

論文 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

細谷 典弘*1・半沢 守*1・尾形 芳博*2・前田 匡樹*3

要旨：せん断破壊先行型耐震壁の壁筋比の違いが、事前損傷を受けた後の耐震壁の構造性能に及ぼす影響を検討した。壁筋比の大きい($P_s=1.32\%$)場合、最大耐力や終局変形などの終局性能には、大きな影響はないものの、壁筋比が半分程度($P_s=0.66\%$)になる場合、壁筋が複数降伏し始める損傷度Ⅲ以上に至る地震力を経験すると、最大耐力が低下することを示した。また、エネルギー吸収能力は、事前に経験した変形領域内では、最大で2割ほどまで低下するが、未経験の変形領域では、損傷を受けていない場合と殆ど変わらない能力を発揮することを示した。

キーワード：耐震壁, 損傷度, 壁筋比, せん断破壊, 耐震性能評価, 構造性能低下

1. はじめに

地震によって被災し損傷を受けた鉄筋コンクリート造(以下, RC造)ラーメン構造における残存耐震性能は、ひび割れ幅などから分類する損傷度に基づき、既往の研究により定量的に評価する方法が提案されている¹⁾。しかし、耐震壁の残存耐震性能については、損傷と性能低下に着目した実験データが少ないのが現状である。そこで、2015年度に、当大学では、原子炉施設相当の壁筋比を有するせん断破壊先行型耐震壁について、損傷の大きさ、つまり事前に与える変形レベルをパラメータとした繰り返し静的漸増載荷実験を実施し、事前に受けた損傷が、その後の最大耐力や変形性能、エネルギー吸収能力といった各構造性能低下に及ぼす影響についての検討を行った^{2),3)}。その際、最大耐力や変形性能などの終局性能には、事前に受けた損傷の大きさが及ぼす影響は、殆ど確認されなかった。これは壁筋量が多くコアコンクリートの拘束効果が高かったため、壁板がせん断圧縮力を保持できていたためと考えられる。

これを踏まえて、2016年度には、コアコンクリートの拘束効果やひび割れ幅・剥落などの損傷量に影響を及ぼすと考えられる壁筋比について、2015年度の半分とした

せん断破壊先行型の耐震壁について、同様の実験を行い損傷の大きさが構造性能低下に与える影響についての検討を行った。本論文では、2015・2016年度の実験結果を比較することで、壁筋比の大きさが損傷を受けたせん断破壊先行型耐震壁の最大耐力、変形性能やエネルギー吸収能力といった各構造性能低下にどのように影響を及ぼすかを検討する。

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

表-1に試験体諸元を示す。それぞれの年度ごとにおけるパラメータは、事前に与える損傷の大きさとし、試験体数は、2015年度5体、2016年度4体の計9体とした。但し、損傷度Ⅳを与える試験体(S-13-DⅣ・S-06-DⅣ)の事前加力は、損傷度Ⅱ(S-13-DⅡ・S-06-DⅡ)を与える試験体の「事前加力+本加力(損傷度Ⅳまで)」とし、兼用した。これは、損傷度Ⅱ程度の損傷を受けても、構造性能に殆ど影響はないと考えたためである。また、試験体配筋図を図-1に示す。壁筋比について、2015年度は原子力建屋を模擬し1.32%、2016年度は一般的な建物における壁筋比も参考としながらその半分の0.66%と設定した。

