

論文 鉄筋コンクリート造せん断壁の構造性能に端部拘束条件が及ぼす影響の検討

孫 憬玥*1・井出 彩葉*2・佐藤 真俊*3・前田 匡樹*4

要旨: 本研究では、側柱を有する耐震壁と直交壁を有する耐震壁の2種類について、端部拘束条件の違いが、事前損傷を受けた後のせん断破壊性状や構造性能に与える影響に関する検討を行った。各シリーズとも、事前損傷による顕著な耐力低下は見られず、圧縮ストラット幅や破壊性状にも大きな差はみられなかった。しかしながら、端部拘束が小さい直交壁試験体は、損傷後の剛性低下が大きく、やや耐力も小さい傾向にあった。

キーワード: 耐震壁, 端部拘束条件, 損傷度, 直交壁, せん断破壊, 構造性能低下

1. はじめに

鉄筋コンクリート造(以下、RC造)建物が地震で被災した際の被災度判定や残存耐震性能の評価は、既往の研究¹⁾で定量的に評価する方法が提案されている。しかし、耐震壁部材については損傷と構造性能低下に関する検討が乏しい。また、筆者らは2015年度~2016年度に原子炉建屋を対象としたせん断破壊先行型耐震壁(試験体SCシリーズ)において、事前に受けた損傷の大きさと壁筋比の大きさをパラメータとした静的載荷実験を行い、それらが最大耐力、剛性、減衰性能等の各構造性能に与える影響に対して検討を行った^{2), 3)}。しかし、通常原子炉建屋の耐震壁は柱の無いボックス形状であり、これらの実験では側柱による耐震壁の端部拘束効果が含まれているため原子炉建屋のボックス壁を正確に模擬できていない可能性がある。

そこで本研究では、壁部材の諸元を既往実験³⁾と同一とし、側柱を直交壁に変えたせん断破壊先行型耐震壁について静的載荷試験を行い、事前損傷の大きさが各構造性能低下に及ぼす影響に対して検討を行った。また、側柱付き壁、直交壁付き壁の実験結果の比較を行い、端部

拘束条件が事前損傷を受けたせん断破壊先行型耐震壁の各構造性能に影響の検討を行う。

2. せん断破壊先行型耐震壁の静的載荷実験

2.1 実験概要

図-1, 表-1に試験体諸元を示す。試験体は、過去に実施した側柱付き壁(図-1左)の側柱部分を直交壁に変更したH形断面の立体壁4体とした。試験体の壁筋比は、原子炉建屋を想定し、1.32%とした。また、壁板の端部拘束条件は、2015年度(SC-13シリーズ)は側柱(200mm×200mm)とし、2018年度(SF-13シリーズ)は厚さが壁板と同様の直交壁(600mm×120mm)をとした。また、SF-13シリーズの試験体はSC-13シリーズの強度と比較するため、試験体の全長を一致させている。

2.2 加力概要

各試験体の加力スケジュールを表-2に示す。試験体の加力は、本大学が所持している静的加力装置により、パラメータとなる事前損傷を与える事前加力と、全試験体共通の本加力に分けて行った。事前加力で与える最大変形角は、無損傷試験体(SC-13-D0・SF-13-D0)の荷重変形

表-1 試験体諸元

年度	試験体名	壁							柱/直交壁			
		壁厚(mm)	全長(mm)	高さ(mm)	縦筋・横筋	鉄筋比(%)	σ_B (N/mm ²)	M/QD	拘束条件	断面(mm×mm)	主筋/縦筋	帯筋/横筋
2015	SC-13-D0	120	1800	1000	D6@40 (SD295) Double	1.32	40.2	0.29	側柱付き	200×200	12-D16 (SD345)	2-D10 (SD345) @60
	SC-13-DI						41.2					
	SC-13-DII						41.6					
	SC-13-DIII						41.3					
	SC-13-DIV						41.6					
2018	SF-13-D0	120	1800	1000	D6@40 (SD295) Double	1.32	30.0	0.29	直交壁付き	600×120	D6@40 (SD295) Double	D6@40 (SD295) Double
	SF-13-DI						32.7					
	SF-13-DII						32.4					
	SF-13-DIII						33.2					
	SF-13-DIV						32.7					

