

論文 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

小幡 昭彦*1・西田 哲也*2・小林 淳*2

要旨: 本論文では、東北地方太平洋沖地震における津波被害で見られた RC 造外壁の崩壊事例を受けて、面外より荷重を受ける RC 造外壁の終局耐力を算出することを目的とし、既往実験と有限要素法解析および曲げ降伏線理論における四辺拘束平板の終局耐力計算法による比較検討を行った。面外より荷重を受ける RC 造外壁では、変形に応じて面内に二次的に発生する圧縮軸力が面外方向終局耐力に大きな影響を与える。本論文では、有限要素法解析を用いて面内圧縮軸力の定量的傾向を把握し、曲げ降伏線理論を用いた終局耐力計算方法に反映させた。

キーワード: RC 造外壁, 有限要素法解析, 降伏線理論, 終局耐力計算

1. 研究の背景・目的

本論文は、東北地方太平洋沖地震における津波被害で見られた RC 造外壁の崩壊事例を受けて、面外より分布荷重を受ける RC 造外壁の終局耐力の計算方法について検討することを目的とする。

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震において、地震動による構造被害に比べ、地震が引き起こした津波による被害が圧倒的に大きく、衝撃的であったと言える。著者らは、東北地方太平洋沖地震において特に大きな津波被害を受けた地域に建つ RC 造外壁を対象に調査を行った。写真-1 に本調査で対象とした RC 造外壁の被害状況の一例を示す。本調査で対象とした RC 造外壁では崩壊範囲が幅、高さともに等しく、一辺が壁幅に等しい正方形形状の崩壊をしている。その崩壊の状況は凄まじく、壁面に対して面外方向からの津波により構面が広く穿孔され、崩壊していた。仮に一般的な RC 造建物が津波を受けた場合、窓などの大きく開いた開口部から津波が侵入し、内部空間が海水で満たされる。そのような状態であれば、内部と外部の浸水圧力の差が大きく生じないため、RC 造外壁に損傷が生じることは稀である。一方で、港湾倉庫等の開口が少ない RC 造建物については、津波に対して内部空間が密閉されている状態を維持することが多い。そのため、RC 造の外壁が浸水圧力に抗しきれなくなり、結果的に外壁の面外方向への崩壊を引き起こす。本研究では、このような RC 造外壁の被害経験から RC 造外壁の耐津波設計に資する終局耐力計算法を提案することを最終目標とする。

本論文では、有限要素法解析を用いて津波被害を受けた RC 造外壁の終局耐力時挙動をシミュレートすると同時に、設計法を念頭に入れた簡易な終局耐力計算法の検討を行うことを目的とする。終局耐力計算法を検討するに当たり、まず面外より荷重を受ける四辺拘束平板の計算方法についての知見を整理するところから始めた。面

外方向より津波荷重を受ける外壁の終局耐力については、一般的な床スラブの終局耐力計算等に用いる四辺拘束平板の曲げ降伏線理論を用いた終局耐力計算方法を応用することができると考えられる。また、これらの床スラブの終局耐力計算に関わる既往の研究では土橋らによる一連の研究結果^{1)~3)}があり、実験的な検討がなされている。本論文では、まず研究の足がかりとして、有限要素法解析を用いて土橋らの実験結果との比較を行い、作成した有限要素法解析モデルの妥当性を確認した。その後、上記の解析モデルを使用し、RC 造外壁の面外方向終局耐力に大きな影響を与えられられる面内圧縮軸力の傾向を検討し、四辺拘束平板の曲げ降伏線理論を用いた終局耐力計算方法に反映させた。

2. 曲げ降伏線理論を用いた RC 造壁終局耐力計算方法

RC 造外壁の崩壊が面外方向曲げ変形によるものであると仮定し、一般的な床スラブの終局耐力計算等に用いる降伏線理論による四辺拘束正方形板の終局耐力計算を行う。図-1 に降伏線による崩壊機構を示す。荷重は簡単のため等分布荷重を想定し、系の内力仕事と外力仕事との釣り合いから等分布荷重 w を決定する。RC 造外壁の降伏線による単位長さ当たりの終局曲げモーメント M_{p0} は次式で与える。



写真-1 RC 造外壁の被害状況の一例

*1 秋田県立大学 建築環境システム学科 助教 (正会員)