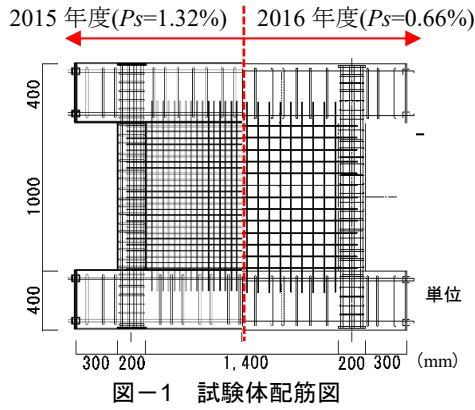
表-1 試験体諸元

年度	試験体名	壁							柱			スタブ		
		高さ (mm)	全長 (mm)	壁厚 (mm)	縦筋・ 横筋	鉄筋比 (%)	F_c (N/mm^2)	M/QD	断面 (mm×mm)	主筋	帯筋	断面 (mm×mm)	主筋	肋筋
2015	S-13-D0	1000	1800	120	D6@40 (SD295) Double	1.32	27	0.29	200× 200	12-D16 (SD345)	2-D10 (SD345) @60	400× 400	12-D22 (SD390)	2-D13 (SD390) @100
	S-13-DⅠ													
	S-13-DⅡ													
	S-13-DⅢ													
	S-13-DⅣ													
2016	S-06-D0	1000	1800	120	D6@80 (SD295) Double	0.66	27	0.29	200× 200	12-D16 (SD345)	2-D10 (SD345) @60	400× 400	12-D22 (SD390)	2-D13 (SD390) @100
	S-06-DⅡ													
	S-06-DⅢ													
	S-06-DⅣ													

*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 東北電力(株) 博士(工学)

*3 東北大学 工学研究科 都市・建築学専攻 教授 博士(工学) (正会員)



2.2 加力概要

試験体の加力は、当大学が所持している静的加力装置により、パラメータとなる損傷レベルを与える「事前加力」と、全試験体を比較し構造性能の低下を調べる「本加力」に分けて加力を行った。「事前加力」は、初めに加力した事前加力なしの無損傷試験体(S-13-D0・S-06-D0)の破壊経過や荷重変形関係を考慮しながら、有損傷試験体を与える損傷レベル(事前加力の最大層間変位)を決定した。それぞれ有損傷試験体にも与えた最大層間変形角を表-2に示す。なお、壁筋比1.32%の試験体は、参考文献2)を参照されたい。

表-2 加力スケジュール

試験体	事前加力 目標部材角R/(1000rad.)とサイクル数														
	±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
S-06-D0	なし														
S-06-D II	2	2	2	2	5					2	2	2	2	2	2
S-06-D III	2	2	2	2	2	2	5			2	2	2	2	2	2
S-06-D IV	2	2	2	2	2	2	2	5	2	2	2	2	2	2	2

試験体	本加力 目標部材角R/(1000rad.)とサイクル数								押切	
	±0.25	±0.50	±0.75	±1.0	±2.0	±3.0	±4.0	±6.0		±8.0
S-06-D0										押切
S-06-D II	2	2	2	2	2	2	2	2		-
S-06-D III										押切
S-06-D IV										押切

3. 実験結果

3.1 荷重-変形関係

2015年度、2016年度試験体の荷重-変形関係をそれぞれ図-2、図-3に示す。層間変形角は、水平変形を壁内法高さで除した値としている。ひび割れは、S-13-D0は0.05%サイクル時、他は0.025%サイクル時に発生した。壁筋の多いS-13試験体は、0.4%サイクル時に壁縦筋が降伏し始め、その後の0.6%サイクル時に壁横筋が降伏し始めた。一方で、壁筋比の少ないS-06試験体は、壁縦筋降伏は0.3%サイクル、壁横筋降伏は0.4%サイクルでそれぞれ確認された。無損傷試験体の最大耐力を比較すると、S-13-D0が約2000kNであったが、S-06-D0は約1500kNとなり、500kNほどの差がみられた。この耐力差の原因について4.2項にて詳しく検討する。