*1 東北大学 工学研究科 都市・建築学専攻 博士課程前期 (学生会員)

*2 東北大学 工学部 建築・社会環境工学科

*3 東北電力(株)

*4 東北大学 工学部研究科 都市・建築学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

関係や破壊過程の状況を参考に決定した。但し、損傷度 IV を受ける試験体 (SC-13-DIV・SF-13-DIV) それぞれの事前加力は、SC-13-DII・SF-13-DI 試験体の「事前加力 + 本加力(損傷度 IV まで)」とし、兼用した。これは SC-13 シリーズの結果により、壁鉄筋が降伏する前の損傷を受けても、構造的な性能にほとんど影響はないと考えたためである⁴⁾。なお、損傷度の定義については文献¹⁾、側柱付きの試験体については文献³⁾を参照されたい。

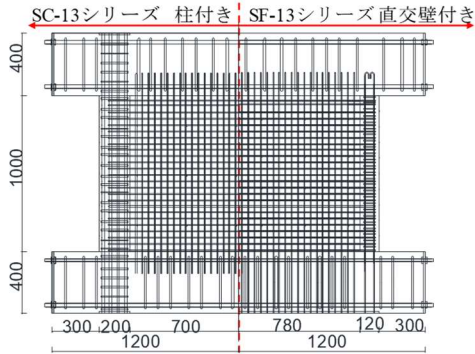


図-1 試験体配筋図

表-2 加カスケジュール

事前加力																
目標部材角R/(1000rad.)とサイクル数																
試験体	±0.25	±0.50	±0.75	±1.0	±2.0	±3.0	±4.0	±6.0	±4.0	±3.0	±2.0	±1.0	±0.75	±0.50	±0.25	
SC-13-D0																
SF-13-DI	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
SF-13-DII	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
SF-13-DIII	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
SF-13-DIV	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

本加力																
目標部材角R/(1000rad.)とサイクル数																
試験体	±0.25	±0.50	±0.75	±1.0	±2.0	±3.0	±4.0	±6.0								
SC-13-D0									なし							
SF-13-DI	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
SF-13-DII	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
SF-13-DIII	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
SF-13-DIV	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

3. 実験結果

3.1 荷重-変形関係

柱付き壁と直交壁付き壁試験体の荷重-変形関係をそれぞれ図-2、図-3に示す。層間変形角は、水平変形と壁板内法の比としている。ひび割れの発生時点は、SC-13-D0は0.05%サイクル時、他は0.025%サイクル時であった。柱付き壁SC-13試験体は、0.4%サイクル時に柱主筋が降伏し始め、その後の0.6%サイクル時に壁板縦筋・壁横筋が降伏し始めた⁴⁾。一方で、直交壁付き壁のSF-13試験体は0.3%サイクル時に直交壁縦筋が降伏し始め、その後0.6%サイクル時に壁板縦筋・壁横筋が降伏し始めた。グラフに示した赤点線は、材料実験データに基づくせん断強度(靱性指針⁵⁾)の計算結果である。両シリーズの無損傷試験体最大耐力の実験値をみると、SFシリーズはSCシリーズの8割程度であるが、これはSFシリーズのコンクリートの実圧縮強度 σ_B が低かったことによると考えられ、形状の差はそれほど大きくないと思われる。

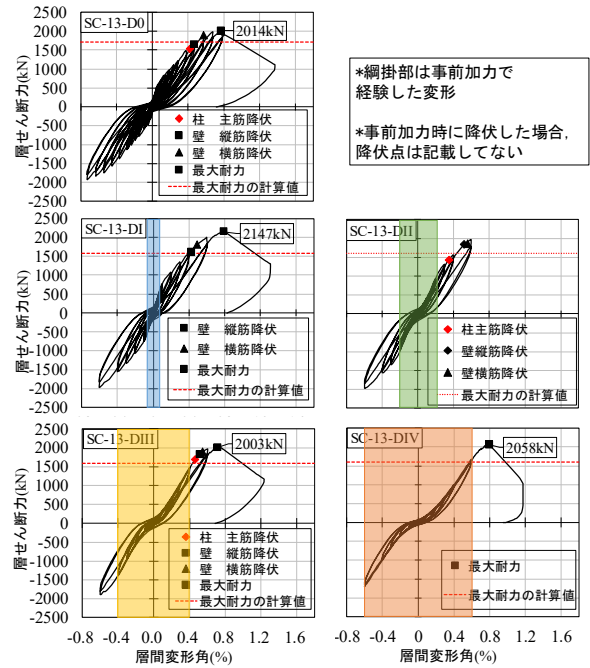


図-2 荷重-変形関係(SC-13シリーズ側柱付き壁³⁾)

