

論文 有限要素解析を用いた RC 造壁部材の面外破壊における降伏線理論耐力の分析と面外変形評価

川口 楓汰^{*1}・高橋 典之^{*2}

要旨：RC 造建物の津波被害の一例として RC 造壁の面外破壊が挙げられる。既往の研究では、4 辺固定の周辺部材が変位拘束される RC 板の終局荷重について、降伏線理論耐力よりも耐力が大きくなる傾向が指摘されている。一方、慣用的には 4 辺固定とされる条件であっても周辺部材の変位拘束が完全ではない場合、降伏線理論耐力が実耐力を過大評価する事例も存在する。本論文では、周辺部材の変位拘束が RC 造壁に準じた面外載荷実験に対し有限要素解析を用いて面外破壊性状について分析し、降伏線理論耐力の精査を行うとともに、面外変形評価について検討し、RC 造壁の面外抵抗性能について考察した。

キーワード：津波荷重, 有限要素解析, RC 造壁部材, 面外変形, 降伏線理論

1. はじめに

1.1 研究背景

2011 年に起こった東北地方太平洋沖地震では、多くの RC 造建物が津波による被害を受けた。津波被害を受けた既存建築物の浸水被害認定については、被害調査結果をもとに 2015 年版の被災度区分判定基準において津波被災度評価フロー¹⁾として取りまとめられた。評価フローでは、上部構造の構造被害認定において、RC 造壁に津波外力が作用し降伏線にひび割れが見られた場合、壁筋が降伏していると予想して損傷度Ⅲ程度とみなし、面外への残留変形が大きい場合は損傷度Ⅳ、Ⅴと判定される。面外損傷について、塑性理論としての降伏線理論に基づく面外耐力評価についての研究は RC 造床版を対象に広く検討が進められてきた一方、RC 造壁としての面外耐力および面外変形の評価については、次節で紹介する既往の研究において、いくつかの課題（耐力評価の不整合等）が示されているのが現状である。

1.2 既往の研究

面外荷重を受ける RC 床版の耐荷挙動の研究例として、篠崎らの研究²⁾が挙げられる。篠崎らは、全面等分布荷重を受ける正方形 RC 床版の耐荷挙動についての実験を行い、既往の耐力算定式と比較し分析している。一般的に面外方向に荷重を受ける RC 床版の終局限界状態における曲げ耐力は降伏線理論を用いて評価されることが多いが、実験結果と比較すると降伏線理論で算出される終局耐力到達後も RC 床版は耐力上昇し、降伏線理論は実耐力を過小評価することが分かっている。

また、小幡ら³⁾が行った面外荷重を受ける RC 造壁の終局耐力計算法の検討において、有限要素解析による計算結果は過去の実験結果と概ね良い対応を示すものの、降伏線理論で算出される終局荷重と比較すると実耐力を過小評価することが指摘されている。これらの実耐力

を過小評価してしまう原因としては、鉄筋のひずみ硬化によるものとする考察や、面外荷重によって二次的に発生する面内方向の圧縮軸力が RC 造壁の終局耐力を増加させている可能性が指摘されている。

一方、渡辺ら⁴⁾は、RC 床版を対象とした試験体であるが、上下スタブに挟まれ鉛直方向は直交壁で支えられた壁試験体同様立たせた状態での載荷方法を採用し、面外方向の外力を作用させる実験（具体的な実験概要は 3 章に記述）を実施した。実験結果として、面外力と試験中央部の面外変形の関係が図-1 のように得られた。この試験体について降伏線理論を用いて 4 辺固定として終局耐力を算出・比較してみると、既往の研究と異なり実耐力を過大評価していることが分かる。

