

論文 鉄筋コンクリート造コア壁の拘束筋による端部拘束効果に関する実験的研究

仲地 唯治*1・南 直行*2

要旨: 超高層建物において、コア部分を RC 造連層耐震壁とした場合、地震時にコア壁に大きな軸力が作用する。このため、高軸力下におけるコア壁の靱性確保が必要である。センターコアを4組のL形断面コア壁とした時、高圧縮領域となるL形隅角部及びその近傍のコンクリートの拘束がコア壁の靱性に大きな影響を及ぼすと考えられる。そこで、L形断面コア壁の隅角部及び壁板部分を模擬した壁柱試験体による水平加力実験を行った。実験の結果、拘束筋によるコンクリートの拘束効果、軸力比がコンクリートの圧縮性状、圧壊領域に及ぼす影響等が示された。

キーワード: 鉄筋コンクリート、コア壁、拘束筋、靱性、水平加力実験

1. はじめに

コア部分を RC 造連層耐震壁とした超高層建物においては、高軸力下におけるコア壁の靱性確保が必要である。センターコアを4組のL形断面のコア壁とした場合、斜め45度方向入力時に特に高軸力となり、高圧縮領域となるL形隅角部及びその近傍のコンクリート拘束がコア壁の靱性に大きな影響を及ぼすと考えられる。

拘束筋による拘束効果がコア壁の靱性に及ぼす影響を調べるため、著者らはこれまでに、L形断面コア壁の3次元有限要素解析¹⁾やL形断面コア壁の隅角部及び壁板部分を模擬した部分試験体による圧縮実験²⁾を実施した。今回、拘束筋によるコンクリートの拘束効果、軸力比がコンクリートの圧縮性状、圧壊領域に及ぼす影響等を検討するため、L形断面コア壁の隅角部及び壁板部分を模擬した壁柱試験体による水平加力実験を行った³⁾。

2. 実験概要

2.1 試験体

図-1に試験体の形状、配筋を示す。表-1、表-2にコンクリート及び鉄筋の材料試験結果を示す。試験体は2体で、25階程度の超高層建物の最下層を想定した実大の約1/8のモデルで、コア壁の壁板を模擬した長方形断面の壁柱試験体をNo.1とし、コンクリート調合強度を60N/mm²、軸力比 $\sigma_0/\sigma_B=0.2(\sigma_0=N/A, N:$ 軸力, $A:$ 断面積)とした。これに対し、No.2はコンクリート調合強度を33N/mm²、軸力比を0.4とした。その他の緒元、配筋は2体共通で、壁断面 $b \times D=90\text{mm} \times 430\text{mm}$ 、せん断スパン比は2.79である。縦筋、横筋には、それぞれD10(SD345)、D6(SD345)を用い、拘束筋には高強度鉄筋U5.1(1300N/mm²級)を用いた。拘束筋は幅止め型拘束筋とし、正加力曲げ圧縮側の壁柱せいに相当する高さ430mm以

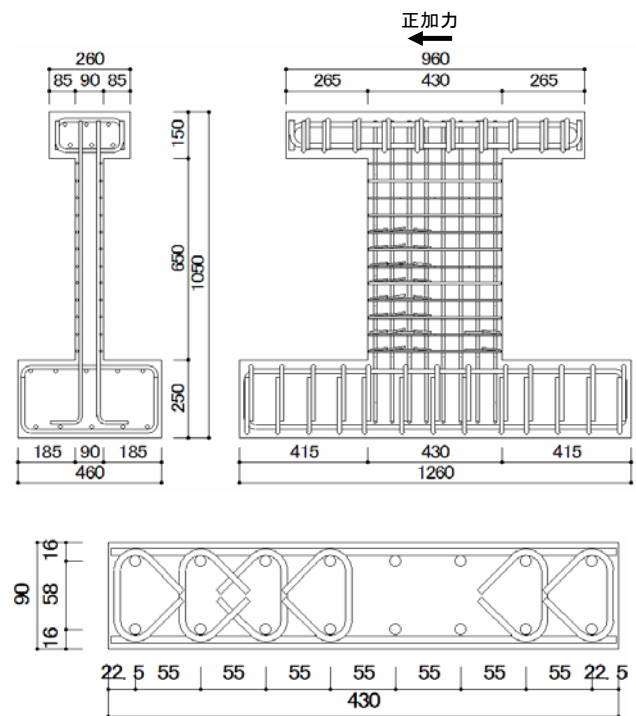


図-1 試験体配筋図

表-1 コンクリートの材料試験結果

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
No.1	63.2	2.90	3.40
No.2	32.0	2.25	1.69

