

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04795

研究課題名（和文）津波波力による鉄筋コンクリート造耐震壁の面外破壊強度に関する研究

研究課題名（英文）A study on out-of-plane strength of reinforced concrete wall by tsunami wave load

研究代表者

壁谷澤 寿一（Kabeyasawa, Toshikazu）

東京都立大学・都市環境科学研究科・准教授

研究者番号：10533953

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではRC造外壁試験体の水圧載荷実験を行った。壁板試験体の背面に薄型鋼板を貼り付けて内部空間を確保した。枠梁上部にはガス管を継ぎ足して、高さ約8mまで伸ばし、側柱側面には貫通されたビニルパイプを設けて家庭用上水道により注水した。作用している水圧は鋼板に孔を空け、波圧計により計測した。水位の上昇とともに徐々に外壁が面外変形し、最大水位約6mで曲げ破壊に到った。3次元非線形有限要素解析を実施したところ実験における面外破壊強度を過大評価した。壁板の2方向面外変形に伴い、鉄筋コンクリート間の付着力は低下することを指摘し、通常モデルではこの応力状態と崩壊メカニズムを再現していないことを指摘した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で実施した水圧実験は実験加力装置や大規模な水槽が無くとも一般的な耐震実験と同程度の縮小スケールの耐震壁の面外破壊性状を試験体に鋼板とガス管を取りつけることだけで検証可能な方法を示した。今後、耐津波補強を行った外壁部材等の水圧に対する性能検証の方法として広く普及すると考えられる。また、従来の3次元有限要素解析では2方向変形に伴う付着力の低下について再現できず、面外曲げを受ける部材における強度を過大評価する傾向にあることを指摘した。面外荷重に対するRC造板部材の設計法として仮想仕事法に基づく強度算定法により安全側に面外破壊強度を推定しうることも示した。

研究成果の概要（英文）：In this study, the water pressure loading test of RC outer wall specimen was conducted. A thin steel plate was fixed to the back of the wall specimen to make an internal space for water. A gas pipe was embedded to the upper part of the frame beam and extended to a height of about 8 m. The water pressure on the specimen was measured with a water pressure gauge through a hole in the steel plate. As the water level increased, the outer wall gradually deformed out of plane. It made flexural failure at the maximum water level of about 6m. A three-dimensional nonlinear finite element analysis was performed to overestimate the out-of-plane flexural strength in the test. It was pointed out that the bond force between the steel rebar and concrete decreased due to the out-of-plane deformation of the wall plate in two directions. It is pointed out that the conventional model can not simulate this stress and collapse mechanism of the wall.

研究分野：建築構造

キーワード：津波避難ビル 鉄筋コンクリート造 耐津波設計 水理実験

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

2011年東北地方太平洋沖地震後に津波防災地域づくり法が制定され、津波避難ビルの構造上の要件によって津波避難ビルに求められる要求性能が明確になったが、高度な構造計算が求められるため既存建築物に対する耐津波性能の評価方法として用いることが困難であった。そこで、国土交通省は階数と既存建築物に対して適用可能な許容浸水深表を作成した。しかし、本表では建築物の倒壊、転倒、滑動に対する安全性のみが確認でき、耐圧部材の破壊、漂流物の衝突、洗掘による傾斜等については別途適切な方法で確認する必要がある。特に鉄筋コンクリート造建物では2011年東北地方太平洋沖地震時に耐力壁の面外破壊が複数確認されており、浸水深が6m程度の低い場合でも被害が生じている。津波荷重作用時には地震時とは異なり、鉄筋コンクリート造耐震壁の壁板部分が水圧により早期に面外破壊するため、架構の水平耐力に寄与できなくなる可能性も考慮する必要がある。一方、既存の非構造壁を対象として耐津波診断マニュアルを用いた場合の面外破壊強度は浸水深2m程度と算定されており、調査における被害状況との違いから、計算値は実強度を大幅に過小評価していることが予想される。