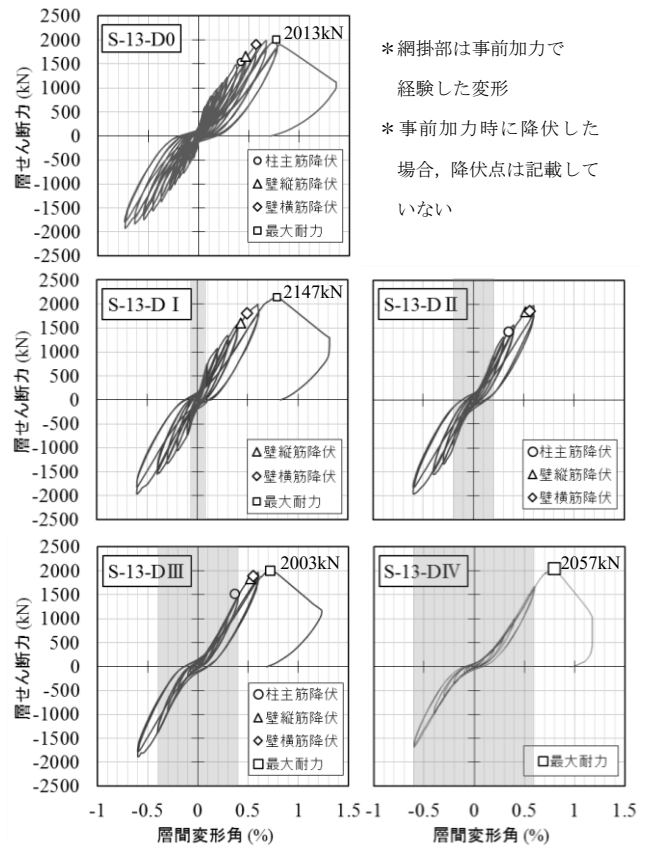


図-2 荷重-変形関係(2015年度)

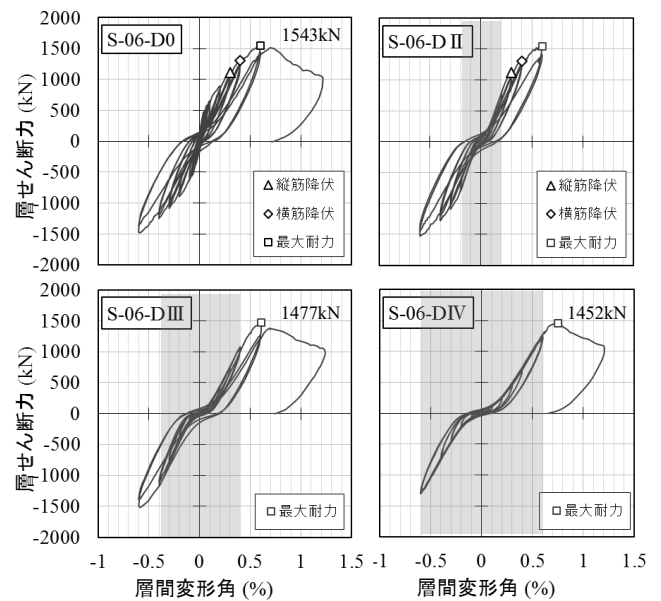


図-3 荷重-変形関係(2016年度)

3.2 最終破壊状況

全試験体の最終破壊状況をそれぞれ図-4、図-5に示す。壁筋比によらず、無損傷、損傷度Ⅰ～Ⅲ程度の試験体は、壁の対角方向のひび割れが開き、枠柱と壁板の同時圧壊に至った。一方、S-13-DIVは、壁内法高さのおよそ半分のあるひび割れから、反対側の壁隅にかけてひび割れが開き、壁板にすべり破壊を生じた。また、

S-06-DIVは、枠柱の圧壊は生じず、壁板のみの圧壊となった。これは、相対的に大きな事前損傷を受けたことで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、事前に受けた損傷が最終的な破壊状況に影響を及ぼしていると言える。

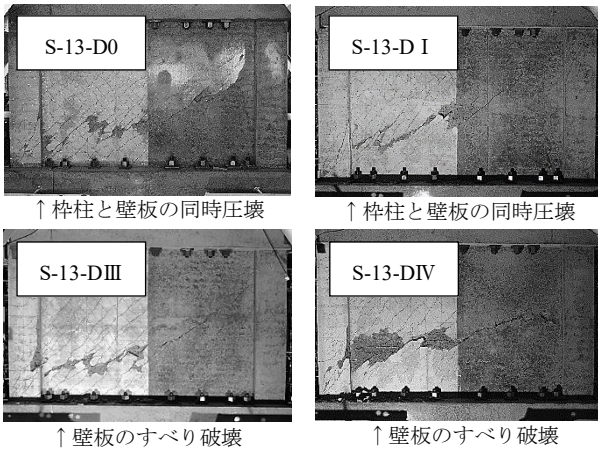


図-4 最終破壊状況 (2015年度)

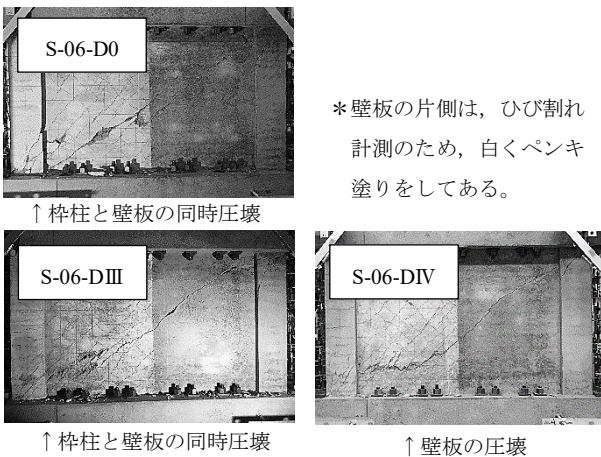


図-5 最終破壊状況(2016年度)