下の範囲に配筋した。試験体かぶり厚さは5mmである。

2.2 実験方法

加力は一定軸力下における正負交番繰り返し加力とした。図-2に加力装置を示す。試験体の下端を加力フ

*1 福井工業大学 建築学科教授 博士(工学) (正会員)

*2 技建工業株式会社 (正会員)

表-2 鉄筋の材料試験結果

呼び名	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (× 10 ⁵ N/mm ²)	伸び (%)
D10	393	568	2.04	25.8
D6	372	524	2.05	25.7
U5.1	1368	1491	2.11	9.3

レームに固定し、上端に取り付けたL形の加力治具を介して、キャンチレバー型で水平力を作用させた。軸力は試験体上方の油圧ジャッキにより載荷し、正加力時に、No.1では $\sigma_0=0.2\sigma_B$ 、No.2では $\sigma_0=0.4\sigma_B$ の定軸力、負加力時には両試験体共、定軸力30kNとした。加力は2階床レベルに相当する高さ(615mm)での変位制御とし、部材角1/1000(rad.)(1回)、2/1000, 5, 7.5, 10, 15, 20, (各2回)、30/1000(1回)、40/1000(1回)における正負交番繰り返し加力とした。変位計により各区間の伸縮量を、また、ワイヤーストレインゲージにより拘束筋、横筋、及び縦筋のひずみを計測した。ゲージ貼付位置は拘束筋では試験体厚さ方向中央とした。

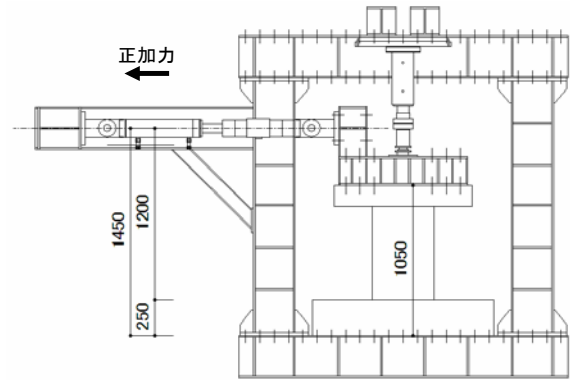


図-2 加力装置

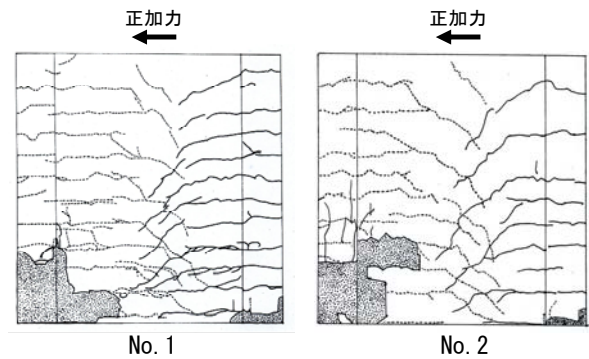


図-3 ひび割れ状況(最終)

3. 実験結果

3.1 破壊状況

図-3 にひびわれ状況を示す。ひび割れは、負加力時に、No.1では荷重27.5kNで、No.2では30.0kNでそれぞれ曲げひび割れが脚部に発生した。その後、曲げひび割れは上方及び中央寄りに進展した。両試験体共、正加力時に部材角5/1000までに最外縁圧縮縦筋が圧縮降伏(降伏ひずみ1926 μ)し、負加力時に5/1000までに、最外縁引張り縦筋が引張り降伏した。曲げせん断ひび割れは、No.1では正負加力時共に7.5/1000までに発生した。No.2では、正加力時には7.5/1000までに、負加力時には5/1000までにそれぞれ発生した。また、コンクリートの圧壊(縦ひび割れ)が、正加力時において、No.1では7.5/1000までに、No.2では5/1000までに発生した。両試験体共、30/1000までに、正加力時に圧縮側の主筋の座屈が認められ、最終は正加力時の圧壊により耐力が低下した。最終破壊状況を両試験体で比較すると、No.2の方がNo.1に比べて、圧壊領域がより上方まで広がっている。