### 2. 研究の目的

本研究では水圧により損傷する鉄筋コンクリート造耐震壁の面外曲げ終局強度を実験的に明らかにしようとするものである。鉄筋コンクリート造壁試験体を水圧で面外破壊させる簡易的な実験方法を提案し、静水圧実験によって壁部材の強度および応答性状を把握するものである。従来の研究では造波装置を使った模型水理実験が主流であるが、入射波特性と模型試験体の組み合わせがパラメータとなるため、実験結果から汎用的な構造設計法を構築するには非常に多数の実験結果の蓄積が要求される。本研究では部材性能評価として構造耐力と等価な静水圧を与える水位を評価尺度として用いることを提案している。津波先端部においては堰上げを含む水位に相当する静水圧が作用すると考えると、堰上げを含む水位が建物高さを超える場合、建物は避難機能を担保できないため、建物高さ相当の水圧に対する強度を目標として部材性能を検証すればよい。また、造波装置での実験は試験体を大幅に縮小して実験する制約があるが、水圧実験では通常の構造実験と同程度の縮小スケールで部材性能を検証可能となる。本研究の成果を踏まえて、壁板の面外方向の損傷の程度を考慮した耐津波補強の効果に関する研究に発展的に展開することを念頭に置いている。

### 3. 研究の方法

#### (1) 実験試験体

試験体は鉄筋コンクリート造建物の外壁を想定し、1/3縮小スケールで作成した。試験体形状および配筋図を図1に示す。試験体の鉄筋コンクリート壁板は柱2本、梁2本に囲まれている。壁厚は40mm、壁長さは短辺1000mm、長辺1800mmで配筋はD4ダブル千鳥@100(SD295)、縦筋17本、横筋9本である。縦筋と横筋には10点の歪みゲージを設置した。柱梁の断面はともに300mm×300mmである。柱主筋は8-D19(SD345)、柱帯筋はD6(SD295)である。梁主筋は上下ともに3-D19(SD345)、あばら筋はD6(SD295)である。柱及び梁は壁に対して剛性が高く、最大水位時の圧力は柱及び梁のひび割れ強度以下である。コンクリート圧縮強度は24MPaとしている。

#### (2) 実験方法

水圧実験方法を図2に示す。壁板は側柱に対してやや偏心して取り付け、試験体裏面に厚さ6mmの鋼板を設けて、枠梁・枠柱との境界部分を全周にわたりシーリングした。鋼板は角パイプを格子状に配して、面外剛性を確保し、角パイプ端部は枠梁および側柱の貫通孔にPC鋼棒を通して固定している。試験体側柱側面には塩化ビニルパイプの貫通孔に設けて、取水ホースに取り付け、試験体の内部空間に家庭用水道から注水した。流出側は上梁に縦方向の貫通孔としてガス管を埋め込み、ガス管をボルト接続で繋いでいくことで高さ8.5mまで延伸した。試験体は側面を溝形鋼と山形鋼ブレースで固定し、溝形鋼端部からワイヤーロープを伸ばしてガス管頂部を振止めした。鋼板に孔を開け、波圧計をシーリングして固定し、計測された波圧から換算して水位を求めた。下梁の上端を水位0mとしている。図1に波圧計の配置を示す。壁の面外変形は壁外周部にアングルフレームを取り付け、CDP変位計を押し当てて計測した。

#### (3) 有限要素解析方法

非線形3次元有限要素法を用いた解析は使用モデルの違いの影響を明らかにするため、①シェル要素②ソリッド要素（分布ひび割れモデル）③ソリッド要素（離散ひび割れモデル）の3種類を用いた。解析プログラムはVectorおよびFINALを用いた。要素寸法は一様とした。材料特性は試験体の材料試験に基づき、付着強度は藤井・森田式より算出した。ソリッド要素モデルでは、鉄筋の定着の影響を考慮するため深さ200mmまでの柱梁部分を弾性材としてモデル化し、鉄筋を柱梁内に定着させた。水圧荷重は壁表面節点に等価荷重を与えることで壁面全体に作用する等分布荷重とし、柱梁節点の支持条件は固定とした。