*2 秋田県立大学 建築環境システム学科 教授 (正会員)

$$M_{p0} = 0.9 a_t \cdot \sigma_y \cdot d \quad (1)$$

ここに、 a_t は引張側鉄筋の断面積、 σ_y は引張側鉄筋の降伏応力度、 d は圧縮縁から引張鉄筋までの距離を示す。

内力仕事 W_{in} は各降伏線による内力仕事の総和となるため、四辺拘束正方形板の場合、式(2)のようになる。外力仕事 W_{out} は等分布荷重 w を用いて、式(3)で与えられる。外力仕事は内力仕事の総和と等しいため、式(2)および式(3)より、終局時の等分布荷重 w は式(4)のように求めることができる。

$$W_{in} = 16M_{p0} \cdot \delta_0 \quad (2)$$

$$W_{out} = wL^2 \frac{\delta_0}{3} \quad (3)$$

$$w = \frac{48M_{p0}}{L^2} \quad (4)$$

3. 既往の実験報告に関する有限要素法解析の妥当性の検討

有限要素法モデルの妥当性を検討する為、既往文献による四辺拘束 RC 造床スラブの面外 9 点載荷実験を再現する三次元有限要素解析モデルを用いた解析を行った。解析アプリケーションには Ansys version 11.0 を用いた。

3.1 既往実験の試験体における有限要素法解析モデルの概要

面外荷重を受ける四辺拘束平板の既往研究として、土橋による四辺拘束 RC 造床スラブを対象に行った面外 9 点集中荷重の載荷実験がある^{1),2)}。図-2に土橋らの実験概要の一例を示す。土橋らの実験の目的は周辺を梁で補剛した床版について理論式における終局強度と実験終局強度との対応を検討することである。実験床版は柱付き囲型補剛フレームとコンクリート床版を一体として打設したもので、9 枚一組として作成されている。床版の鉄筋には溶接金網を用い、コンクリートには最大寸法 10mm の粗骨材と普通ボルトランドセメントが使用されている。載荷は補剛梁交差部 4 隅の柱に埋め込んだアンカーボルトに H 形鋼梁を取り付け、各辺の 4 等分点にオイルジャッキを設置した 9 点荷重である。

四辺端部を梁で拘束された RC 造平板では、変形に応じて面内に二次的に生じる圧縮応力によって終局耐力が曲げ降伏線を使用した終局耐力と比較し何倍にも大きくなるのが既往の研究より指摘⁴⁾されている。土橋らもそれらの既往研究に倣い、Johansen の提案した方法⁵⁾に圧縮応力の修正を加えたモデル、修正 Park 法⁶⁾等の計算を行っている。

表-1 に解析モデルの諸元を示す。本解析では土橋らが実験で用いた試験体のうち、配筋がシングルで厚さ中央に配置した試験体 2 体を対象とした。二つのモデルは鉄筋の寸法・ピッチは同等であるが、モデル A に比べて

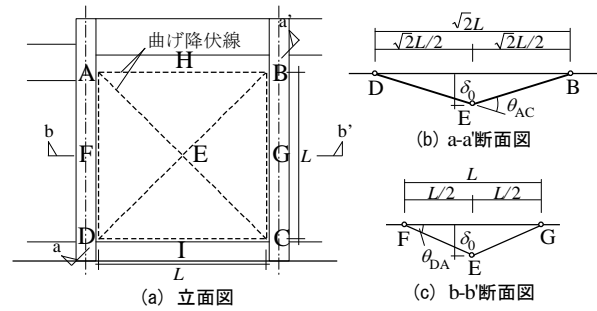


図-1 降伏線による崩壊機構

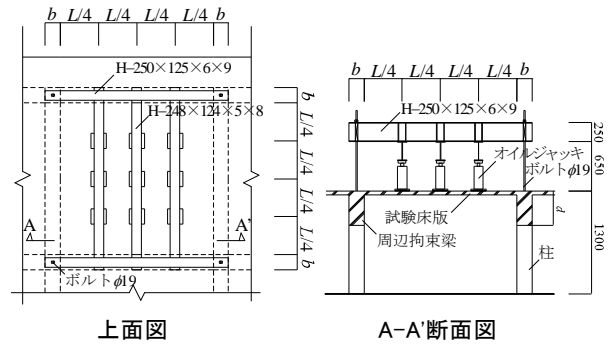


図-2 土橋ら^{1),2)}による四辺拘束 RC 造床スラブ実験概要

表-1 解析モデル諸元

モデル	辺長 $L/2 \times L/2$ (mm × mm)	板厚 t (mm)	周辺拘束梁断面 $b \times d$ (mm × mm)
A	1000 × 1000	52.2	300 × 750
B	600 × 600	41.4	450 × 900