3.2 荷重-変形関係

図-4 に荷重-変形関係を示す。但し、試験体の水平変位にともなって、試験体頂部及びそれに接続するL形加力治具に回転が生じ、それによって水平ジャッキが傾斜し、加力のシアスパンが変動する。そのため、同図において、得られた荷重と変動したシアスパンの積を実験開始時のシアスパン(1200mm)で除することにより荷重を補正している。最大荷重は15/1000の正加力時において、No.1では107.3kN、No.2では94.2kNであった。最

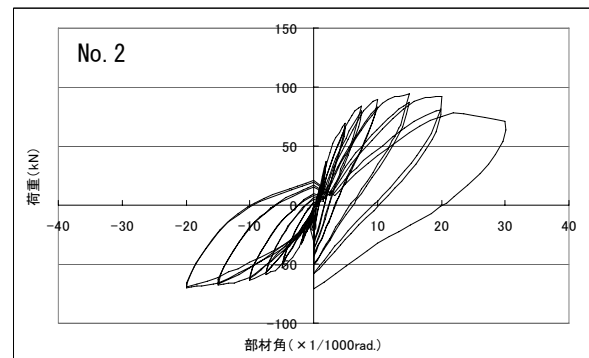
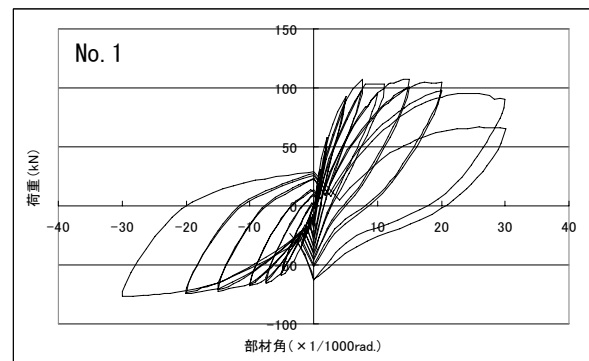


図-4 荷重-変形関係

終的には、No.1では正加力時に40/1000への途中で荷重が大きく低下し、30/1000までで終了とした。No.2では正加力時に30/1000のサイクルで荷重が大きく低下した。限界部材角を荷重が最大荷重の80%まで低下した部材角

とすると、No.1, No.2 の限界部材角はそれぞれ、30/1000、25.5/1000 となる。軸力比が No.1 では 0.2、No.2 では 0.4 であることから、軸力比の増大で圧壊がより進展し、限界部材角が減少したと考えられる。

3.3 拘束筋のひずみ分布

(1) 水平方向ひずみ分布

図-5、図-6 に、No.1 及び No.2 の高さ 82.5mm における拘束筋の水平方向ひずみ分布をそれぞれ示す。グラフは、正加力時の各部材角における圧縮端部からの距離と、拘束筋ひずみの関係を示している。両試験体共、全体として部材角の増大と共に拘束筋ひずみは増え、圧縮端部に近いほどひずみは大きい。これは、圧縮端部に近いほどコンクリート圧縮応力、圧縮ひずみが大きく、そのため拘束筋の拘束力が増大したためと考えられる。

No.1 の拘束筋ひずみは、端部から 130mm 付近では、かなり小さな値となり、190mm 付近では、0 に近い値となっている。すなわち、圧縮端部から 130mm 付近までが高圧縮領域であると考えられる。それに対し、軸力比を増した No.2 は、部材角 20/1000 以降 130mm 及び 190mm 付近においてもひずみが生じている。すなわち 190mm 付近までが高圧縮領域と考えられる。これは軸力比の増大により、No.1 よりも高圧縮領域が広がったためと考えられる。

No.1 の 30/1000 では、圧縮端部から 130mm 付近まで値が大きい。これは、圧縮端部の圧壊により、高圧縮領域が内側へ広がったためと考えられる。また、No.2 の 30/1000 では、圧縮端部から 130mm 及び 190mm 付近の値が増大している。これも、No.1 と同様に高圧縮領域が内側へ広がったためと考えられる。なお、これらの傾向は、高さ 27.5mm、137.5mm、192.5mm、247.5mm においても、ほぼ同様であった。