篠崎ら²⁾や小幡ら³⁾が行った実験・解析では、RC 床版を支える 4 辺の部材の面外方向変位も反力床などに変位拘束された状態で載荷が行われた。一方、渡辺ら⁴⁾の実験は、前述のとおり RC 床版の上下は剛強なスタブで載荷フレームに固定されているが、側面は直交壁につながっている状態であり、その直交壁自体をさらに反力壁等が固定しているわけではない。通常、RC 床版は大梁や小梁に剛接する辺を周辺固定として扱っており、大梁や小梁のたわみが別途拘束されていることを周辺固定の条件とはしていない。その意味では、渡辺ら⁴⁾が行った実験も 4 辺固定とみなし得るが、篠崎ら²⁾や小幡ら³⁾が行った実験結果とは降伏線理論耐力と実験結果との比較評価が異なっている点に本論文では着目した。津波外力を受ける RC 造壁も、上下を梁や床スラブが、左右を柱や直交壁が支持している周辺固定状態と考えられるが、現実的な支持状態は、渡辺ら⁴⁾の実験で採用した載荷方式に近いと考えられる。これを踏まえて本論文では、津波外力に対する RC 造壁の面外抵抗性能を評価するにあたり、壁の周辺状況による面外抵抗性能の違いや、降伏

*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)

線発生後の面外変形性能の分析を行うべく、渡辺ら⁴⁾が行った実験をもとに、有限要素解析を用いて面外荷重を受ける RC 造壁の面外耐力の評価及び降伏線理論との関係について検討した。

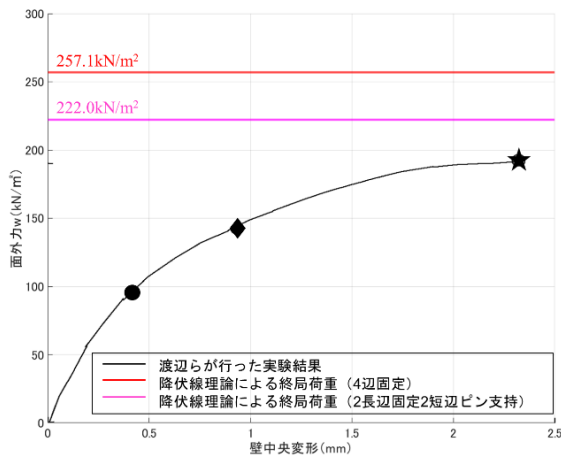


図-1 渡辺ら⁴⁾の実験結果と降伏線理論耐力の比較

2. 降伏線理論の概要

本論文では、RC 造壁部材の津波荷重による破壊が面外方向曲げ変形によるものであると仮定し、一般に床スラブの終局耐力計算に用いられる降伏線理論を用いて壁部材の耐力計算を行う。降伏線理論は 1943 年に K. W. Johansen⁵⁾ が発表し、スラブ耐力評価に用いられる塑性理論として知られている。この理論は数多くの実験によって妥当性が確認されており、配筋量が少なく鉄筋の降伏によって耐力が決定する RC 薄板スラブに対して十分適用しうることが実証されている。

Johansen⁵⁾の降伏線理論を用いて終局荷重を算出するにあたり、終局時における RC 薄板の崩壊機構を決定する必要がある。次章で検討対象とする渡辺ら⁴⁾が載荷した長方形スラブについては、スラブが面外荷重を受けると、まず載荷面の長辺に沿ってひび割れが発生し、次いで解放面（非載荷面）中央長辺方向に平行してひび割れが発生する。以後、載荷面では周辺に沿ってひび割れが伸展し、解放面では長辺に平行なひび割れが 45° 方向に傾きスラブ四隅に向かって伸展し放射状にひび割れが広がることが記録されており、破壊メカニズムとして降伏線理論の適用対象となり得るものと考えられる。