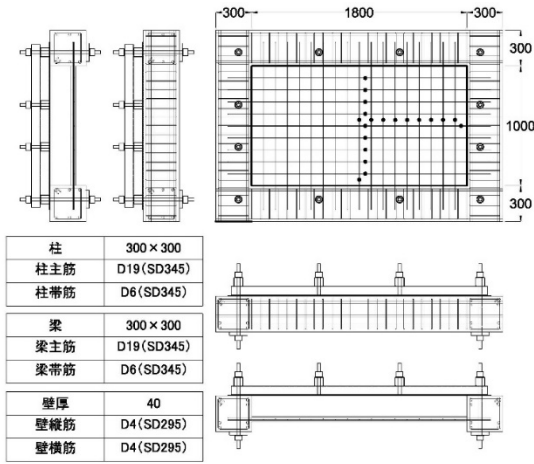


図1 試験体断面詳細

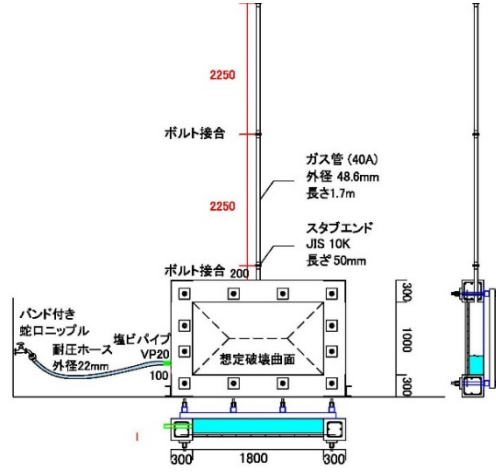


図2 実験方法

#### 4. 研究成果

##### (1) 実験結果

中央部変位と水位の関係を図3に示す。また試験体を周辺固定スラブと同様に2方向の両端固定梁と見なし、等分布荷重  $w$  が生じる時の中央弾性撓みを図3の1点鎖線で示す。初期剛性については実験と解析に大きな差異はみられなかったが、試験体にひび割れが発生した水位 3.3m、面外変形 2mm 程度で試験体の弾性剛性から差異が見られた。水位 4.8m、面外変形 6mm 程度で RC 試験体の縦筋の降伏が確認された。実験結果では降伏後耐力が概ね一定となった。水圧载荷実験終了時の表面ひび割れを図4に示す。水圧载荷実験時にはひび割れ位置から常時水が流出するため、図4に示すように水痕からひび割れ位置を特定することができる。RC 試験体は壁面中央水平方向にひび割れが発生しその後全体へと広がっていき、隅角部からは斜め 45° 方向にひび割れが進展した。亀甲状ひび割れを想定した場合の鉄筋コンクリート造外壁の面外破壊強度を仮想仕事法に基づいて算出した。外部仕事量が内部仕事量と一致する壁破壊時の水位  $H$  を計算すると、4.5m となり、概ね壁筋降伏時の最大水位と一致することを確認した。これらの計算強度を用いた場合、安全側に面外破壊耐力を評価可能であること実験的に検証した。