(2) 鉛直方向ひずみ分布

図-7、図-8 に No.1 及び No.2 の圧縮端部から 22.5mm における拘束筋の鉛直方向ひずみ分布をそれぞれ示す。グラフは、正加力時の各部材角における壁脚部からの高さ、拘束筋ひずみの関係を示している。No.2 の高さ 27.5mm を除くと、No.1, No.2 共に、全体的に脚部に近いほど、ひずみが大きい。No.1 においては、2/1000 までは、脚部に近くなるにつれて、ほぼ一定の割合でひずみが増大している。これに対し、5/1000 以降では、高さ 200mm 程度以下において、脚部に近づくにつれてひずみの増大が顕著である。

3.1 で示した破壊状況においては、5/1000 までに最外縁圧縮縦筋が圧縮降伏(降伏ひずみ 1926 μ)し、7.5/1000 までにコンクリートの圧壊(縦ひび割れ)が発生した。このことより、2/1000 までは、圧縮端部において脚部から上方にいたるまで、コンクリートは弾性範囲にあり、5/1000

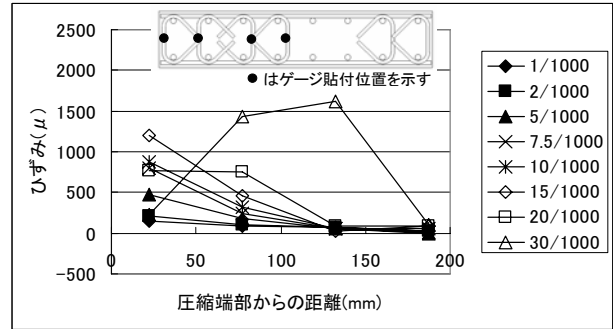


図-5 拘束筋の水平方向ひずみ分布 (No. 1)

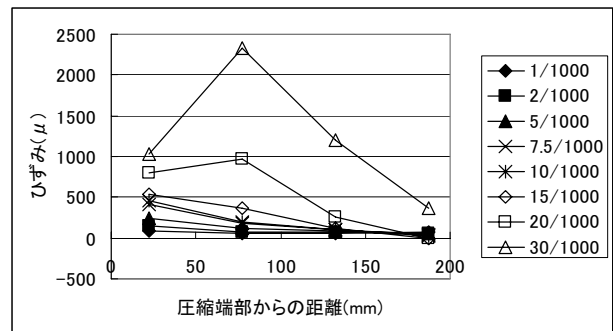


図-6 拘束筋の水平方向ひずみ分布 (No. 2)

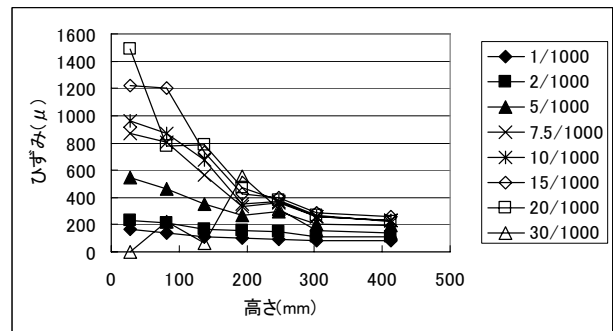


図-7 拘束筋の鉛直方向ひずみ分布 (No. 1)

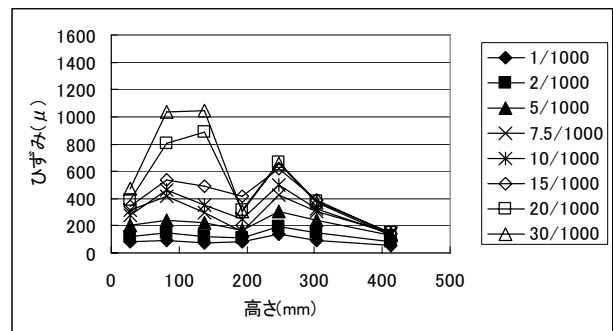


図-8 拘束筋の鉛直方向ひずみ分布 (No. 2)

以降は、高さ 200mm 程度以下が塑性領域となったと考えられる。そのため、高さ 200mm 以下において拘束筋ひずみ増大が顕著になったと考えられる。

一方、No.2においては、2/1000までの部材角では、ほぼ同程度の値を示しているが、5/1000以降の部材角では、高さ300mm程度以下において、脚部に近づくにつれてのひずみの増大が顕著である。すなわち、軸力比を増したNo.2は、No.1に対し塑性領域がより上方に広がったと考えられる。

No.1では、30/1000において、高さ82.5mm、137.5mmでは、ひずみが特に小さくなっている。これは、コンクリートの圧壊が進み、拘束コア内のコンクリートが剥落し、拘束筋の拘束力が減少したためと考えられる。