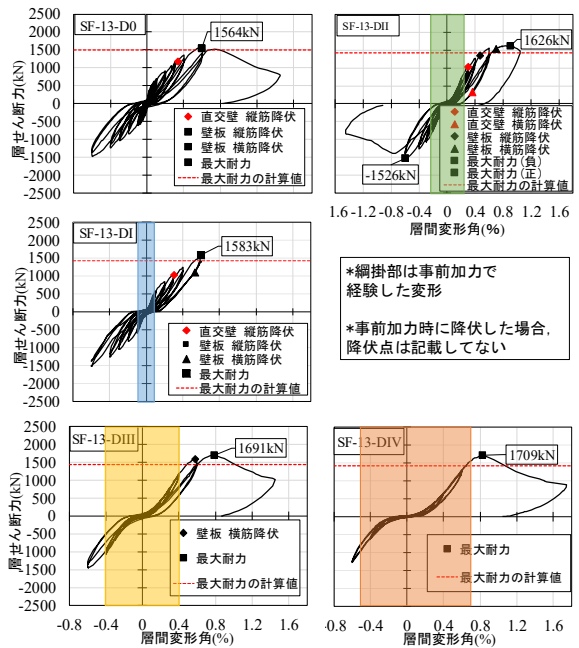


図-3 荷重-変形関係(SF-13シリーズ直交壁付き)

3.2 最終破壊状況

両シリーズの試験体の破壊状況をそれぞれ図-4、5に示す。SC-13シリーズ(側柱付き)の、無損傷、損傷度I~III程度の試験体は、壁板の対角方向のひび割れが開き、側柱と壁板の同時圧壊に至った。SC-13-DIVは、壁板内法高さのおよそ半分の位置にあるひび割れから、反対側の壁隅にかけてひび割れが開き、壁板にすべり破壊が生じた⁴⁾。また、SF-13シリーズは、事前損傷レベルによらず、壁板にせん断すべり破壊が生じた。ただし、直交壁の圧壊が見られなかった。これは、直交壁による壁板の

拘束効果が弱く、壁板の耐力が劣化したためと考えられる。以上の結果から、端部の拘束条件が最終破壊状況に与える影響があると言える。

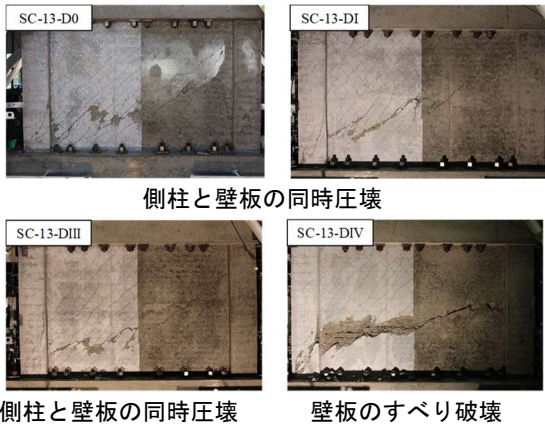


図-4 最終破壊状況 (SC-13 シリーズ 側柱付き)

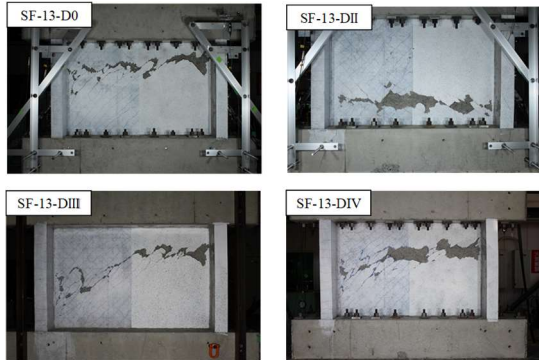


図-5 最終破壊状況 (SF-13 シリーズ 直交壁付き)