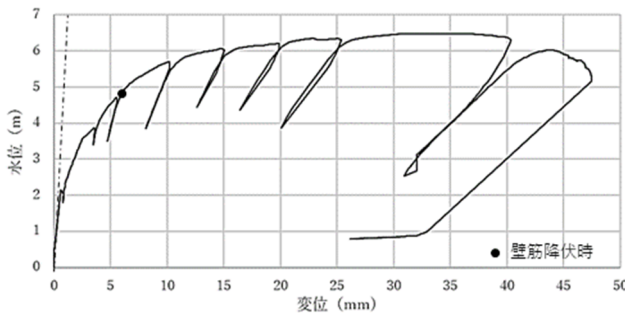


図3 水位変形関係



図4 ひび割れ状況

##### (2) 従来モデルによる解析結果

図5に実験結果と FINAL・VecTor の解析結果の水位変形関係を示す。なお、各モデルの要素節点定義は、FINAL では 20 mm 間隔の節点で 1 要素あたり 4 節点、VecTor では 50 mm 間隔の節点で、1 要素あたり頂点・各辺中点・圆心の 9 節点となる。FINAL での解析結果は実験時終局耐力を過大に評価した。また、VecTor の結果とも一致せず、節点数の少ない VecTor の方が実験値に近い値を示した。ソリッド要素により付着性状を表現した解析結果を図6に示す。要素分割を細かくすると終局耐力が実験値に近づくが、解析結果は実験結果を過大評価している。また、鉄筋を取り除いたモデルと比較すると、鉄筋をモデル化した場合の解析結果と変わらないことから、コンクリート負担力が結果に影響していると考えられる。また、解析における終局時のひび割れ状況を図7に示す。実験では一部のひび割れが拡大しているが、解析ではひび割れが広範囲に分布している。図8に破壊性状を表す傾き比(端部に対する中央部分の計測点間の面外変形比)を示す。傾き比が1から正方向に遠ざかるほど付着性状が良好でひび割れが広範囲に分散する破壊形態を表し、解析での傾き比は1.8付近を推移している。分布ひび割れモデルでは、実験におけるひび割れ損傷性状が再現できていないと考えられる。

##### (3) 面外変形時に想定される破壊メカニズム

従来のモデル化方法では面外強度を過大に評価した。図9は面外変形時の想定される破壊メカニズムを表す図である。薄肉部材が面外方向力を受けることで壁板がたわみ、コンクリートが鉄筋に対して直交方向に引っ張られることで両者が離間する。結果的に鉄筋-コンクリート間の付着力が低下し、壁面中央部、端部にひび割れが集中すると考えられる。上記の応力状態は非

線形 3 次元有限要素法解析では直接的に考えられておらず、解析では付着強度の分布を変化させ、損傷位置を特定させる必要がある。

(4) 離散ひび割れモデルを用いた解析結果

図 10 にモデルでの離散ひび割れ要素の定義位置を示す。面外変形時の仕事量が最小時の想定されるひび割れ位置に、フィルム要素を定義した。これは図 4 の実験時のひび割れ集中部分と一致している。図 11 に水位変形関係を示す。水位 1.5m でのひび割れ発生後の剛性低下、及び面外変位 15 mm 以降の水位が一定値となっており、水位変形関係は実験結果と概ね整合した。図 12 に壁中心を通る縦筋の端部ひずみ-水位関係を示す。解析では壁端部の離散ひび割れの幅は実験よりも過大であり、解析結果では回転変形や縦筋のひずみは端部に集中している。各モデルでの傾き比に差異は見られず、中央と端部のヒンジ回転角の差異によって剛性に生じたと考えられる。解析によるモデル化は水位変形関係を概ね再現されているものの、予めひび割れ発生位置が既知である場合に限り、破壊性状も完全に再現された状態までは至っておらず、異なる断面配筋を有する試験体に対しては十分な解析精度を担保できない可能性がある。有限要素解析による板部材の面外曲げ耐力評価には 2 方向荷重を受けた場合の付着の耐力分布を考慮する必要があり、付着性状を再現することが今後の課題となる。