4. 壁筋比が損傷後の構造性能低下へ与える影響の検討

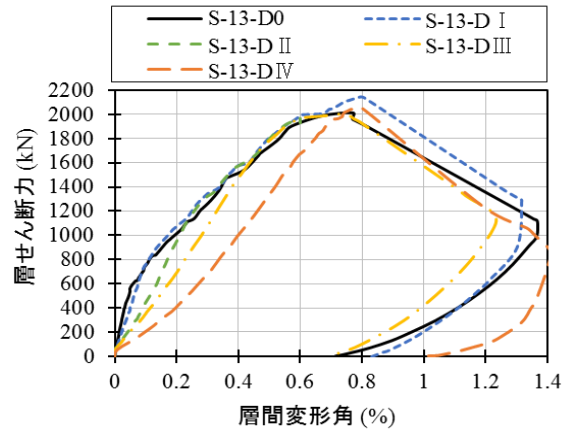
4.1 最大耐力、層せん断力へ与える影響の検討

(1) 最大耐力、層せん断力の比較

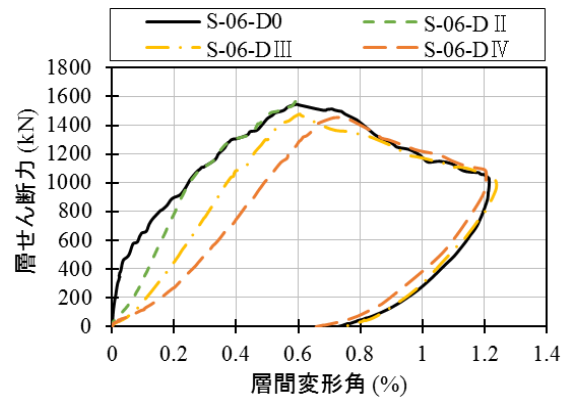
2015年度、2016年度試験体の荷重-変形関係の包絡線を図-6、層せん断力比の推移を図-7に示す。層せん断力比は、本加力時の各加力サイクルにおいて、各年度の無損傷試験体の層せん断力に対する有損傷試験体の層せん断力の比とし、式(1)で表す。

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

図-6から読み取れるように、2015年度については、事前に受けた損傷の大小に関わらず、最大耐力に差は殆ど見られなかった。一方で、2016年度については、損傷度II程度の損傷を受ける場合、最大耐力に差は生じなかったが、損傷度III以上の損傷を受けると、5%程度の低下が

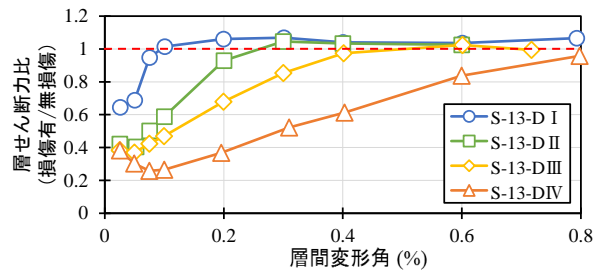


(a)2015年度試験体

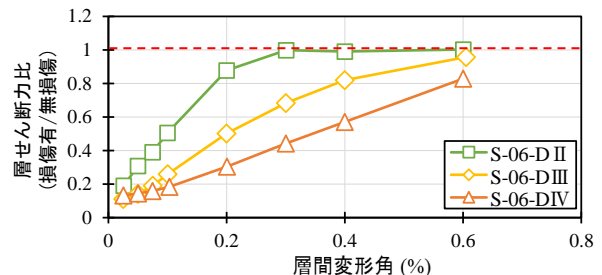


(b)2016年度試験体

図-6 荷重-変形関係包絡線



(a)2015年度試験体



(b)2016年度試験体

図-7 層せん断力比の推移

確認された。特に、S-06-DIVは、他の試験体で最大耐力が発現していた層間変形角0.6%では、2割ほど層せん断力が大幅に低下し、層間変形角0.8%付近で最大耐力が確認された。