4. 端部拘束条件が損傷後の構造性能低下へ及ぼす影響の検討

4.1 最大耐力、層せん断力へ及ぼす影響の検討

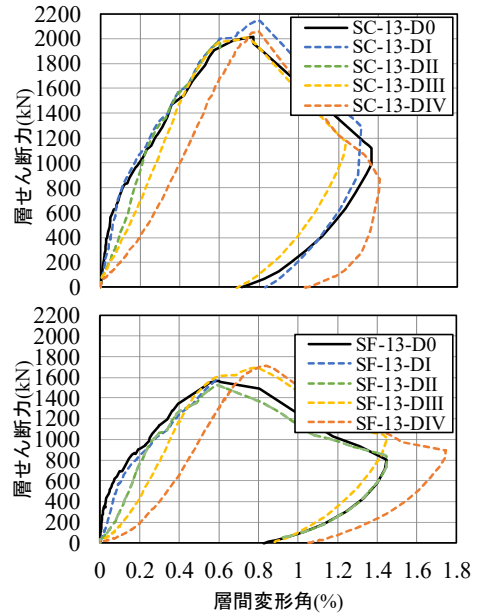
(1) 最大耐力、層せん断力の比較

図-6 に両シリーズの試験体の荷重-変形関係包絡線を示す。図-7 に層間変形角に対する層せん断力比の推移を示す。層せん断力比は、式(1)に示すように、同一なサイクルの際に、事前損傷を受けた試験体の本加力における層せん断力と無損傷試験体の層せん断力の比と定義した。

$$\text{層せん断力比} = \frac{\text{有損傷試験体のせん断力 } Q_D}{\text{無損傷試験体のせん断力 } Q_{D0}} \quad (1)$$

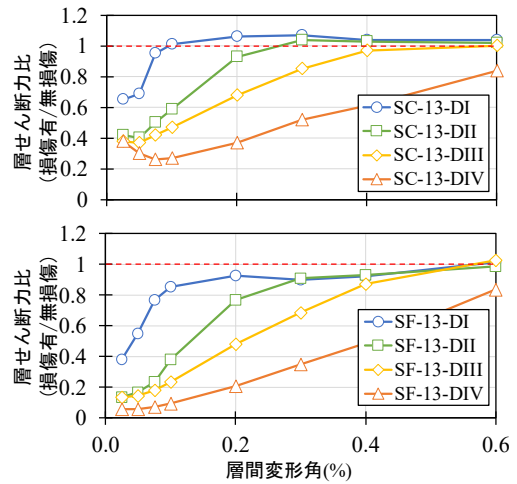
図-6 をみると、最大耐力については、両シリーズとも事前損傷レベルによる影響はほとんど見られなかった。

両シリーズの層せん断力比の推移をみると、事前の損傷を受けたため、両シリーズの剛性が低下し、壁板が負担できるせん断力が下がる。しかし、未経験変形に近づくにつれ層せん断力比の値が徐々に上がり、無損傷試



(上: SC-13 シリーズ 下: SF-13 シリーズ)

図-6 荷重-変形関係包絡線



(上: SC-13 シリーズ 下: SF-13 シリーズ)

図-7 層せん断力比の推移

験体との差が小さくなることが確認された。また、式(2)により層せん断力比の比較を行い、事前損傷による各年度試験体の影響を検討する。(図-8 参照)

$$\text{層せん断力比の比} = \frac{\text{SF-13 各損傷度試験体のせん断力比}}{\text{SC-13 各損傷度試験体のせん断力比}} \quad (2)$$

小変形のサイクルにおいて、事前損傷度の大きさに対し、直交壁試験体は負担できるせん断力の低下が顕著にみられる。これは、側柱と比較し、直交壁が壁板を拘束する効果が少ないためと考えている。更に、未経験変形に近づくにつれ、この影響はほとんど少なくなることがわかる。