3.4 壁脚部における鉛直ひずみの水平方向分布

(1) 縦筋のひずみ分布

図-9、図-10に、No.1及びNo.2の壁脚部からの高さ25mmにおける縦筋ひずみの水平方向分布をそれぞれ示す。グラフは、正加力時の各部材角における圧縮端部からの距離と、縦筋ひずみの関係を示している。No.1、No.2共に、5/1000までは、中立軸からの距離が大きくなるにつれて、ほぼ一定の割合でひずみが増大している。これに対し、7.5/1000以降では、圧縮端部におけるひずみの増大が顕著である。No.1とNo.2を比較すると、No.1よりもNo.2が圧縮側において、より内側まで大きな値となっている。これは、軸力比の増大により圧縮領域がより内側に広がったためと考えられる。

(2) 変位計によるひずみ分布

図-11、図-12に、壁脚部からの検長を65mmとした場合の変位計による鉛直ひずみの水平方向分布を示す。グラフは、正加力時の各部材角における圧縮端部からの距離と、変位計によるひずみの関係を示している。No.1については、20/1000までは、圧縮端部からの距離170mm付近を中立軸として、直線的にひずみが増大している。ただし、圧縮側のほうが引張り側に比べて、やや変化の割合が大きい。これに対し、軸力比を増したNo.2は、220mm付近を中立軸として直線的にひずみが増大している。これは、軸力比の増大により、圧縮領域が拡大し、より内側へと中立軸が移動したものと考えられる。

30/1000では、No.1、No.2共に、中立軸が少し内側に移動している。これは、圧縮端部の圧壊が進行し、圧縮領域が内側に広がったためと考えられる。

No.1、No.2とも全体的に直線的にひずみが増大しているが、変化の割合、すなわち曲率はNo.2の方がNo.1よりもやや小さい。これは、3.3で述べたように、軸力比を増したNo.2は、No.1に対し塑性領域がより上方に広がったことと関連すると考えられる。つまり、No.1とNo.2が同じ部材角の場合、塑性領域のより短いNo.1の方が、同じ回転量のヒンジをより短い区間で形成しているため、曲率が大きくなるものと考えられる。

3.5 壁端部における鉛直ひずみの鉛直方向分布

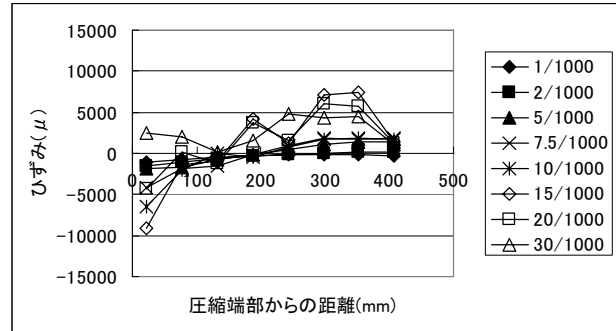


図-9 縦筋ひずみの水平方向分布 (No. 1)

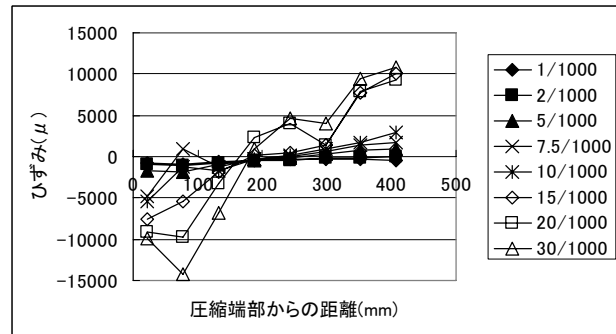


図-10 縦筋ひずみの水平方向分布 (No. 2)

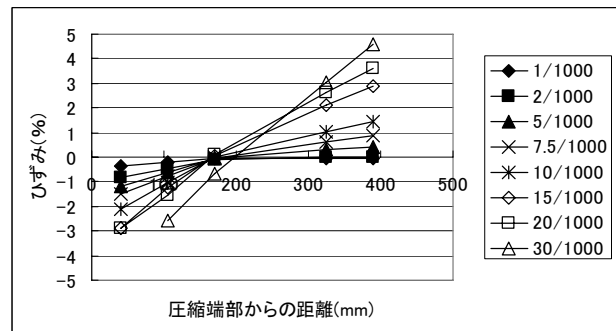


図-11 変位計による鉛直ひずみの水平方向分布 (No. 1)