東ら⁶⁾は降伏線理論の適用にあたり、スラブの崩壊機構、応力のつり合い条件、変形の適合条件を仮定しており、本論文もこれを踏襲する。

図-2 は、この基本仮定に基づいた、面外等分布荷重を受ける長方形スラブ崩壊機構の模式図である。

3. 検討構造物

本論文では、渡辺ら⁴⁾が行った実験を対象として有限

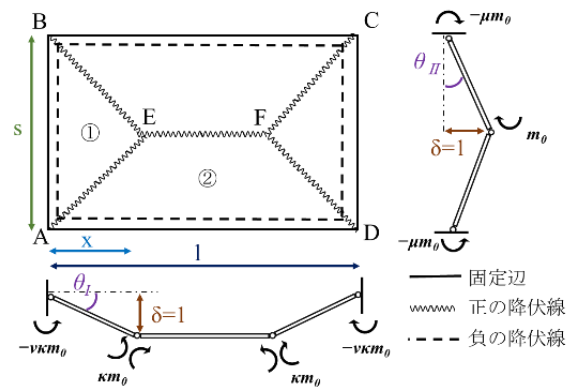


図-2 長方形スラブの崩壊機構⁶⁾を一部改変

要素解析を用いて面外荷重を受ける RC 造壁の面外耐力の評価及び降伏線理論との関係について検討する。

3.1 渡辺ら⁴⁾による実験概要

渡辺ら⁴⁾が行った実験の試験体形状を図-3 に示す。この実験は床スラブを想定した載荷実験ではあるが、試験体は上下に剛強なスタブを有し、試験区間の側面には直交壁を設け、既往の多くの耐震壁実験と同様の形状となっている。試験体のうち試験区間となる床スラブ部分は厚さが $t=135\text{mm}$ 、 $l_x \times l_y=1500 \times 2250\text{mm}$ ($\lambda=1.5$) であり、支持材となる直交壁は厚さ $t=150\text{mm}$ である。試験区間は縦置き状態となっており、面外力は水平方向に等分布荷重を全面にかけて作用させている。面外力の加力方法を図-4 に示す。

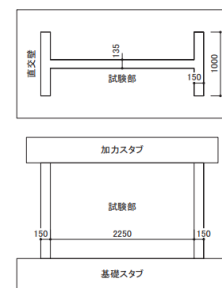


図-3 試験体形状⁴⁾

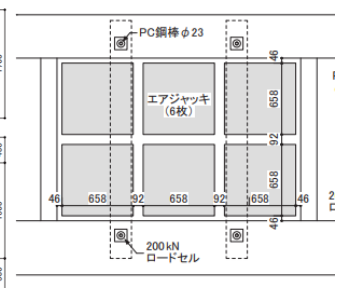


図-4 面外加力方法⁴⁾

3.2 試験体諸元

渡辺ら⁴⁾が行った実験では鉄筋比及び導入面外力の異なる 7 つの試験体が検討されているが、本論文では面外力のみがパラメータとなる No.2~4 の試験体を検討対象とした。No.2~4 の試験体の諸元を表-1 に示す。面外力パラメータは、用いる鉄筋の短期許容応力度相当である $\sigma_t=300\text{N/mm}^2$ を目安として面外力を逆算して定めた No.2 試験体を基準とし、No.3, 4 の試験体は面外力を No.2 の 1.5 倍、2 倍に設定したものである。

試験体に使用したコンクリートおよび鉄筋の材料特性は文献⁴⁾を参照し、試験区間の配筋は全てダブル配筋であり短辺長辺方向ともに D6-@60 である。直交壁の配筋は縦筋 D10-@60、横筋 D6-@60 である。

表-1 試験体諸元⁴⁾

試験体 No.	配筋比 $P_s(\%)$	試験区間の配筋	面外力 ω (kN/m ²)
2	0.79	D6-@60	90
3			135
4			180

3.3 検討構造物の降伏線理論による終局荷重

2章でまとめた降伏線理論を用いて、検討対象試験体の面外方向の終局荷重(等分布荷重)を周辺固定度別に算出した。算出結果を表-2に示す。

表-2 降伏線理論により算定した終局荷重(kN/mm²)

4辺固定	2長辺固定 2短辺ピン支持	2短辺固定 2長辺ピン支持	4辺ピン支持
257.1	222.0	133.7	105.4

4. 有限要素解析概要

面外荷重を受けるRC造壁の面外破壊性状を調べるべく、非線形有限要素法解析プログラムFINAL⁷⁾を用いて解析を行い、渡辺ら⁴⁾が行った実験結果との比較検証を行う。複数のモデルを適用することで破壊性状を踏まえた面外耐力評価とあわせて面外変形評価についても検討を行う。