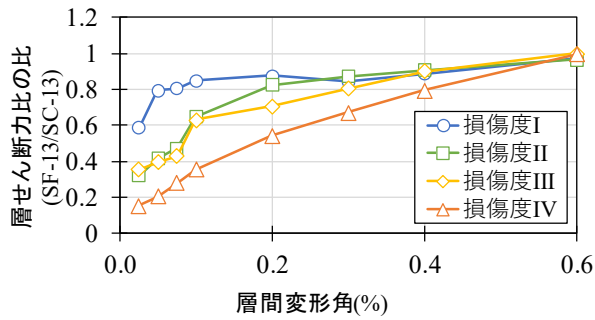


図-8 両シリーズの層せん断力比の比

(2) 圧縮ストラット幅

図-9 に、両シリーズの無損傷試験体のサイクルにおける変形割合を示す。有損傷の試験体は、無損傷と大差が見られなかったため、本論文では無損傷試験体のデータのみを示した。各シリーズの変形割合の推移結果をみると、全試験体でせん断変形が支配的であることが分かる。曲げ、せん断変形成分の計算方法は、参考文献⁶⁾を参照されたい。

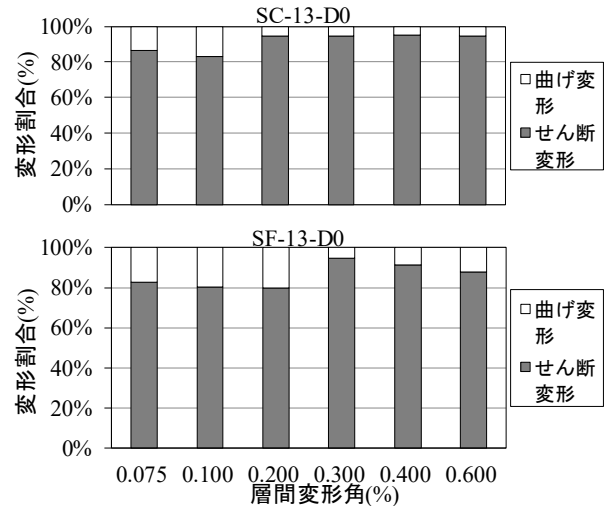
圧縮ストラット幅 (図-10) を計算するため、まず図-11 に示す壁板の対角方向に取り付けた各変位計から対角方向のひずみを計算する (青色: 正加力, オレンジ色: 負加力)。壁板内の圧縮ひずみ分布をできるだけ正確に計測するため壁板の対角方向の6区域に分けて計測をした (図-12)。SF シリーズ無損傷試験体の 0.4% サイクルの時、区域②を例として、応力度の計算を説明する (図-12)。箇所 C は変位計を設置するボルトが埋め込んである箇所なので、この箇所のひずみは両側の変位計で測ったひずみ度の平均値を使用した。ほかの箇所のひずみは変位計1個で測ったデータより算出する。このようにして求めた各位置のひずみ度から、コンクリート圧縮試験で得た応力度-ひずみ関係と対応させ、各サイクルの各箇所の応力度を求めた (図-13)。応力度-ひずみ関係は材料試験の圧縮強度 σ を用いる場合と、有効係数 ν を用いて低下させた場合の2通りとした。

そして、上述のとおり求めた各区域の応力度分布を、その区域内の最大応力度 σ_{max} で一定と仮定した場合の圧縮ストラット幅の等価な幅を、圧縮ストラット幅 W として式(3)により算出した。各サイクルの各区域のストラット幅の評価手順を図-13 に示す。

$$\int \sigma dx \times t = \sigma_{max} \times t \times W \quad (3)$$

ここで、 σ : 各箇所の応力度(N), t : 壁板の厚さ, σ_{max} : 各区域の最大応力度(N/mm²), W : 圧縮ストラット幅(mm)。

図-14 の結果をみると(各サイクルのストラット幅分布と応力度分布はほぼ同じなので、本論文では SF-13-D0 の 0.4%・0.6% サイクルの結果のみ説明する), 区域①・⑥は壁板の隅に設置するので、変位計で測った範囲は少ない。また、区域②~⑤のストラット幅の大きさと最大



上: SC-13-D0(側柱付き) 下: SF-13-D0(直交壁付き)