表-2 土橋らの実験における材料特性

モデル	コンクリート			鉄筋		
	圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	引張強度 σ_T (N/mm ²)	ヤング係数 E_c (N/mm ²)	配筋	降伏点 σ_y (N/mm ²)	ヤング係数 E_s (N/mm ²)
A	33.1	3.3	2.37×10^4	4φ	519.4	2.05×10^5
B	22.5	2.2	2.17×10^4	@100	548.8	

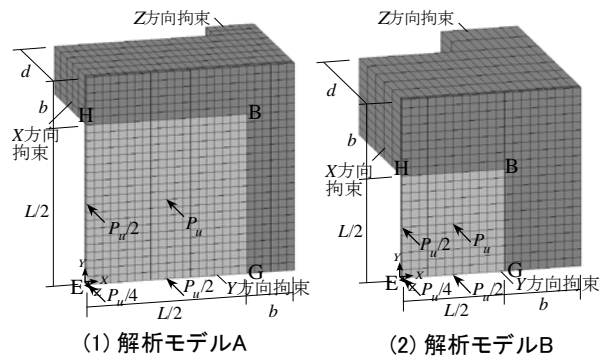


図-3 解析モデル概要

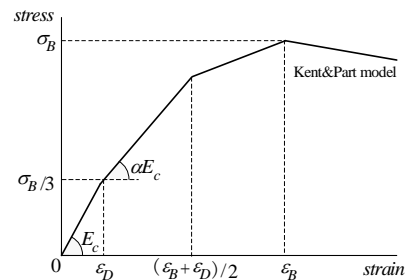


図-4 コンクリート材料の材料構成則

モデルBは平板面積が小さく、鉄筋本数が少ない。また、モデルAに比べてモデルBは周辺拘束梁の断面が大きい。ため、拘束の効果が比較的高いと考えられる。表-2に土橋らの実験概要より得られる各試験体の材料特性を示す。

図-3に解析モデルの概要を示す。解析モデルは正方形板と周辺拘束梁の1/4をモデル化した軸対称モデル(図-1のEGBHに相当)である。正方形板のコンクリート部分を6面体8節点コンクリート要素とし、鉄筋は正方形板にピッチ s で配置したトラス要素でモデル化した。コンクリートの要素分割は正方形板面内方向には一辺が $s/2$ の正方形となるようにし、厚さ方向には板厚 t の2分割とした。コンクリート要素と鉄筋のトラス要素は節点を共有する。周辺拘束梁は正方形板の面内に発生する圧縮力を再現するため幅、せいを土橋らの実験の試験体と等しく、ヤング係数をコンクリート材料と等しい完全弾性体としてモデル化した。材料特性値は表-2に示されている土橋らの実験における材料特性値を用いた。コンクリート材料の材料構成則を図-4に示す。コンクリート材料については、圧縮領域は圧縮強度 σ_B 、ヤング係数 E_c より応力度-ひずみ関係を多直線近似し、圧縮強度時ひずみ ε_B を0.2%、圧縮軟化域はKent & Park式⁷⁾とした。図-4における二次勾配のヤング係数比 α については、モデルAでは $\alpha=0.75$ 、モデルBで $\alpha=0.60$ とした。引張領域では引張強度 σ_T を採用した。鉄筋材料については表-2の材料特性値降伏点 σ_s 、ヤング係数 E_s を用いた完全弾塑性型とした。荷重は図のように各辺4等分点に点荷重として与え、荷重stepに応じて徐々に増加させる。変位は正方形板中央点Eの z 方向変位より算出した。