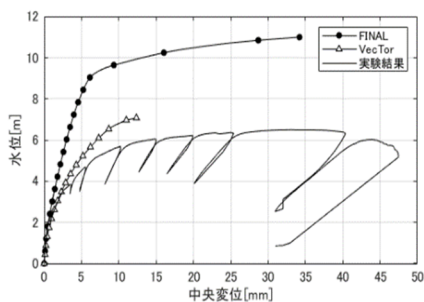


図 5 非線形シェル要素による解析結果

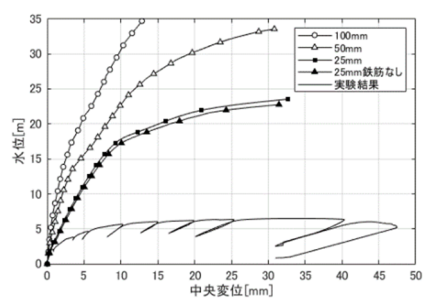


図 6 非線形ソリッド要素による解析結果

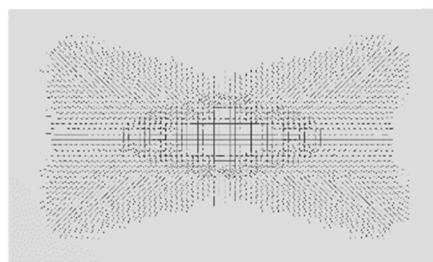


図 7 ソリッド要素におけるひび割れ

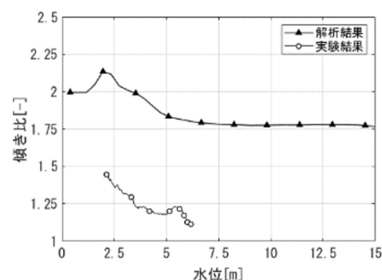
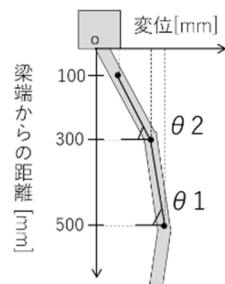