4.1 解析モデル概要

図-5に解析モデル、表-3にモデル化の諸元を示す。小松ら⁸⁾の研究から、面外荷重を受けるRC造壁の有限要素解析のモデル化において、四辺形要素モデルでの解析では実験結果より実耐力を過大評価してしまうことが指摘されているため、要素モデルについては六面体要素を採用することにした。また、ひび割れのモデル化についても、分布ひび割れモデルでは、実験におけるひび割れ性状を再現することができていないと考えられるため、本研究では降伏線上に離散ひび割れ要素を配置した。離散ひび割れ要素の設定には、ひび割れ位置を想定したうえでその部分のコンクリートを切り離し、切り離れたその節点間に接合要素を設定する必要がある。本解析では壁面降伏線上にひび割れが発生すると想定し、図

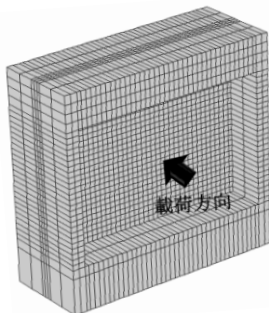


図-5 解析モデル

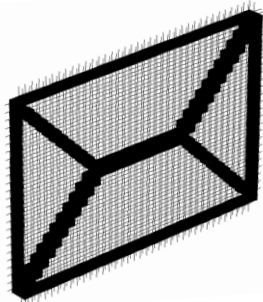


図-6 離散ひび割れ位置

-6のように離散ひび割れ位置を定義した。また設定した接合要素については、フィルム要素を定義し、要素特性については長沼⁹⁾によるひび割れ面のせん断伝達特性を採用することとした。なお、コンクリートの材料構成則は図-7、図-8に示すとおり、圧縮挙動は修正 Ahmadモデル¹⁰⁾、引張挙動は出雲らのモデル(C=1.0)¹¹⁾を採用した。周辺部材(スタブおよび直交壁)は完全弾性体として再現した。本解析では、FEMによるRC板の面外載荷に関する既往の研究³⁾の要素分割(ただし文献3)はシングル配筋)を参考に、ダブル配筋の薄壁に対して45mm厚のコンクリート要素で区分し、コンクリート要素間に鉄筋を配置した。載荷は、壁表面節点に等価荷重を与え壁面全体に作用する等分布荷重とした。

表-3 モデル諸元

要素モデル		六面体要素	
ひび割れモデル		離散ひび割れ要素を降伏線上に設定	
要素分割(試験区間)		60mm×60mm×厚さ45mm	
鉄筋要素		2節点トラス	
材料特性	コンクリート	圧縮	修正 Ahmad モデル
		引張	出雲らのモデル(C=1.0)
		強度等	渡辺ら ⁴⁾ が行った実験の材料特性を参照
	壁筋	バイリニアモデル(降伏強度 377 N/mm ²)	
付着	強度 2.62 N/mm ² (許容付着応力度), すべり量 0.6mm		

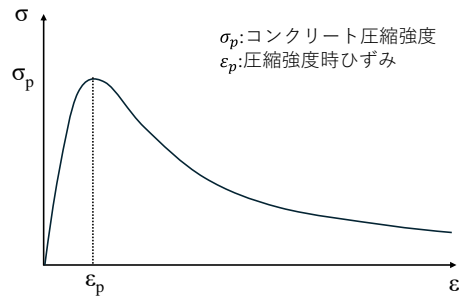


図-7 コンクリート圧縮側構成則(修正 Ahmad モデル¹⁰⁾)

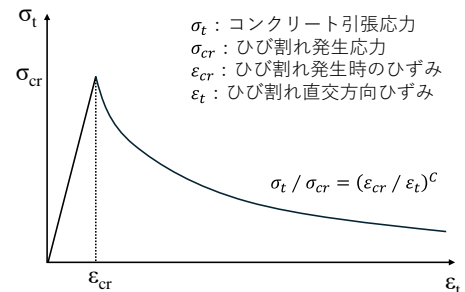


図-8 コンクリートの引張側構成則(出雲らのモデル¹¹⁾)

