

鉄筋コンクリート造耐震壁の拘束筋による靱性確保に関する研究

仲 地 唯 治*

Study on Flexural Ductility Enhancement of Reinforced Concrete Walls by Transverse Confining Steel

Tadaharu Nakachi

In high-rise buildings with the core wall system, the axial load of the core wall is remarkably very high under the action of a diagonal seismic force. Particularly the area near the corner of the core wall is subject to high compressive stress. Reinforcing these areas is therefore considered effective in improving the deformation capacity of the core walls. In this paper, the influence of confinement effect of concrete, confinement area by confining steel, and depth-to-width ratio of core walls to limit drift angle was shown.

1. はじめに

鉄筋コンクリート造耐震壁の靱性を向上させる方法として、耐震壁圧縮側端部コンクリートを拘束筋によって拘束する方法がある。著者らは、これまでにコア壁¹⁾や壁柱^{2),3)}において端部コンクリートの拘束が部材の変形性能に及ぼす影響に着目し、実験的に検討した。近年、鉄筋コンクリート造超高層建物にコア壁が用いられることが多くなり^{4),5)}、端部コンクリート拘束による部材の靱性確保はより重要になってきている。これに伴い、コア壁等の立体耐震壁や壁柱において、端部拘束の影響を検討した研究がなされている^{7)~16)}。著者らは、端部拘束の影響に関して、端部拘束指標を提案し、端部拘束指標と限界部材角の関係を示した⁶⁾。本研究では、端部拘束指標提案時に検討した既往の実験結果に、最近行われた実験^{17)~21)}の結果を合わせて、特に、コンクリート拘束効果、拘束筋による圧縮領域コンクリートの拘束範囲、コア壁の偏平率が限界変形角に及ぼす影響について検討した。

2. 端部拘束指標

端部コンクリートにおいて、軸力、偏平率、コンクリート拘束効果、拘束領域を考慮した係数として、 C_{ce} を定義した。

$$C_{ce} = C_c \cdot \{a / (\sigma_o / F_c) D\} / \{(\sigma_o / F_c) \cdot (D_t / b)\} \quad (1)$$

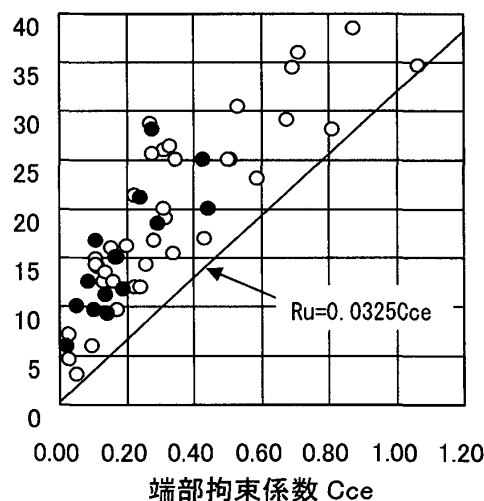
各記号は次の通りである。

$$C_c = \rho_s \cdot f_y^{0.5} \cdot (1 - 0.5S/W) / f'_c \quad (2)$$

* 建設工学科 建築学専攻

ρ_s : 横拘束筋の体積比
 f_y : 横拘束筋の降伏点強度
 S : 横拘束筋のピッチ
 W : 拘束コア断面最小寸法
 f'_c : プレーンコンクリートの圧縮強度
 a : コンクリート拘束領域の壁長さ方向寸法
 $a/(\sigma_0/F_c)D > 1$ の場合は $a/(\sigma_0/F_c)D = 1$ とする
 $a = a_c + W/4$
 a_c : 拘束コア断面の壁長さ方向寸法
 D : 各辺の壁長さ
 b : 壁厚
 D_L : 壁板を加力方向軸へ投影したときの長さ

限界部材角 R_u ($\times 1/1000 \text{rad.}$)



図－1 Cce— R_u 関係

上記 C_c は六車らの拘束効果に関する研究²²⁾において定義されたものである。既往のコア壁及び壁柱の実験に関して端部拘束指標 C_{ce} と限界部材角（最大荷重の80%以上の荷重を保持する最大部材角） R_u の関係を図－1に示す。試験体は文献6)において、既往の研究より選定したコア壁及び壁柱の水平加力実験試験体に、今回新たに14体加えた、計52体である。図中●は今回加えたものを示し、○は文献6)で検討したときのもので限界変形角が40/1000rad.未満のものである。試験体は、荷重が最大荷重の80%以下まで低下したことが文献の記述もしくは文献で示された荷重－変形曲線から確認できたものとした。また、正加力、負加力で軸力が異なる場合、より高軸力となる側の限界部材角を採用した。T形において直交材側が圧縮となる場合、L形において一辺の壁板が加力方向に対して直交し、圧縮となる場合、及びH形において強軸方向加力によりフランジが圧縮となる場合の試験体は、圧縮を負担する断面積が大きく増大し、限界部材角が著しく増加することから、ここでは除外した。また、T形試験体における直交材及びH形試験体におけるウェブ材が引張りとなる場合、直交材、ウェブ材の縦筋による影響が大きいため、縦筋の降伏強度と縦筋断面積合計の積を軸力に加えた。選定した試験体の条件はコンクリート圧縮強度21.9～134N/mm²、軸力比0.095～0.991、偏平率2.07～14.14である。