3.2 解析結果

図-5に有限要素解析結果の載荷荷重-中央変形角関係を土橋らの実験結果と比較して示す。図-5の縦軸である載荷荷重は、9点載荷における荷重の総和を正方形板の面積で割った値、横軸の正方形板中央変形角は平板中央点Eにおける z 方向変位を平板の一辺の長さ L で除した値である。図-5中の太一点鎖線は曲げ降伏線理論による終局耐力計算結果を示しており、2章および図-1に示す崩壊機構を用いて計算を行っている。ただし、本研究では土橋らの実験結果および有限要素解析結果との比較を行うため載荷条件を各辺4等分点に9点集中荷重としていることより、9点集中荷重時における外力仕事 PW_{out} および終局耐力時における1点あたりの載荷荷重 P_u は以下の式によって求めている。

$$PW_{out} = 5P_u \cdot \delta_0 \quad (5)$$

$$P_u = \frac{16}{5} M_{p0} \quad (6)$$

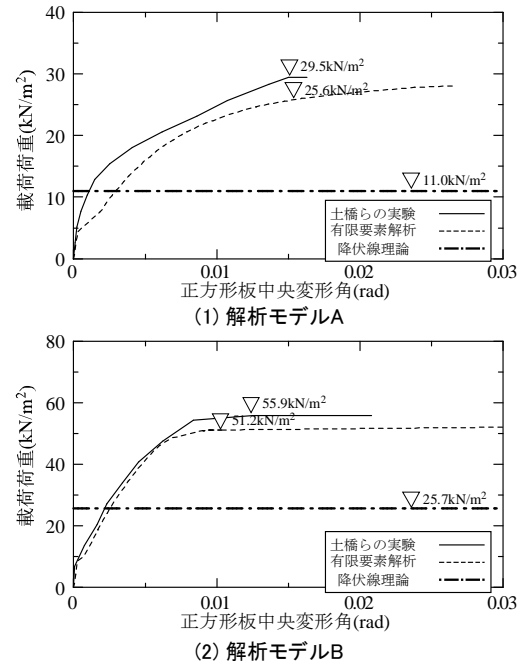


図-5 有限要素法解析結果荷重-変位関係

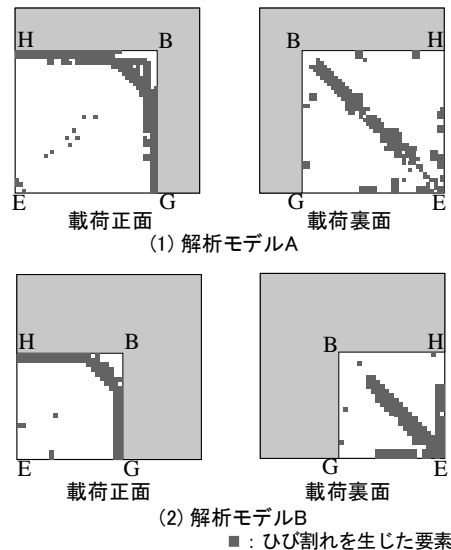


図-6 有限要素法解析による耐力時におけるひび割れ図

図-5より有限要素解析結果では、載荷初期段階でひび割れが集中して変位が増加する点があるものの、それ以外については実験結果と比較的良好な対応を示している。図-5中の下向き三角は各実験、計算結果による耐力点を示している。本検討における有限要素法解析の耐力点は、土橋らの実験結果における最大耐力時変形角に最も近い荷重増分stepでの値を採用した。解析モデルBの有限要素法解析結果の耐力点は、土橋らの実験結果耐力点に比べてやや変形角が小さい荷重増分stepを採用している。これは、この荷重step以降の変位増分が大きく増加し飛び移り現象を起こしているため、本研究ではこの荷重stepを耐力点と判断した。有限要素解析結果の耐力点における耐力は、土橋らの実験結果に対して、モデルA

で 0.87 倍, モデル B においては 0.92 倍となっており, 約 1 割程度の差が生じている。一方で曲げ降伏線理論より求めた終局耐力は, 有限要素解析結果, 土橋らの実験結果ともに大きく下回っており, 安全側の評価を与えているとはいえない。