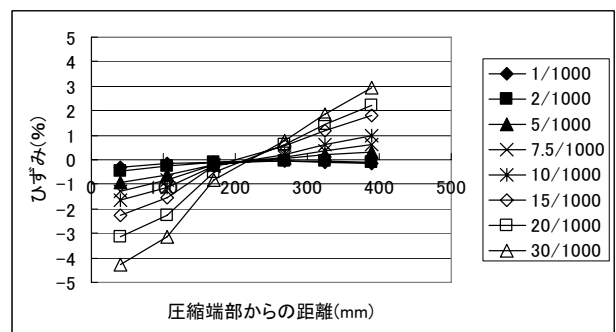


図-12 変位計による鉛直ひずみの水平方向分布 (No. 2)

(1) 縦筋のひずみ分布

図-13、図-14に、No.1及びNo.2の圧縮側端部縦筋の鉛直ひずみの鉛直方向分布をそれぞれ示す。No.1、No.2

共、5/1000までは、脚部に近づくにつれて、ほぼ一定の割合でひずみが増大している。これに対し、7.5/1000以降の部材角では、No.1においては高さ200mm程度以下において、No.2においては高さ300mm程度以下において、それぞれ脚部に近づくにつれてひずみの増大が顕著であり、脚部が最も圧縮ひずみが大きい。また、脚部における圧縮ひずみはNo.2の方がより大きい値となっている。このひずみの大きい領域は、3.1で示した圧壊領域、及び3.3における拘束筋ひずみの鉛直方向分布において、特にひずみが大きい領域と対応している。

(2) 変位計によるひずみ分布

図-15、図-16に、No.1及びNo.2の圧縮側端部における変位計による鉛直方向ひずみ分布をそれぞれ示す。変位計を固定するボルトの位置は端部から40mm内側とした。No.1、No.2共、脚部に近づくにつれてひずみが増大しているが、特に脚部部分において値が大きい。脚部部分における圧縮ひずみは上記で示した鉄筋ひずみの場合と同様、No.2の方がNo.1よりも大きい値となっている。

高さ175mmよりも上方については、値が脚部付近よりも小さいため、図-15、図-16に対して縦軸の値を拡大したNo.1とNo.2の鉛直方向ひずみ分布を図-17、図-18にそれぞれ示す。No.1とNo.2を比較すると、高さ175mmより上方では、いずれの部材角の場合もNo.2の方が大きい傾向にある。特に285mmから450mmまでの範囲においては、その傾向が顕著である。この範囲ではNo.1の圧縮ひずみが30/1000においても0.2%以下であるのに対し、No.2では10/1000において既に0.2%に達しており、30/1000では約0.3%となっている。すなわち、高さ285mmから450mmまでの平均ひずみが、10/1000以降、ほぼ圧壊のひずみに達していたと言える。したがって、変位計によるひずみ分布からも、軸力比が高いNo.2の方が圧壊領域がより上方まで進展していると言える。

図-15、図-16より、脚部における3%を超える特に大きなひずみが示されているが、その場合、かぶりコンクリートはすでに剥落しており、また、拘束コア内のコンクリートもかなり剥落し、損傷が激しい。一方、175mmよりも上方においては、脚部ほど損傷が激しくはないものの、10/1000以下の部材角においても、部材角の増加にともなって圧縮ひずみが増加している。圧縮ひずみ増加においては、軸力比の高いNo.2の増加の方がより顕著となり、圧壊のひずみにまで達するものと考えられる。すなわち、かぶりコンクリートの剥落などの顕著な圧壊領域は、3.1の破壊状況で示した通りで、また、3.3における拘束筋ひずみの鉛直方向分布において、特にひずみが大きい領域が圧壊領域とも対応していたが、その場合、No.2の方が圧壊領域が大きい原因としては、軸力比が大

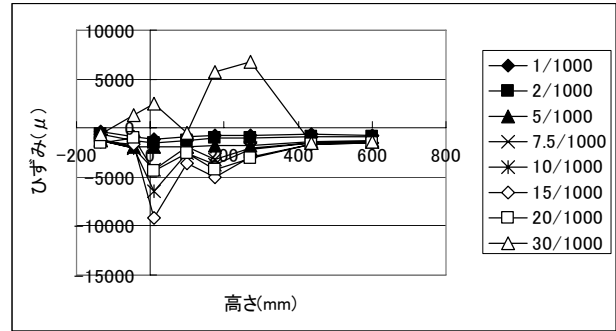


図-13 圧縮側端部縦筋ひずみの鉛直方向分布 (No. 1)

