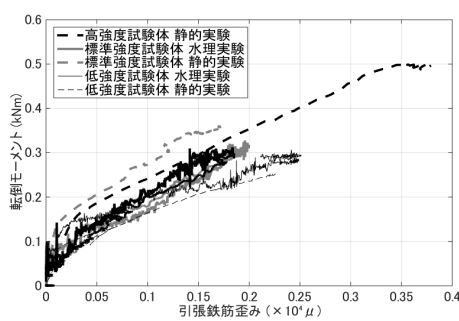


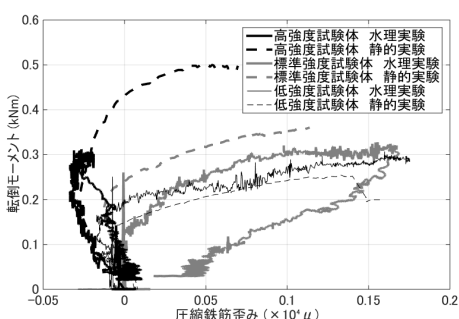
図7 荷重変形関係の比較

(6) 図8に鉄筋歪みと転倒モーメントの関係を示す。引張および圧縮鉄筋についてはいずれ

れも高強度および低強度試験体の静的載荷時および水理実験時の履歴曲線は非常に近似しているが、標準強度試験体では同じ転倒モーメントに対して水理実験時には引張歪みがやや大きくなる傾向が見られた。標準強度試験体については同様に浮力による転倒モーメントにより引張鉄筋に顕著な付加歪が生じているが、基礎部分で顕著な浮き上がり挙動の見られなかった高強度試験体、水平波力の転倒モーメントのみで試験体の転倒抵抗耐力に至った低強度試験体については浮力の影響は比較的小さかった。



(a) 引張鉄筋



(b) 圧縮鉄筋

図8 鉄筋歪み - モーメント図

(7) 上記の研究成果より、(a) 構造物が波力と同程度の耐力を有する場合は降伏後に復元する可能性があること、(b) 流速が高い波力については浸水深3倍相当の静水圧が構造物の崩壊に寄与しうること、(c) 衝撃波力や浮力については構造物の崩壊に寄与しない場合もあるが、設計用津波荷重として用いるには、先端部と非先端部の波力を場合分けする必要があることを明らかにした。今後、津波遡上解析の分野で設計上適切な精度を有する時刻歴データが得られた場合に、設計用津波荷重を合理化するための基礎資料として本研究結果が活用されることが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

壁谷澤寿一、福山洋、奥田泰雄、鉄筋コンクリート造外壁の面外破壊強度から推定される津波波力に関する検討、コンクリート工学年次論文集、査読有、36巻、937-942、2014

壁谷澤寿一、高山洋平、有川太郎、壁谷澤寿海、構造物の崩壊荷重に基づく津波荷重の評価法に関する研究(その1)実験計画および実験結果概要、第14回地震工学シンポジウム論文集、14巻、2014

高山洋平、壁谷澤寿一、有川太郎、壁谷澤寿海、構造物の崩壊荷重に基づく津波荷重の評価法に関する研究(その2)実験結果の詳細な検討、第14回地震工学シンポジウム論文集、14巻、2014

Toshikazu Kabeyasawa, Toshimi Kabeyasawa, Taro Arikawa; Evaluation of Tsunami Loading Based on Collapse Load of Structures, Proceedings of the 10th PCEE, 2015.11

壁谷澤寿一、壁谷澤寿海、有川太郎、構造物の崩壊荷重に基づく津波荷重の評価法に関する研究、構造工学論文集、査読有、62B巻、2016

〔学会発表〕(計3件)

壁谷澤寿一、鉄筋コンクリート造外壁の面外破壊強度から推定される津波波力に関する検討、日本コンクリート工学会、2014.7.11、サンポート高松

壁谷澤寿一、構造物の崩壊荷重に基づく津波荷重の評価法に関する研究(その1)実験計画および実験結果概要、第14回日本地震工学シンポジウム、2014.12.6、幕張メッセ

壁谷澤寿一、構造物の崩壊荷重に基づく津波荷重の評価法に関する研究、第62回構造工学シンポジウム、2016.4.24、東京工業大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

壁谷澤 寿一 (KABEYASAWA, Toshikazu)
国土技術政策総合研究所・建築研究部・主任研究官
研究者番号：10533953

(2) 研究分担者

壁谷澤 寿海 (KABEYASAWA, Toshimi)
東京大学・地震研究所・教授
研究者番号：00134479

井上 波彦 (INOUE, Namihiko)
国土技術政策総合研究所・建築研究部・室長
研究者番号：00370693

有川 太郎 (ARIKAWA, Taro)
中央大学・理工学部・教授
研究者番号：00344317