図-6 に有限要素法解析による耐力時における平板のひび割れ図を示す。ひび割れ図より, 有限要素法解析によるひび割れ領域は曲げ降伏線理論を用いた終局耐力計算方法で仮定した降伏線の位置とおおむね一致しており, これは有限要素法解析と降伏線理論の崩壊機構が同じであることを示している。曲げ降伏線理論より求めた終局耐力が有限要素法解析結果の終局耐力と比べて低かった理由については, 前述した平板面内に働く圧縮応力が関係していると考えられる。曲げ降伏線理論を用いてより精度の高い終局耐力値を得るためには, 面内圧縮軸力の影響を考慮する必要がある。

4. 四辺拘束平板の面内圧縮軸力の検討

3 章において, 有限要素法解析の妥当性が確認できたと同時に, 曲げ降伏線理論より求めた終局耐力について面内圧縮軸力の影響を考慮する必要がある事が示された。本章では, 有限要素法解析より四辺拘束平板の面内圧縮軸力を算出し, 曲げ降伏線理論の終局曲げモーメントにその影響を考慮する方法について述べる。

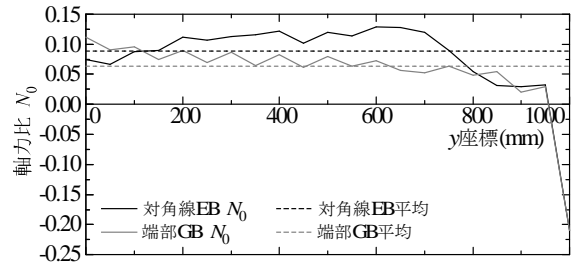
4.1 有限要素法解析による降伏線上の面内圧縮軸力の算出

前章で使用した解析モデル A 及び B を用いて, 有限要素法解析から平板面内の降伏線上に発生する圧縮応力の算出を行う。各解析モデルの降伏線に相当する平板端部 GB および平板対角線 EB 上にある節点の耐力点時における応力度解をそれぞれ解析より算出し, 平板内の座標位置との関係を図-7 に示す。有限要素法解析モデルでは, 平板内の同じ x, y 座標において厚さ方向に複数の節点を有するため, 各節点の支配領域を考慮した計算が必要になる。図-7 中の横軸は平板端部 GB および平板対角線 EB 上の節点位置の y 座標を示しており, 縦軸は平板端部 GB および平板対角線 EB 上の各位置での軸力比 N_0 を示す。軸力比 N_0 は以下の式で表される。

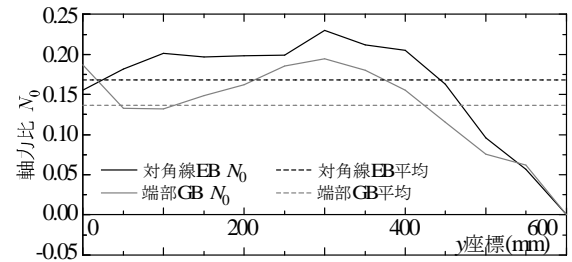
$$N_0 = \frac{\sum d_{fi} \cdot c \sigma_{xi}}{t \cdot \sigma_B} \quad (7)$$

N_0 : 軸力比
 d_{fi} : 節点の支配厚さ (mm)
 $c \sigma_{xi}$: 節点の x 方向応力度 (N/mm²)

図-7 については平板端部 GB および対角線 EB の x 方向応力度の結果を示しているが, 系の対称性より, 平板端部 HB および対角線 EB の y 方向応力度についても



(1) 解析モデルA



(2) 解析モデルB

図-7 各解析モデルの降伏線上の節点における軸力比

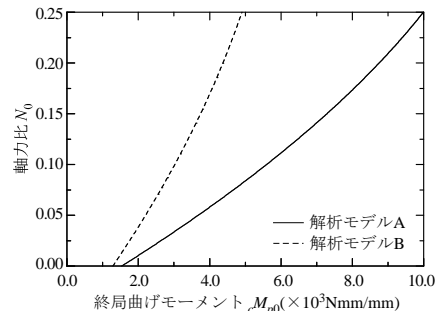


図-8 軸力比-終局曲げモーメント関係

同じ結果が得られる。

図-7 より平板端部 GB における軸力については, 鉄筋が配置されている節点においてその他の節点より応力度が低い値を示しており, 鉄筋配置の影響を大きく受けていることがわかる。一方で, 対角線 EB についてはその影響は少ない。四辺拘束平板の隅部にあたる点 B においては軸力比の値が負の値を示している。このことについては詳細は不明だが, 図-6 のひび割れ図の点 B 付近を観察すると, 隅部についてはひび割れが生じておらず, 隅部の面を取る様な形でひび割れが伸展している事などから, 拘束梁の影響で応力状態がかなり複雑になっていると考えられる。各モデル降伏線での平均軸力比は, モデル A の平板端部 GB で 0.06, 対角線 EB で 0.09, モデル B の平板端部 GB で 0.14, 対角線 EB で 0.17 である。