図－1において、両者は高い相関をもつといえる。Rの下限值として、図中に原点を通る直線を求め、その傾きを γ とすると

$$\gamma = 0.0325$$

となり、 $R = \gamma \cdot C_{ce}$ の下限値として次式が求まる。

$$R_u = 0.0325 C_{ce} \quad (3)$$

よって、前述の条件のもとにおいて、壁柱およびコア壁の端部の配筋、軸力、断面形状等を(3)式で確認することにより、その限界部材角を安全側で求めることができる。

今回新たに加えた試験体は、ほぼ前回分の試験体のばらつきの範囲内といえる。よって、式(3)について

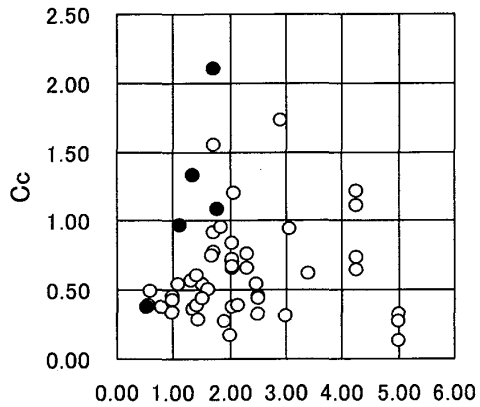


図-2 (a) 拘束係数の影響
($30/1000 \leq Ru < 40/1000$)

●は当該限界部材角の試験体を、○はその他の試験体
を示す。

は、前回の式を用いることができると考えられる。

3. 拘束係数 C_c と拘束領域

端部拘束指標 C_{ce} は拘束係数 C_c と $a/(\sigma_o/F_c)D$ の積を σ_o/F_c と D_L/b の積で除した形となっている。すなわち、拘束のレベルと拘束領域の積を軸力比と偏平率の積で基準化した形となっている。壁柱において軸力比および偏平率が、限界部材角に反比例する傾向があることは、文献 23) に示されており、また、立体耐震壁においても、著者らは、加力方向に投影した耐震壁の長さをその方向でのせい D_L と定義し、 D_L/b が立体耐震壁の限界部材角と反比例することを実験例から示し、 D_L/b を壁柱における偏平率 D/b と同様に扱うことができることを示した。そこで、 C_{ce} を構成する残りの因子 C_c および $a/(\sigma_o/F_c)D$ について、限界部材角との関係について検討し、 C_c および $a/(\sigma_o/F_c)D$ が限界部材角に及ぼす影響を調べる。

4. 拘束効果の影響

図-1 で示した既往の実験における試験体について

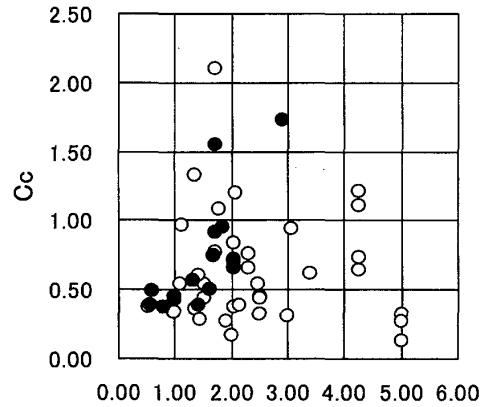


図-2 (b) ($20/1000 \leq Ru < 30/1000$)

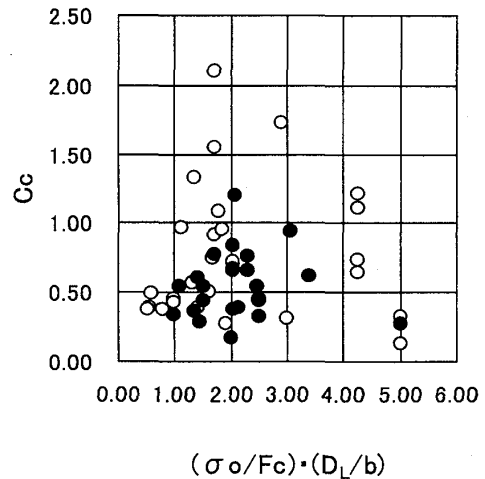


図-2 (c) ($10/1000 \leq Ru < 20/1000$)