4.2 解析パラメータ

本論文では面外荷重を受けるRC造壁を有限要素解析するにあたって、鉄筋の付着強度、離散ひび割れ要素の有無、RC造壁周辺の部材の固定度を変動パラメータと

し、RC造壁の面外変形抵抗特性について分析することとする。本解析における境界条件について、まず、上スタブの上部および下スタブの下部に属する節点の x, y, z 方向の並進および x, y, z 軸回りの回転を拘束したものを「上下スタブ固定モデル」とする。つぎに、RC造壁周辺部材の固定度について、上下スタブ固定に加えて側面直交壁の外縁（載荷面のある壁と反対側）に属する節点の x, y, z 方向の並進及び x, y, z 軸回りの回転を拘束したものを「4辺固定モデル」とし、4辺固定モデルで拘束した節点の x, y, z 軸回りの回転のみ自由にしたものを「4辺ピンモデル」、4辺固定モデルの側面直交壁で拘束した節点の x, y, z 軸回りの回転のみ自由にしたものを「2長辺固定2短辺ピンモデル」と定義した。上述の検討パラメータについてまとめたものを表-4に示す。

表-4 有限要素解析における変動パラメータ

検討パラメータ	
(1)壁筋の付着強度	許容付着応力度 2.62 N/mm^2 , 1/4倍(0.66 N/mm^2), 1/8倍(0.33 N/mm^2), 4倍(10.48 N/mm^2)
(2)離散ひび割れ要素の有無	降伏線に配置, 離散ひび割れ要素無し
(3)RC造壁周辺の固定度	上下スタブ固定モデル(2短辺自由), 4辺固定, 4辺ピン, 2長辺固定2短辺ピン

5. 有限要素解析結果と面外破壊性状に関する考察

渡辺ら⁴⁾の実験について、表-4に示した各変動パラメータについて有限要素解析を実施した。

5.1 鉄筋の付着強度に関する検討

試験区間における壁筋の付着強度について、許容付着応力度 2.62 N/mm^2 を基準に、1/4倍(0.66 N/mm^2)、1/8倍(0.33 N/mm^2)、4倍(10.48 N/mm^2)と変更して比較したものを図-9に示す。ここで、剛性の比較対象としてRC規準¹²⁾に示されている床スラブたわみ式を試験区間中央変形量の4辺固定状態理論値を併記した。なお、表-4に示した付着強度以外の変動パラメータは、(2)離散ひび割れ要素の有無については「降伏線に配置」のケース、(3)RC造壁周辺の固定度（固定端モーメント設定）については「上下スタブ固定モデル(2短辺自由)」のケースを採用した場合について示している。

付着強度が小さくなるほど、RC造壁の面外変形抵抗性能における剛性が小さくなり、グラフの傾きが小さくなった。算定された面外強度は、壁筋の付着強度を1/4倍(0.66 N/mm^2)としたときの有限要素解析結果と渡辺ら⁴⁾の実験結果が概ね一致した。このときのNo.4試験体の解放面（非載荷面）側のひび割れ図を図-10に示す。また、付着強度を1/4倍(0.66 N/mm^2)としたときの有限要素解析結果と渡辺ら⁴⁾の実験結果における鉄筋ひずみの比較を図-11に示す。No.4試験体までの載荷では実験、解

析ともに壁鉄筋は降伏しておらず、壁中央部のひずみは実験結果を近似するものの、壁周辺部のひずみは実験結果を過少評価した。小松ら⁸⁾の研究では、面外載荷実験で平面保持仮定における中立軸が断面外ある状態では、解析で引張応力を適切に表現できず鉄筋のひずみが小さくなるのが指摘されており、本論文でも同様の現象が生じたと考えられる。また、面外破壊におけるRC造壁のひび割れは、実験では放射状にひび割れが入るが、解析では試験区間中央水平方向ひび割れが卓越し、解放面左側にひび割れが進展した。ひび割れが左右非対称になった原因を分析すると、コンクリート非線形領域では、離散ひび割れを定めたフィルム要素に与えるせん断応力-すべり量関係における剛性変化に対して面外載荷による応答が敏感で解が不安定な方向に発散しかけるとわずかな計算誤差から左右非対称性が高まる傾向があった。本論文では文献13)を参考に比較的安定的な解を得るせん断応力伝達モデルを用いて解析を行った。