4.2 面内圧縮軸力の終局耐力計算方法への適用

曲げ降伏線理論より求めた終局耐力計算方法に四辺拘束平板の面内圧縮軸力を考慮する。式(1)に示した降伏線による単位長さ当たりの終局曲げモーメント M_{p0} に軸力項を加えた終局曲げモーメントを ${}_c M_{p0}$ とし, 以下の式(8)で与える。また, 図-8 に軸力比 N_0 -終局曲げモーメント ${}_c M_{p0}$ の関係を示す。

$$M_{p0} = 0.9 a_t \cdot \sigma_y \cdot d/s + \frac{N_0 \cdot l^2 \cdot \sigma_B}{2} (1 - N_0) \quad (8)$$

本論文では、軸力比 N_0 の値は簡単のため 4.1 節で求めた平均軸力比の値を対角線 EB、平板端部 GB にそれぞれ用いた。別途、上記のように平均軸力比を用いずに各節点位置における軸力比 N_0 とその節点の支配長さをを用いて節点ごとに M_{p0} を算出する計算を行っているが、ほぼ同様の結果が得られることが解っている。

図-9 に面内圧縮軸力を考慮した降伏線理論結果を示す。面内圧縮軸力を考慮した降伏線理論結果は、面内圧縮軸力を考慮しない場合の降伏線理論結果と比べて終局耐力が約 3 倍程度まで上昇し、土橋らによる実験結果および有限要素法解析結果と比較してモデル A では近い値を示しているがモデル B では過大評価になっている。モデル B のみが過大評価となった理由については今後の検討課題である。

さらに本論文では、有限要素法解析結果より平板の変形に応じた面内圧縮軸力の推移を観察し、降伏線理論計算に当てはめ実験耐力との比較を行う。

5. 変形量に応じた面内圧縮軸力の変化

図-10 に有限要素法解析結果より求めた対角線 EB、平板端部 GB の各変形時における面内圧縮軸力を示す。図中、変形角は 1/100 までを 5 分割、1/500 刻みで示している。図-10 より、解析モデル A、B 共に変形角が増加するにつれ面内圧縮軸力は大きくなる傾向にあることが分かる。解析モデル A においては面内圧縮軸力は変形に

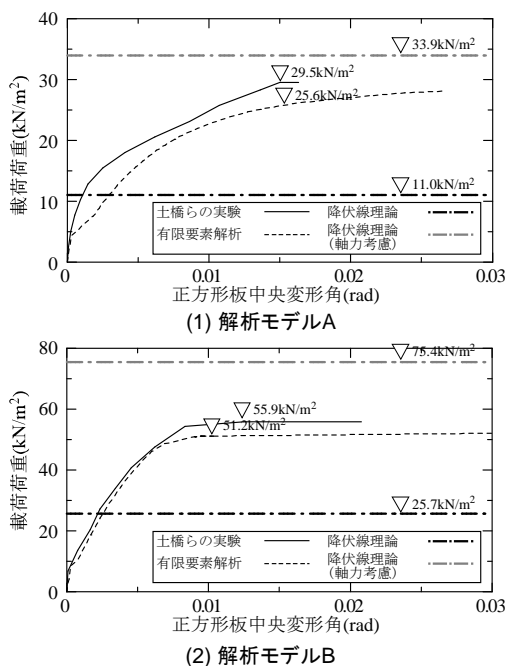


図-9 面内圧縮軸力を考慮した降伏線理論結果

応じて比例的に増加しているが、解析モデル B では変形角 0.008 以上においては面内圧縮軸力の増加量が減少し、頭打ちになっていると言える。これは、図-9 の有限要素法解析結果の載荷荷重-中央変形角関係においても変形角 0.008 程度より耐力増加量が減少していることから、同様の傾向であると判断できる。解析モデル A に比べ、解析モデル B は変形角増加量当たりの軸力比 N_0 の増加量が多い。これは解析モデル B が解析モデル A に比べて周辺梁の断面が大きいなど拘束の効果が高いことに起因すると考えられる。