図 8 傾き比の定義と推移状況

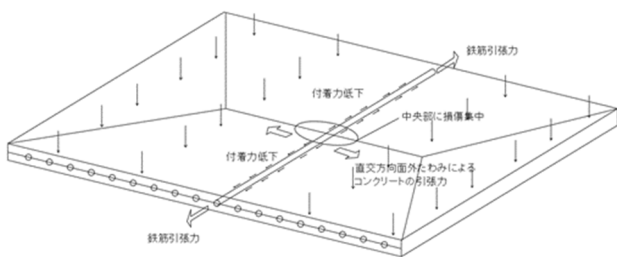


図 9 2 方向変形により想定される応力状態

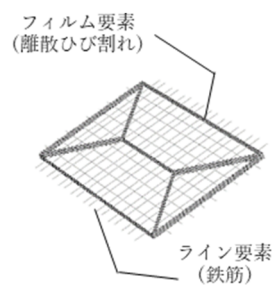


図 10 離散ひび割れ定義位置

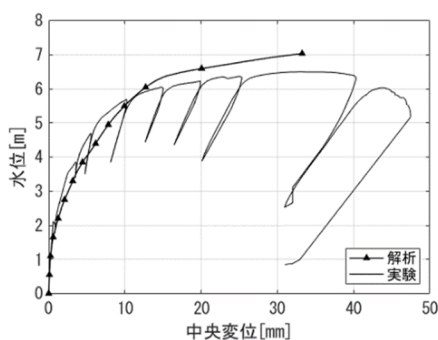


図 11 離散ひび割れモデルによる水位変形関係

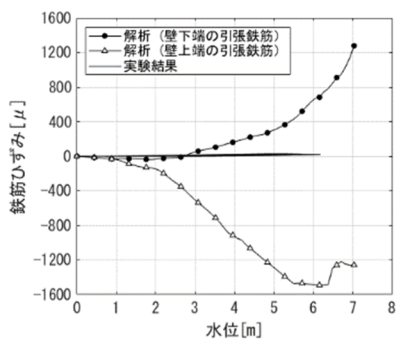


図 12 端部鉄筋 歪—水位関係

<引用文献>

- ① 笠井のの華, 壁谷澤寿一, 壁谷澤寿海, 荻野翔平, 津波波力に対する鉄筋コンクリート外壁の面外強度に関する研究 その1: RC 試験体, 学術講演会梗概集, 日本建築学会, pp.49-50, 査読無, 構造 I, 2021年9月
- ② 荻野翔平, 壁谷澤寿一, 壁谷澤寿海, 五十嵐俊一, 五十嵐順平, 笠井のの華, 津波波力に対する鉄筋コンクリート外壁の面外強度に関する研究 その2: SRF 補強試験体, 学術講演会梗概集, 日本建築学会, pp.51-52, 査読無, 構造 I, 2021年9月
- ③ 荻野翔平, 壁谷澤寿一, 壁谷澤寿海, 五十嵐俊一, 五十嵐順平, 繊維補強シートによる鉄筋コンクリート造外壁の耐津波補強効果に関する研究, 学術講演会梗概集, 日本建築学会, pp.61-62, 査読無, 構造 I, 2022年9月
- ④ 荻野翔平, 壁谷澤寿一, 壁谷澤寿海, 小松瑞貴, 繊維補強シートによる鉄筋コンクリート造外壁の耐津波補強効果に関する研究, 構造工学論文集 69B, pp.294-300, 日本建築学会, 査読有, 2023年4月
- ⑤ 小松瑞貴, 壁谷澤寿一, 3次元有限要素法を用いた鉄筋コンクリート造壁部材の面外変形性状の評価法に関する研究, 学術講演会梗概集, 日本建築学会, 査読無, 2023年9月(投稿中)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 荻野翔平, 壁谷澤寿一, 壁谷澤寿海, 小松瑞貴	4. 巻 Vol. 69B
2. 論文標題 繊維補強シートによる鉄筋コンクリート造外壁の耐津波補強効果に関する研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 p. 294-300
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijse.69B.0_294	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 2件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 壁谷澤寿一
2. 発表標題 建物を対象とした水理実験事例 その1, 陸上建物の津波荷重に関する研究の現状
3. 学会等名 日本建築学会大会, 構造部門 (荷重) PD (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩田善裕, 壁谷澤寿一, 奥田泰雄, 喜々津仁密
2. 発表標題 建物を対象とした水理実験事例 その2, 陸上建物の津波荷重に関する研究の現状
3. 学会等名 日本建築学会大会, 構造部門 (荷重) PD (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 笠井のの華, 壁谷澤寿一, 壁谷澤寿海, 荻野翔平
2. 発表標題 津波波力に対する鉄筋コンクリート外壁の面外強度に関する研究 その1: RC試験体
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会, 構造, pp. 49-50
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荻野翔平, 壁谷澤寿一, 壁谷澤寿海, 五十嵐俊一, 五十嵐順平, 笠井のの華
2. 発表標題 津波波力に対する鉄筋コンクリート外壁の面外強度に関する研究 その2: SRF補強試験体
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会, 構造 , pp.51-52
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 豊田琢也, 水戸有利波, 壁谷澤寿一
2. 発表標題 連立構面に作用する津波波力に関する解析的研究
3. 学会等名 日本地震工学会・大会 - 2021, C-5-6, T2021-095
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 板谷光太郎, 壁谷澤 寿一
2. 発表標題 津波に対する都市の脆弱性評価に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会 大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 豊田琢也, 壁谷澤 寿一
2. 発表標題 入射方向に対して斜め構面を有する建物に作用する津波波力に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会 大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 荻野翔平, 壁谷澤寿一, 壁谷澤寿海, 五十嵐俊一, 五十嵐順平
2. 発表標題 繊維補強シートによる鉄筋コンクリート造外壁の耐津波補強効果に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会 大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshikazu Kabeyasawa
2. 発表標題 An Experimental Study on Damming and Buoyant Force on a Reinforced Concrete Frame
3. 学会等名 Proceedings of 17th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	壁谷澤 寿海  (Kabeyasawa Toshimi)  (00134479)	東京大学・地震研究所・名誉教授   (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------