また、最大耐力が確認された変形以前の層せん断力は、事前に受けた損傷の影響で、剛性が低下し負担できる層せん断力が低下している。特に、壁筋比の小さい2016年度($P_s=0.66\%$)の試験体では、その傾向が顕著にみられ、小変形時では、無損傷試験体に対し、2割程度しか層せん断力を負担できなくなっている。更に、未経験変形に近づくと、層せん断力比の値は上昇し、無損傷試験体との差が小さくなるが、前述したように、S-06-DIII, DIVでは、それぞれ5%と20%ほどの低下が確認できた。

(2) 圧縮ストラット幅の比較

前項において、事前損傷による耐力低下が確認できたが、これが試験体間のばらつきであるか否かを確認するために、耐震壁に生じる圧縮ストラット幅の検討を行った。一般的に、壁の塑性化が進むとせん断力の伝達に有効となる圧縮ストラット幅が減少するといえる。すなわち、事前に受けた損傷によって、壁の塑性化が進み、圧縮ストラットの幅の低減が生じていれば、耐力低下は、損傷によるものであると考えられる。

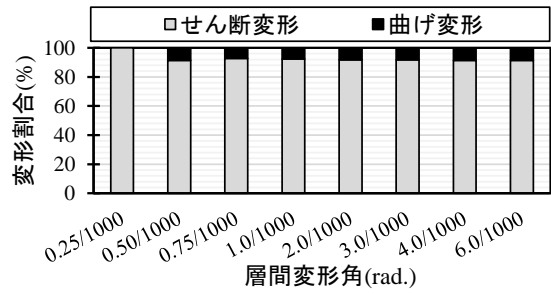
図-8に無損傷試験体について各サイクルにおける変形割合を示す。有損傷試験体については、無損傷試験体と大差がなかったため割愛する。全試験体においてせん断変形が支配的であったため、図-9、式(2)に示すように層せん断力 Q が圧縮ストラットにおける応力と釣り合っていると考え、圧縮ストラット幅 W を算出した。

$$Q = \sigma_s \times t \times W \times \cos\theta \quad (2)$$

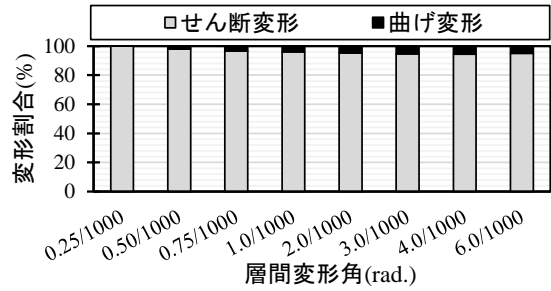
ここに、 Q : 層せん断力(N), σ_s : 圧縮ストラット応力度(N/mm^2), t : 壁厚(mm), W : 圧縮ストラット幅(mm), θ : 圧縮ストラット角度 ($\theta=48^\circ$)

圧縮ストラット幅 W の算出にあたり、まず図-10に示す壁板に設置したせん断変位計から対角歪-層間変形角関係を求めた。この際、対角方向の網掛け部分における歪を算出し、正加力の場合は青色、負加力の場合は赤色の網掛け部分の歪を平均し壁板対角方向歪とした。この時の対角方向の歪-層間変形角関係を図-11に示す。ただし、無損傷・有損傷の試験体で大きな差は無かったため、無損傷試験体のみを記載する。

次に、この対角歪-層間変形角関係を、コンクリート圧縮試験(2015年度:40.2 N/mm^2 , 2016年度:32.1 N/mm^2)から求めた応力度-歪関係と対応させ、各サイクルにおける圧縮ストラット応力度-層間変形角関係を求めた。この時、損傷を受けた場合、圧縮ストラット応力が低下することが考えられるが、劣化後の圧縮応力度は実験で測定することが困難であったため、コンクリートの応力度-歪関係は最大点指向型で劣化による応力低下がないと仮定をし、無損傷状態のコンクリートの応力度-歪関係を適用して圧縮ストラット幅を評価した。なお、このときの応力度は、靱性保証指針⁴⁾の圧縮強度有効係数 ν を乗じ低減させた。



(a)2015年度試験体(S-13-D0)



(b)2016年度試験体(S-06-D0)