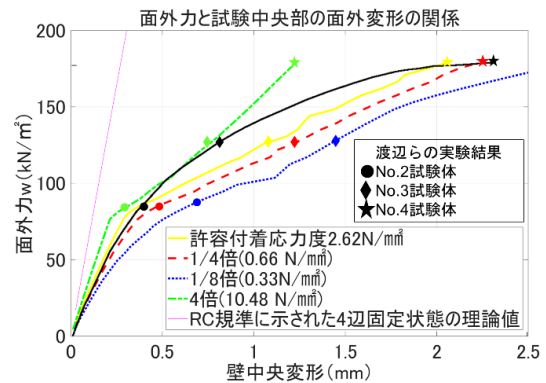


図-9 付着強度の変化による面外荷重-中央変位関係

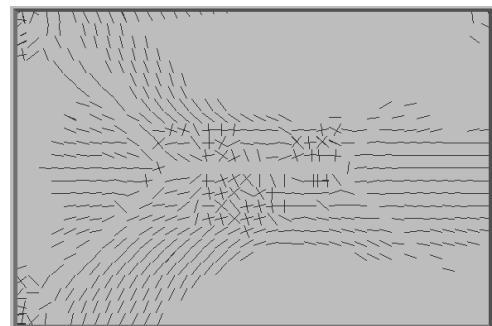


図-10 FEM解析によるNo.4試験体ひび割れ図

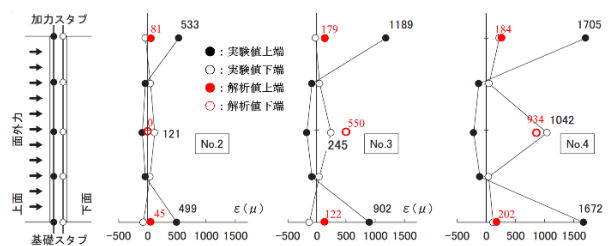


図-11 実験値及び解析値の比較⁴⁾一部加筆

このような解析結果となった原因として、今回対象とした試験体においては、上下スタブが大断面で剛強に作られているのに対し、側面直交壁部分は相対的に小断面なため、壁筋が理論上完全に定着しているものとして計算した場合よりも、現実には直交壁部分から壁筋定着部が抜け出すよう様相を呈しており、実験結果を近似する壁筋付着強度 1/4 倍(0.66 N/mm²)のケースでは、側面直交壁側の端部を起点に面外方向に変形が生じ始める破壊性状となり、その結果、試験区間中央水平方向にひび割れが集中した。

5.2 離散ひび割れ要素の有無による検討

小松ら⁸⁾は、面外荷重を受ける RC 造壁の有限要素解析において、分布ひび割れでは変形を小さく見積り剛性を高く評価することを指摘しており、降伏線上に離散ひび割れ要素を配置しモデル化することを推奨している。そこで、表-4 に示したパラメータのうち、付着強度「1/4 倍(0.66 N/mm²)」のケース、壁周辺固定度「上下スタブ固定モデル (2 短辺自由)」のケースを採用した場合について、離散ひび割れ要素を降伏線上に配置する場合としない場合とで耐力を比較した。比較結果を図-12 に示す。面外力を受ける RC 壁の剛性低下は離散ひび割れ要素を配置した方が実験結果に近い面外剛性低下を示したが、No.4 試験体の载荷レベルに至ったときの接線剛性に着目すると実験の接線剛性の方がかなり低い。図-11 に示したとおり壁鉄筋は降伏前であり、実験で得られた接線剛性は鉄筋降伏前としては低すぎるように見える。そこで、実験では面外押し切り荷重を実施していないが、解析で壁筋降伏後まで押し切り荷重をしてみると図-13 を得て、実験で得られた接線剛性は面外荷重を継続した場合に回復する可能性が示唆される。なお、実験ではエアバッグによる荷重のため面材変形追従型の荷重になっている可能性があるが、解析では全体座標系の面外方向に荷重を与える面材変形非追従型の荷重になっているので、面外変形が幾分小さく評価される可能性があることは留意されたい。