図-9 変形割合推移図

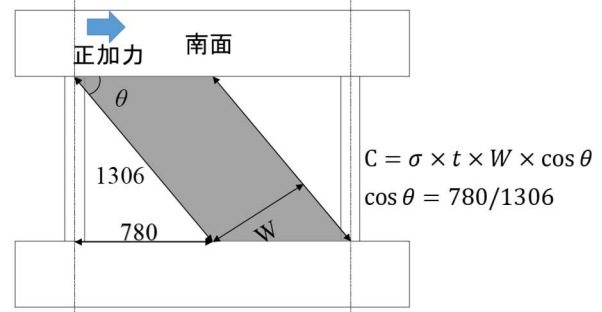


図-10 ストラット幅応力

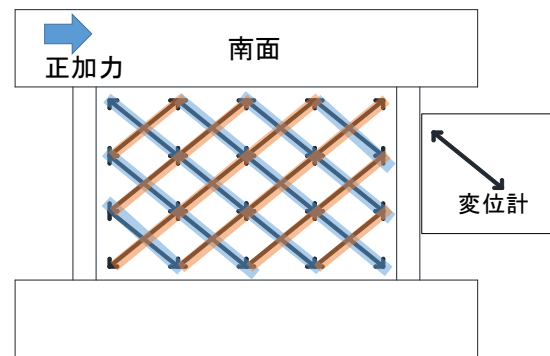


図-11 変位計 (壁板せん断変形測定) 位置図

応力度はほぼ一致なので、各サイクルのストラット幅とストラット幅応力度を区域②~⑤の平均値とする。各年度の結果を図-15 に示す。

両シリーズのストラット幅の算定結果(本加力のみ)を図-15 に示す。事前に受けた損傷の大きさ関わらず、両シリーズのストラット幅に大差はほとんどなく、大きさは 0.1%~0.6% サイクルの場合、650mm~800mm 程度である。また、本項で説明したストラット幅の計算方法の精度を検証するため、算出したストラット幅から、式(4)で両シリーズの層せん断力と実験値を比較する。また、試験体が大きな損傷を受けてコンクリートのせん断

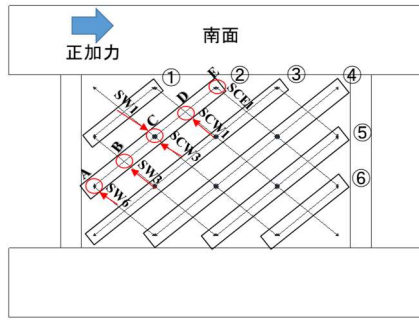


図-12 区域位置図

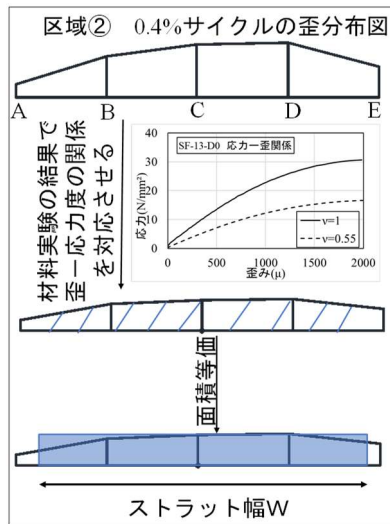


図-13 ストラット幅の計算手順

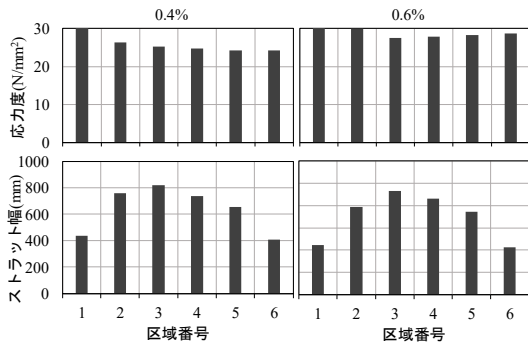


図-14 応力度・ストラット幅分布

ひび割れなどが発生した場合、コンクリートの圧縮強度が低下することが知られている。この低下した応力度を正確に測定することはできないが、参考のため AIJ 靱性指針の圧縮強度有効係数⁵⁾ ν を乗じ低減させて計算したせん断応力と低減係数 $\nu=1$ とした場合の 2 通りの層せん断力を計算し図-16 に示した。

$$C = \nu \times \sigma_{ave} \times t \times W_{ave} \times \cos \theta \quad (4)$$