図-8 変形割合の推移

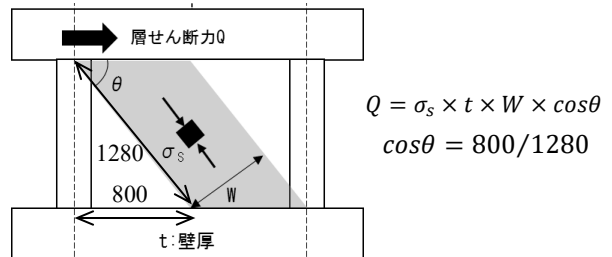
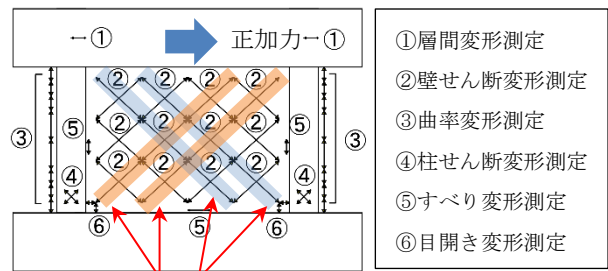
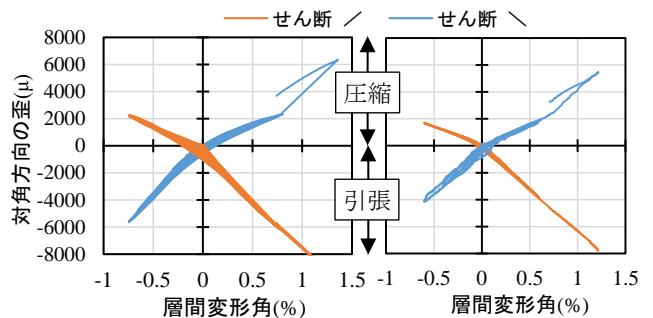


図-9 圧縮ストラット応力と層せん断力の釣り合い



*それぞれの箇所の歪を算出し、2か所の平均を対角方向の歪として算出

図-10 変位計位置図



(a)2015年度 (b)2016年度

図-11 対角方向の歪-層間変形関係

また、壁厚については、損傷後の試験体に大きな剥落や面外変形がなかったため、全試験体共通の $t=120\text{mm}$ とした。そして、圧縮ストラット応力と層せん断力の値を用いて圧縮ストラット幅を算出した。圧縮ストラット幅の算出結果(本加力のみ)を図-12に示す。図-12より、全体的に2015年度試験体は、2016年度よりも大きい値で推移しており、壁筋比が大きくなることで、圧縮ストラット幅が拡張したことが確認できる。特に、2016年度の損傷度IV試験体(S-06-DIV)は、他の損傷を受けた試験体に比べ、事前加力時に経験した最大変形(層間変形角0.6%)時においても、圧縮ストラット幅が大きく低減している。この結果から損傷度IV程度の損傷を受けた2016年度試験体における最大耐力の低下は、事前加力により圧縮ストラット幅が減少したことによると考えられる。

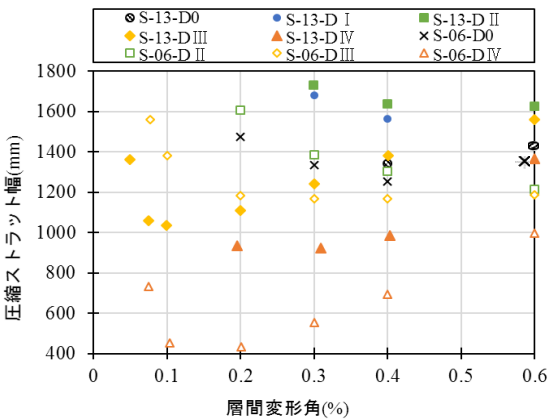


図-12 圧縮ストラット幅の算定結果

(3) 壁板の応力状態の比較

図-13、図-14に各年度についての層間変形角0.6%時の壁筋歪分布を示す。歪ゲージは、図-13、図-14の右側に示すように、壁片側の縦筋、横筋に等間隔になるように貼り付けており、壁中心からの距離が0mm、240mm、480mm、720mmとなっている。ここで、壁板の応力状態を比較するにあたり、縦筋の歪ゲージのデータを用いた。グラフに示した赤点線は、材料試験結果による壁筋の引張降伏歪の値である。壁筋の歪分布をみると、2015年度は、壁全体的に歪の値が大きくなっているのに対して、2016年度は、壁隅から45°方向(図-14赤点線箇所)の歪が大きくなっている。このことから、壁筋比が小さくなることで、圧縮ストラット幅が減少し、圧縮ストラット部分に集中的に応力が集中していることが確認できた。