5.3 試験区間の周辺固定度による検討

壁の周辺固定度の条件を変更した結果を図-14 に示す。降伏線理論を用いて算出した RC 造壁の終局荷重計算値を図-14 に併記した。また、4 辺固定で解析した際の No.4 試験体の解放面側ひび割れ図を図-15 に示す。ここで表-4 に示したパラメータについては、付着強度「1/4 倍(0.66 N/mm²)」のケース、離散ひび割れ要素「降伏線上に配置」のケースを示している。

有限要素解析の結果、上下スタブのみ固定モデル (2 短辺自由) に比べ、4 辺固定、4 辺ピン、2 長辺固定 2 短辺ピンの場合、面外耐力を高く評価した。既往の研究より、降伏線理論で算出される終局荷重到達後も RC 床版は耐

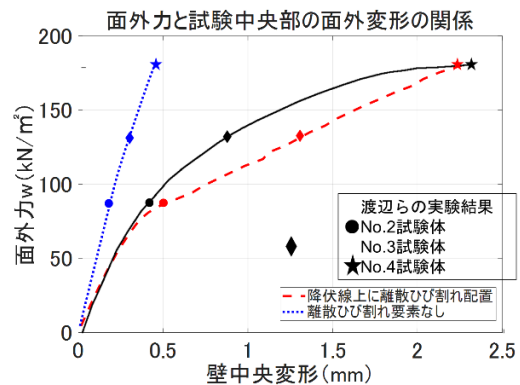


図-12 離散ひび割れ要素の有無による

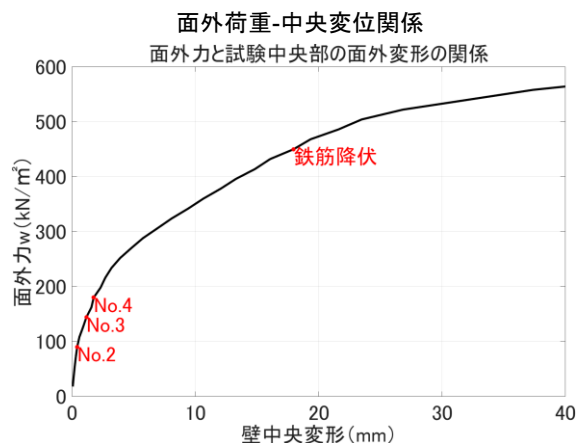


図-13 押切時面外荷重-中央変位関係 (解析値)

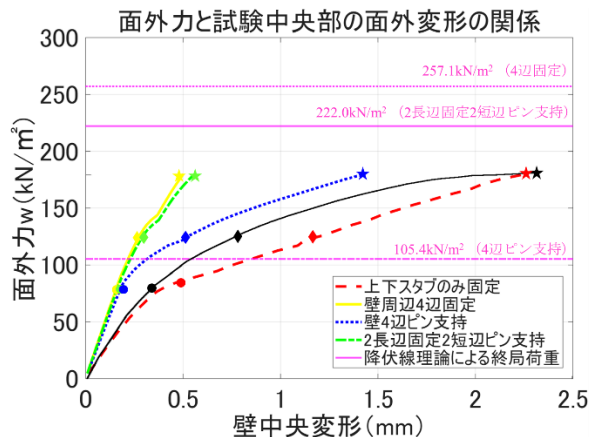


図-14 壁の周辺固定度の違いによる
面外荷重-中央変位関係

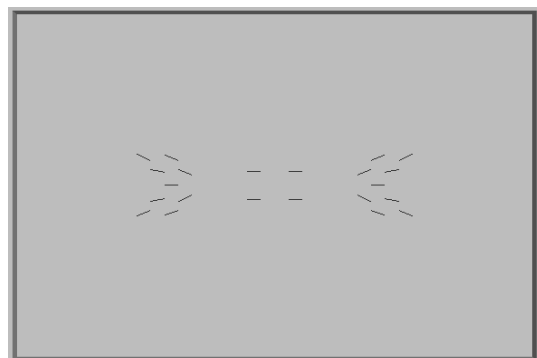


図-15 No.4 試験体ひび割れ図 (4 辺固定解析)