ここで、 C : 層せん断力の計算値、 σ_{ave} : 区域②~⑤応力度の平均値、 ν : コンクリート圧縮強度の有効係数、 $\nu=0.70-\sigma_B/200$ 、 σ_B : コンクリート圧縮強度(N/mm²)、 t : 板の厚さ、 W : 区域②~⑤圧縮ストラット幅(mm)の平均値、 θ : 圧縮ストラット幅の角度(図-10)。

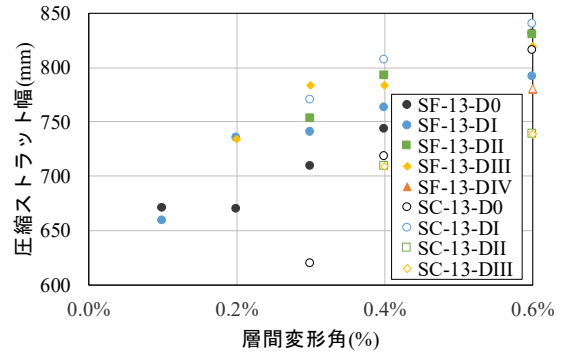


図-15 ストラット幅の算定結果

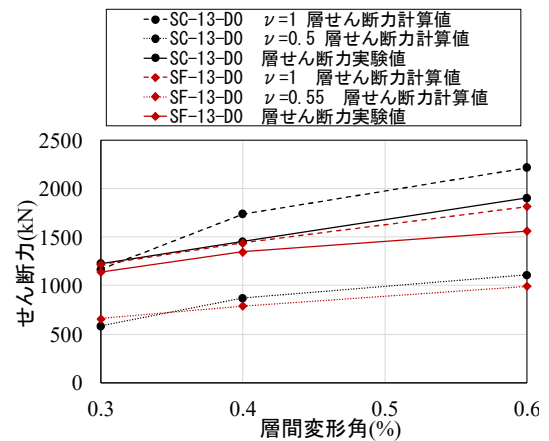


図-16 層間変形角—層せん断力

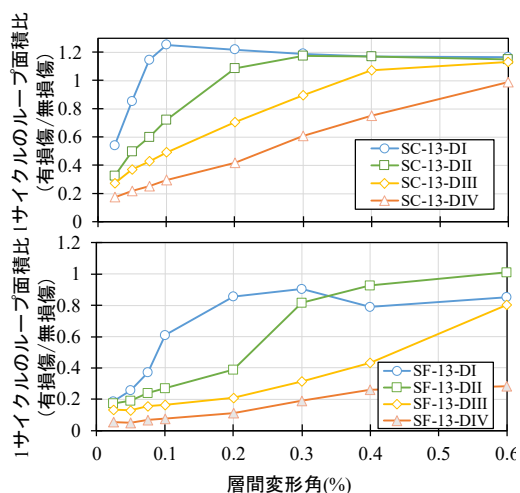
図-16 より、両シリーズともに、実験値は低減係数を使用した値と使用しない値の間を推移しており、このストラット幅の計算方法は概ね傾向をとらえる。

4.2 エネルギー吸収能力へ与える影響

1 回目の各サイクルの履歴ループで囲まれた面積は、そのサイクルでエネルギー吸収能力の大きさを示している。そこで、事前に受けた損傷レベルの減衰性能への影響を確認するため、有損傷の試験体と無損傷の試験体のエネルギー吸収能力の割合を利用し(式(5))、各試験体のエネルギー吸収能力を比較する。

$$\text{ループ面積比} = \frac{\text{有損傷試験体のループ面積}}{\text{無損傷試験体のループ面積}} \quad (5)$$

両シリーズの結果(図-17)をみると、どちらも事前損傷レベルが大きいほど、小変形時の範囲でエネルギー吸収能力の低下を示した。一方で変形が大きくなり未経験変形に近づくにつれ、各試験体のエネルギー吸収能力は、無損傷時と同程度となり、最終的なエネルギー吸収能力は変わらないことが確認された。一方で、SF-13 シリーズの試験体の経験変形領域でのエネルギー吸収能力は SC-13 シリーズより全体的に低下しており、特に SF-13-DIV は SC-13-DIV と比べて、経験変形の 0.6% サイクルの際に、エネルギー吸収能力は 7 割程低下する。