図-11 に図-10 の結果より求めた各変形角時における面内圧縮軸力を考慮した降伏線理論結果を示す。図-11 より本論文の二つのモデルにおいては、曲げ降伏線による終局耐力計算に使用する面内圧縮軸力を、モデル A においては変形角 0.01 変形時軸力比、モデル B において

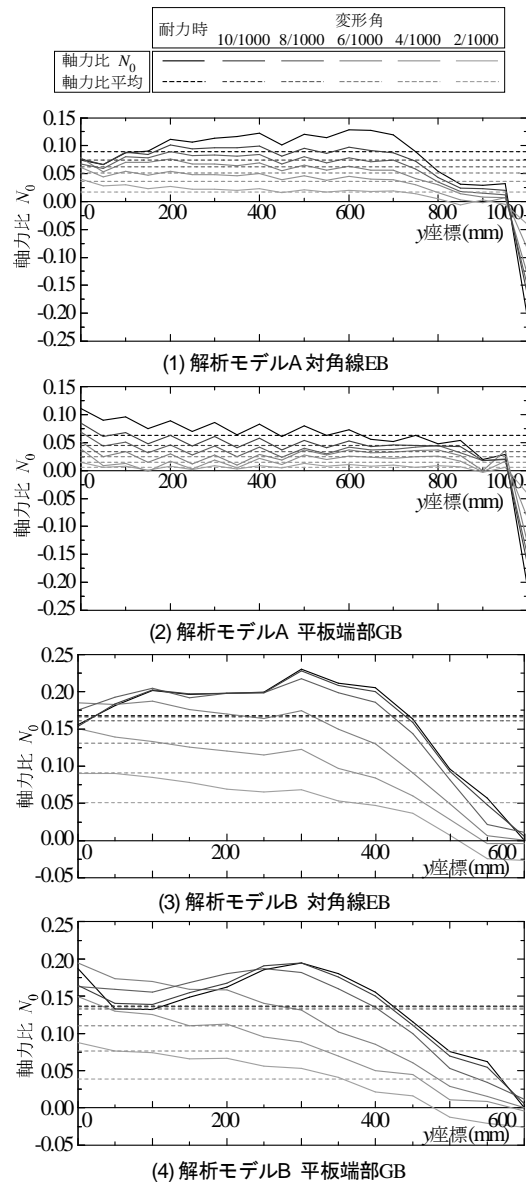
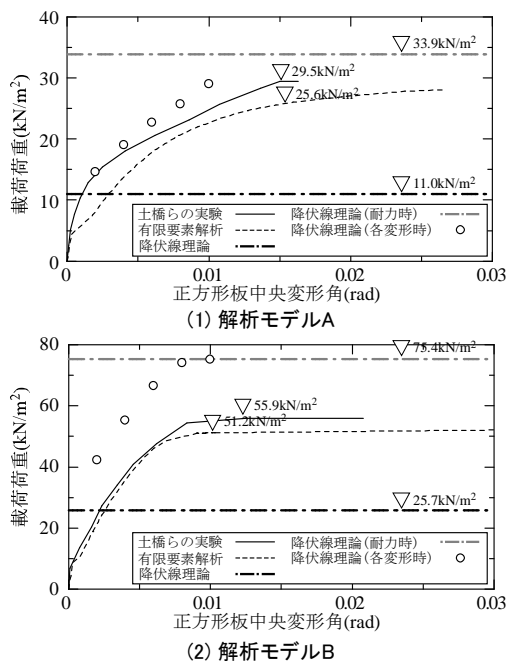