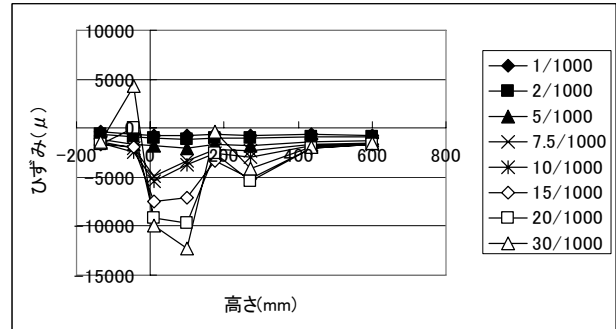


図-14 圧縮側端部縦筋ひずみの鉛直方向分布 (No. 2)

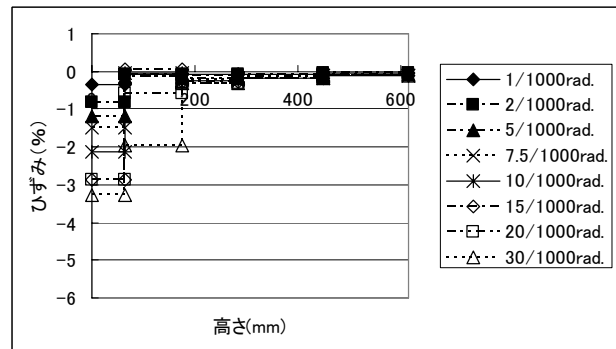


図-15 変位計による圧縮側端部の鉛直方向ひずみ分布 (No. 1)

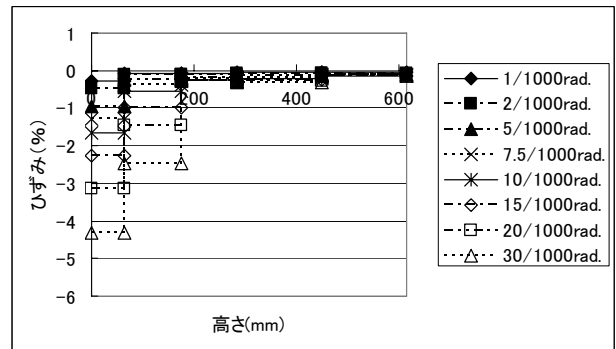


図-16 変位計による圧縮側端部の鉛直方向ひずみ分布 (No. 2)

きいことにより、初期の部材角の段階から、圧縮端部において、脚部から上方に至るまで圧縮ひずみ、つまり圧縮応力が大きく、部材角が進むにつれ、No.2の方がより

上方まで圧壊のひずみに達することが考えられる。言い換えれば、軸力比の高い方が、圧縮端部における鉛直方向の縁応力勾配がゆるやかで、そのため、圧壊領域がより大きいものとなると言える。

図-19、図-20に、No.1及びNo.2の引張側端部における変位計による鉛直方向ひずみ分布をそれぞれ示す。No.1、No.2共、脚部に近づくにつれてひずみが増大しているが特に5/1000以降、脚部部分において値が大きい。No.1とNo.2を比較すると、65mm以下において、No.1の方がNo.2よりもかなり大きい値となっている。ひずみが1%以上と大きくなる領域は、No.1、No.2共、285mmまでの範囲である。引張側端部のひずみ分布を圧縮側(図-15、図-16)と比較すると、No.1、No.2共、圧縮側の方がより脚部にひずみが集中している。3.4において示した壁脚部における変位計による鉛直ひずみの水平方向分布では、圧縮側のほうが引張り側に比べて、やや変化の割合が大きかったが、この原因は、圧縮側の方がより脚部にひずみが集中しており、壁脚部における鉛直ひずみの水平方向分布の計測にあたってはこの範囲を検長(65mm)としたためと考えられる。