4.2 終局変形へ与える影響の検討

表-3に終局変形の一覧を示す。表-3と図-6の荷重-変形関係の包絡線をみると2015年度試験体では、事前損傷レベルにおける終局変形性能に大きな差はみられない。ここでの終局変形は最大耐力発揮後の $0.8Q_{max}$ 時と

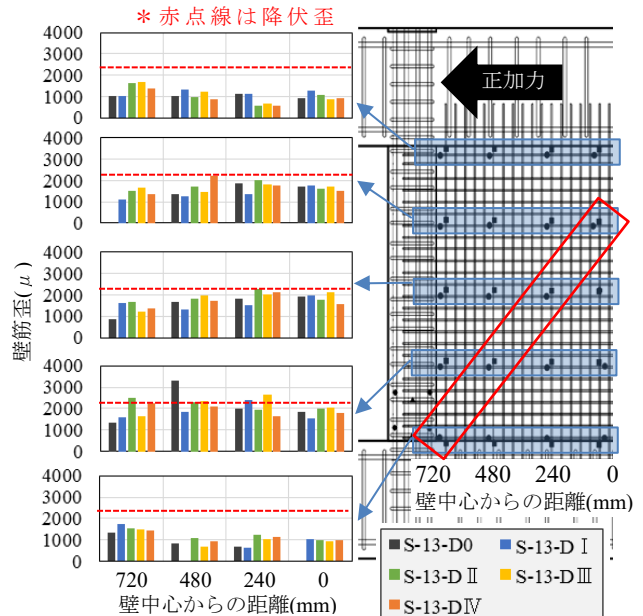


図-13 2015年度壁筋歪分布(層間変形角0.6%時)

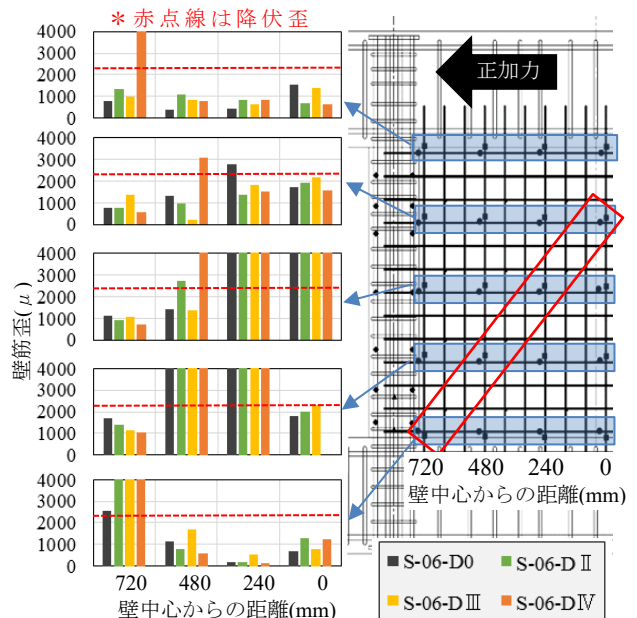


図-14 2016年度壁筋歪分布(層間変形角0.6%時)

表-3 終局変形一覧

試験体名	終局変形 (%)	試験体名	終局変形 (%)
-	(%)	-	(%)
S-06-D0	0.96	S-13-D0	1.04
S-06-DIII	0.98	S-13-D I	1.06
S-06-DIV	1.10	S-13-DIII	0.96
		S-13-DIV	0.95

※終局変形は $0.8Q_{max}$ 時の変形とした

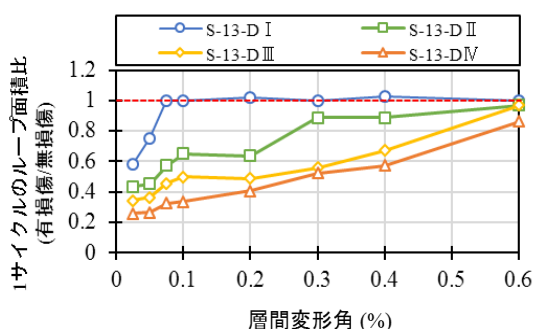
した。一方、2016年度のS-06-DIVでは最大耐力が低下したため、 $0.8Q_{max}$ とした終局変形が大きくなっているものの、層間変形角0.8%以降の履歴は無損傷試験体の包絡線とほぼ同じであることから、終局変形には損傷による影響が殆どないと考えられる。