(上：SC-13 シリーズ 下：SF-13 シリーズ)

図-17 ループ面積比

4.3 終局変形に及ぼす影響

表-3 に兩年度の各試験体の終局変形を示す。

表-3 終局変形一覧

試験体名	終局変形 (%)	試験体名	終局変形 (%)
SC-13-D0	1.04	SF-13-D0	1
SC-13-D I	1.06	SF-13-D II	0.94
SC-13-DIII	0.96	SF-13-DIII	0.82
SC-13-DIV	0.95	SF-13-DIV	1.11
※終局変形は0.8Q _{max} 時の変形とした			

両シリーズともに事前損傷による終局変形性能への影響は見られなかった。また、各シリーズで同一レベルの事前損傷をうけた試験体を比較しても、大きな差は見られなかった。すなわち、両シリーズの拘束形式の違いが試験体の終局変形に及ぼす影響は殆どない

5.まとめ

端部拘束条件が、損傷を受けたせん断破壊先行型耐震壁の構造性能に及ぼす影響の検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) 本実験における直交壁付き耐震壁は柱付きに比べて、最大耐力が低い。但し、柱付きの場合は、事前損傷レベルが大きくなると壁板の耐力が下がることで、最終的な破壊モードに変化が見られたものの、直交壁付きの場合は、事前損傷レベルによる違いは見られなかった。
- (2) 最大耐力について、本研究では二種類の拘束条件に関わらず、事前損傷による終局変形性能への影響はほとんどないことが認められた。
- (3) 本試験体において計算したストラット幅について、事前に受けた損傷の大きさに関わらず、両シリーズ

のストラット幅の差異はほとんど見られないことが確認できた。また、ストラット幅の大きさは0.1%~0.6%サイクルの場合、650mm~800mm程度になることが確認できた。ただし、本論文で使用したストラット幅の計算方法の精度向上のため、コンクリート劣化による圧縮ストラット応力度の低下について今後検討が必要と考えられる。

- (4) 事前損傷がエネルギー吸収能力へ与える影響を検討したところ、両種類の拘束条件の試験体ともに、事前損傷レベルが大きいほど、小変形域でエネルギー吸収能力が低下し、変形が大きくなり未経験変形に近づくにつれて、各事前損傷レベルの試験体のエネルギー吸収能力は無損傷試験体に近づく。また、拘束条件が直交壁付きの場合、各事前損傷レベル試験体のエネルギー吸収能力は側柱付きの場合より全体的に低下するが認められた。特に、SF-13-DIVはSC-13-DIVと比べて、経験変形の0.6%サイクルの際に、エネルギー吸収能力は7割程低下する。

謝辞

本研究で使用した鉄筋の一部は、朝日工業株式会社、アシス株式会社より提供して頂きました。関係各位に、謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，2016
- 2) 細谷典弘，小池拓矢 ほか：地震により損傷を受けた鉄筋コンクリート造耐震壁の残存耐震性能に関する研究，その1，日本建築学会学術大会梗概集，構造IV，pp.157-158，2016.8
- 3) 小池拓矢，細谷典弘，ほか：地震により損傷を受けた鉄筋コンクリート造耐震壁の残存耐震性能に関する研究，その2，日本建築学会学術大会梗概集，構造IV，pp.159-160，2016.8
- 4) 細谷典弘，半沢守 ほか：壁筋比が損傷を受けたせん断破壊先行型耐震壁の構造性能に及ぼす影響の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.2，pp.259-264，2017
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，2010
- 6) 小池拓矢，細谷典弘，ほか：RC造耐震壁の残存耐震性能評価とひび割れに基づく損傷量に関する研究，構造工学シンポジウム，鉄筋コンクリート構造(3)，2017.3