図-10 有限要素法解析より求めた各変形時における軸力



図一11 各変形角時における面内圧縮軸力を考慮した降伏線理論結果

は変形角 0.004 変形時軸力比を採用することで既往の実験結果や有限要素法解析結果の耐力と良い対応を与える事ができると言える。ただし、この変形角に関する検討は、壁面の寸法形状、拘束梁の剛性等に結果が大きく依存すると考えられ、あくまで本研究の解析モデルの範囲に限定したものである。参考のため、モデル A における変形角 0.01 変形時軸力比は対角線 EB で 0.07、平板端部 GB で 0.05、モデル B における変形角 0.004 変形時軸力比は対角線 EB で 0.09、平板端部 GB で 0.08 となっている。

6. まとめ

本論文では、東北地方太平洋沖地震における津波被害において見られた RC 造外壁の崩壊事例を受け、面外より荷重を受ける RC 造外壁の終局耐力を計算することを目的とし、有限要素法解析モデルを作成し、降伏線理論における終局耐力計算法による結果と比較検討を行った。

面外より荷重を受ける四辺拘束平板の終局耐力計算方法については、床スラブを対象として土橋らによる既往の実験的研究がなされている。本論文で作成した有限要素法解析モデルによる結果は既往実験結果と比較的良好な対応を示した。一方で、四辺拘束平板の曲げ降伏線による終局耐力計算結果は、土橋らの実験結果、本論文での有限要素法解析結果と比較して大きく下回り、良好な対応をしているとは言えない。この原因として、面外より荷重を受ける RC 造外壁では面外変形に応じて面内に二次的に圧縮軸力が発生し、終局耐力を増加させると考えられる。そこで本論文では、有限要素法解析結果より面内

圧縮軸力を定量的に算出し、その結果を用いて四辺拘束平板の曲げ降伏線による終局耐力の再計算を行った。その結果、面内圧縮軸力を考慮した降伏線理論結果は、面内圧縮軸力を考慮しない場合の降伏線理論結果と比べて終局耐力が約 3 倍程度まで増加し、土橋らの実験結果、本論文での有限要素法解析結果を上回った。また、有限要素法解析結果より平板の変形に応じた面内圧縮軸力の推移を観察し、降伏線理論計算に当てはめ実験耐力との対応を検討した。

本論文では、面外より荷重を受ける四辺拘束平板の終局耐力について、面内圧縮軸力の効果を考慮することで降伏線理論を用いて実験値耐力を予測することができる可能性を示唆した。ただし、本論文で使用した面内圧縮軸力はあくまで有限要素法解析より算出された結果を使用したものであり、RC 造外壁の耐津波設計に用いることを考慮すると、面内圧縮軸力は設計者にも簡易かつ一般化された形で表現されることが望ましい。面内圧縮軸力は壁体の寸法形状、拘束梁の剛性等に影響を受けると考えられるため、今後の研究目的として、それらを変数とした面内圧縮軸力の傾向を把握し、耐津波設計に用いるための簡略化、一般化を行う必要があると考えている。

参考文献

- 1) 土橋由造, 坂尻公也: 鉄筋コンクリート床版の終局強度について, 日本建築学会論文報告集, 第 277 号, pp.1-11, 1979.3
- 2) 坂尻公也, 日野正熙, 土橋由造: 周辺拘束方形鉄筋コンクリート床スラブの終局強度について, 日本建築学会論文報告集, 第 403 号, pp.57-65, 1989.9
- 3) 土橋由造, 上田正生: 周辺を拘束した RC 床版の圧縮膜効果について, -圧縮破壊後のコンクリートの応力逓減を考慮した材料非線形解析と実験との比較-, 日本建築学会論文報告集, 第 296 号, pp.67-76, 1980.10
- 4) A. J. Ockleston: Arching action in reinforced concrete Slabs, The Structural Engineer, Vol. 36, No. 1, 1958
- 5) Johansen, K. W.: Yield-line theory, London, Cement and Concrete Association, 1962
- 6) R. Park, W. L. GAMBLE: Reinforced Concrete Slabs, A wiley-interscience publication, 1979.12
- 7) D. C. Kent and R. Park: Flexural members with confined concrete, Journal of the Structural Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 97, No. ST7, pp.1961-1999, 1971.7
- 8) 小幡昭彦, 西田哲也, 寺本尚史, 菅野秀人, 小林淳: 有限要素法解析による面外荷重を受ける RC 造壁の終局耐力の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 構造 II, pp.87-88, 2013.8