4 まとめ

コア壁の拘束筋によるコンクリートの拘束効果、軸力比がコンクリートの圧縮性状に及ぼす影響等を検討し、以下のことが明らかとなった。

- 1) 拘束筋の水平方向及び鉛直方向のひずみ分布により、圧縮端部におけるコンクリート拘束効果が示され、軸力比増加による高圧縮領域の増大、最終破壊状況における高圧縮領域の増大が明らかとなった。
- 2) 壁脚部における鉛直ひずみの水平方向分布により、圧縮側の方が引張側に比べて変化の割合が大きいことが示された。また、軸力比の増加により中立軸が内側へ移動し、高圧縮領域が増大することが明らかとなった。
- 3) 壁端部における鉛直ひずみの鉛直方向分布により、引張側端部に比べて圧縮側端部の方が脚部にひずみが集中していることが示された。また、軸力比の増加により、圧縮側におけるひずみの集中領域がより上方に延びることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 仲地唯治：鉄筋コンクリート造コア壁の有限要素解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.29、No.3、pp.319-324、2007.7
- 2) 畠中隆一、仲地唯治：鉄筋コンクリート造コア壁における壁板の圧縮実験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.30、No.3、pp.463-468、2008.7
- 3) 南直行、仲地唯治：鉄筋コンクリート造コア壁の拘束

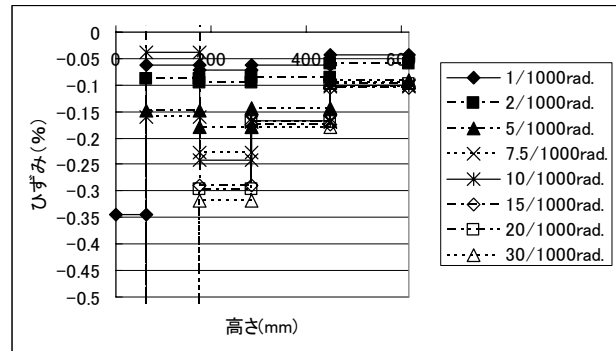


図-17 変位計による圧縮側端部の鉛直方向ひずみ分布 (No. 1)

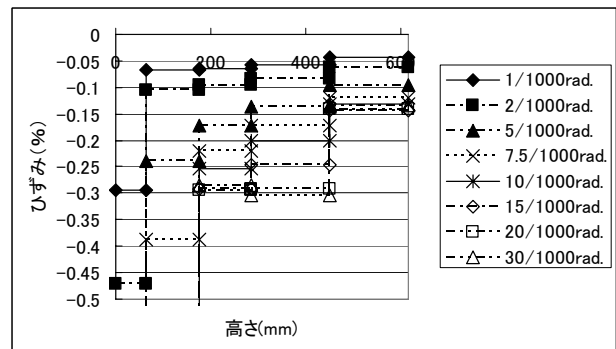


図-18 変位計による圧縮側端部の鉛直方向ひずみ分布 (No. 2)

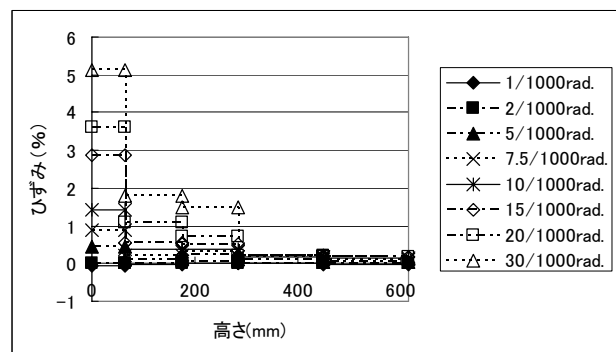


図-19 変位計による引張側端部の鉛直方向ひずみ分布 (No. 1)

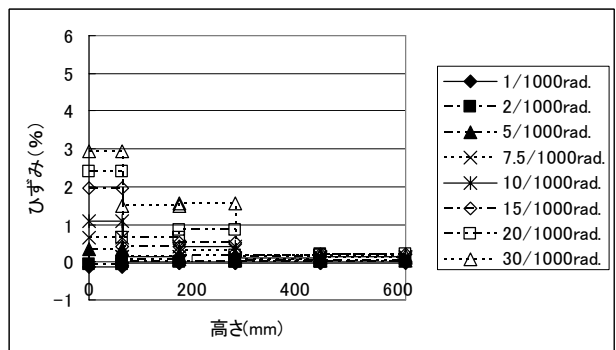


図-20 変位計による引張側端部の鉛直方向ひずみ分布 (No. 2)

筋による端部拘束効果に関する実験的研究 (その1, その2), 日本建築学会学術講演梗概集, pp.437-440, 2009.8