4.3 エネルギー吸収能力へ与える影響の検討

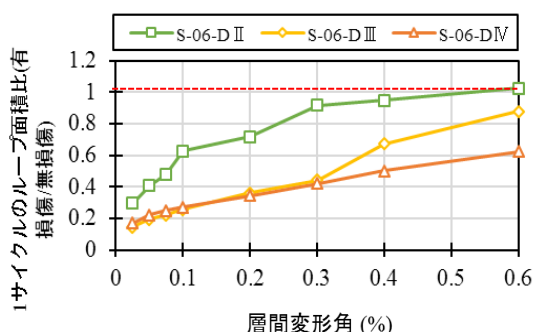
1 サイクルの履歴ループで囲まれた面積は、そのサイクルで吸収できるエネルギー吸収能力を表している。そこで、事前に受けた損傷の大きさが減衰能力へ及ぼす影響を検討するために、式(3)で表すように無損傷試験体の1サイクルのループ面積に対する有損傷試験体のループ面積の比率により、エネルギー吸収能力の比較を行う。図-15にループ面積比の推移を示す。

$$\text{ループ面積比} = \frac{\text{有損傷試験体のループ面積}}{\text{無損傷試験体のループ面積}} \quad (3)$$

小変形時において、2015年度、2016年度ともに、損傷を受けた試験体は、エネルギー吸収能力が低下し無損傷試験体の2割程度となった。2015年度試験体では、事前加力による未経験の変形範囲におけるループ面積比は、1程度となりエネルギー吸収能力は無損傷試験体と変わらない傾向がみられる。ただし、2016年度試験体では事前損傷が大きくなるほど、エネルギー吸収能力の低下度は大きくなることが確認され、S-06-DIIIは耐力低下に伴い未経験変形の0.6%時においても1割程度の低下が確認された。



(a) 2015年度試験体



(b) 2016年度試験体

図-15 ループ面積比の推移

5. まとめ

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を検討した結果、以下の知見を得た。
(1)壁筋比の大小に関わらず、損傷が大きくなると壁板の

耐力が低下することで、最終的な破壊形式に変化が生じることが示された。

(2)最大耐力に関しては、壁筋比が1.3%以上と大きい場合、事前に受けた損傷の大小が及ぼす影響は殆ど無い。一方で、壁筋比が0.6%程度と小さくなる場合、損傷度III・IV以上の損傷を経験すると20%程度以上の耐力が低下することがわかった。しかし、事前に変形を経験している範囲では、負担できる層せん断力が最大で2割ほどまで低下するという知見が得られた。また、変形性能に関しては壁筋比の大きさに関わらず、損傷の大きさによる終局変形の差は殆どないことが確認された。

(3)壁筋の歪分布について検討したところ、壁筋比が大きい場合、壁全体に歪が分布している一方で、壁筋比が小さくなると、圧縮ストラット部分に歪が集中していることから、壁筋比が小さくなると、圧縮ストラット幅が狭くなるといえる。また、事前に損傷を受けた試験体の圧縮ストラット幅が約20%減少したことから、損傷により耐力低下が生じたと判断されたが、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)損傷がエネルギー吸収能力へ与える影響を調べたところ、事前加力で経験した変形では、エネルギー吸収能力が低下し、その度合いは損傷が大きくなるほど大きくなり、S-06-DIVでは約4割低下した。なお、未経験の変形領域におけるエネルギー吸収能力は、壁筋比によらず損傷による影響は殆どないことが確認された。

謝辞

本研究で使用した鉄筋の一部は、東京鉄鋼株式会社、朝日工業株式会社より提供して頂きました。関係各位に、謝意を表します。

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年3月
- 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 実験計画と無損傷試験体の概要，日本建築学会学術大会梗概集，構造IV，pp.157-158，2016年8月
- 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 損傷レベルと構造性能低下の関係，日本建築学会学術大会梗概集，構造IV，pp.159-160，2016年8月
- 4) 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年