力上昇し、降伏線理論は実耐力を過小評価することが分かっているが、降伏線理論によって算出される4辺固定、および、2長辺固定2短辺ピン支持の終局荷重よりも実験結果を近似した有限要素解析では面外剛性が低く、過大な変形領域に到達しないと降伏線理論耐力に到達しない可能性が示唆された。

過去にRC造壁が津波外力を受けて面外変形した実事例では、壁の4周が梁や柱で囲まれていたとしても、室内空間がスラブのない吹き抜けになっているなど、周辺部材の固定度が低いと思われる場合があった。被災度区分判定基準の津波被災度評価フロー¹⁾において、降伏線上にひび割れが見られた場合は損傷度III、面外変形が大きい場合は損傷度IV、Vと判定することになっているが、今回検討対象とした試験体のように付着強度や固定度を設計値どおり計算すると、実際の面外剛性を過大評価し、面外変形を過小評価する可能性があることが示された。このことは、RC造壁の耐津波設計において、想定される面外外力に対して、残存耐震性能が大幅に低減する（過大な変形によって十分な残存耐力が発揮できない）、あるいは、目標の損傷度以下に抑えるような設計にならない可能性があることを示唆している。

6. まとめ

有限要素解析を用いて降伏線理論耐力の精査を行うとともに、面外変形評価について検討し、RC造壁の面外抵抗性能について考察した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 壁筋の付着強度が小さくなるほどRC造壁の面外方向剛性が小さくなった。本論文の検討対象試験体では、許容付着応力度の1/4倍相当の付着強度とした場合に、解析結果が実験結果を近似した。
- 2) 降伏線上に離散ひび割れ要素を配置すると、配置しない場合と比べて、面外変形性状が検討対象試験体の実験結果を近似した。
- 3) 付着強度や固定度を設計値どおり計算すると、実際の面外耐力を過大評価あるいは面外変形を過小評価する可能性があることが示された。すなわち、RC造壁の耐津波設計において、想定される面外外力に対して十分な耐力が発揮できない、あるいは、目標の損傷度以下に抑える設計にならない可能性があることを示唆している。ただし、本論文で得られた結果はあくまで限定的な条件に対する結論であり、決して十分条件ではない。対象とする壁部材の周辺部材固定状況や鉄筋付着強度の与条件を十分吟味した構造解析が極めて重要である。

謝辞

本研究は科学研究費 基盤研究(B) (課題番号:23K26242)の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：2015年改訂版再使用の可能性を判定し、復旧するための震災建築物の被災度区分判定基準及び復旧技術指針，2016.3
- 2) 篠崎裕生，樋口昇，三上浩：等分布荷重を受けるRC板の耐荷挙動に与える支持条件の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.1339-1344，2008.7
- 3) 小幡昭彦，西田哲也，小林淳：面外荷重を受けるRC造外壁の終局耐力計算法に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.2，pp.949-954，2014.7
- 4) 渡辺英義，宇賀田健，大河内靖雄，梅木芳人：原子力施設RC床スラブ面内せん断性状に関する実験研究，日本建築学会構造系論文集，第81巻，第729号，pp.1913-1920，2016.11
- 5) Johansen, K.W.：“Brudlinieteorier”，Kopenhagen，1943
- 6) 東洋一：鉄筋コンクリートスラブの降伏線理論と終局耐力，コンクリートジャーナル，Vol.6，No.10，pp.40-49，1968.10
- 7) 伊藤忠テクノソリューションズ：コンクリート構造物非線形有限要素法解析プログラムFINAL，Ver.11，2019.8
- 8) 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，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp.153-154，2023.9
- 9) 長沼一洋：平面応力場における鉄筋コンクリート板の非線形解析モデル，鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究(その1)，日本建築学会構造系論文報告集，第421号，pp.39-48，1991.3
- 10) 長沼一洋：三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集，第474号，pp.163-170，1995.8
- 11) 出雲淳一，他：面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル，コンクリート工学論文，No.87.9-1，pp.107-120，1987.9
- 12) 一般社団法人日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2018
- 13) 高瀬裕也，和田俊良：ひび割れ面のせん断応力伝達を考慮した鉄筋コンクリート造骨組部材の解析モデル，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.2，pp.55-60，2011.7