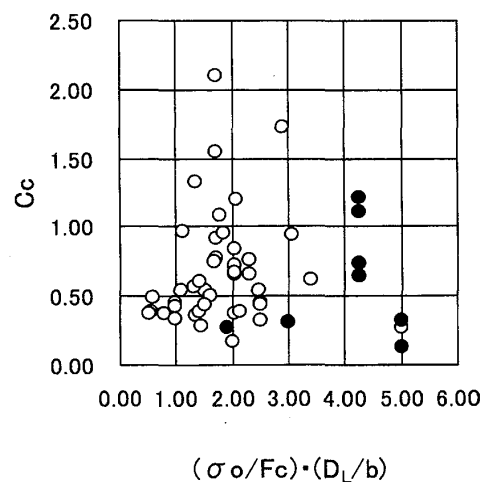
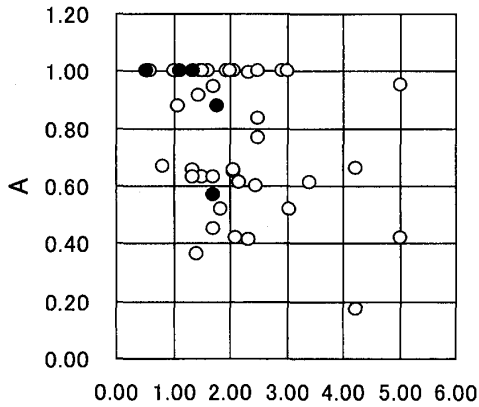


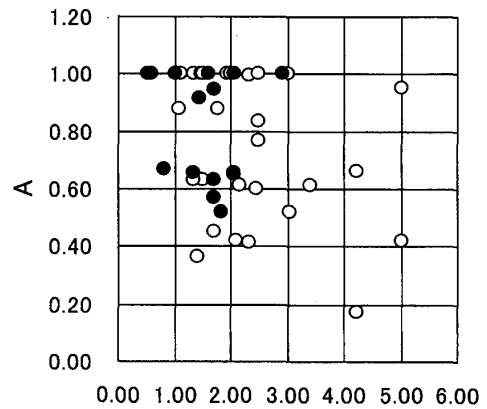
図-2 (d) ($0 \leq Ru < 10/1000$)



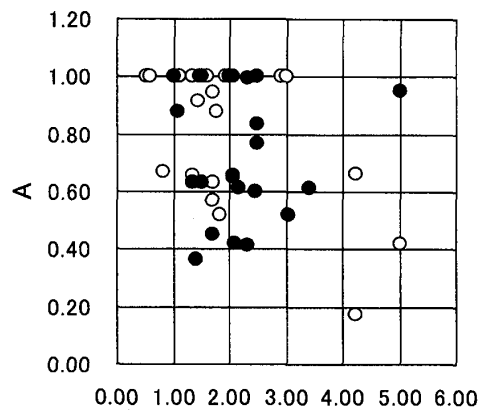
(σ_o/F_c) $\cdot(D_L/b)$
 図-3 (a) 拘束領域の影響
 ($30/1000 \leq Ru < 40/1000$)

●は当該限界部材角の試験体を、○はその他の試験体を示す。

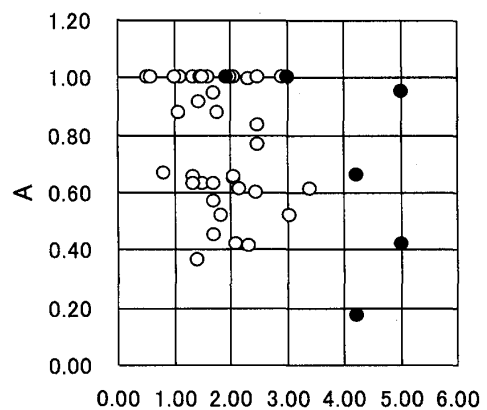
て、軸力比と偏平率の積と、拘束領域における拘束係数との関係を限界部材角ごとに図-2に示す。図中、●は当該限界部材角の試験体を示し、○はその他の範囲の限界部材角の試験体を示す。これらの図より、限界部材角の大きい試験体ほど、軸力比と偏平率の積に対する拘束係数が大きい傾向が明らかである。すなわち、軸力比と偏平率の積で基準化した場合、拘束領域における拘束のレベルが大きいものほど、限界部材角が増大する傾向が明らかである。拘束係数は式(2)に示されるように、拘束筋の体積比、拘束筋降伏点強度、コンクリートの圧縮強度、拘束筋ピッチ、拘束コア断面最小寸法からなる。拘束コンクリートでは、拘束係数の大きいほど、拘束コンクリート強度、拘束コンクリート最大強度時歪が増大し、最大強度以降の応力低下が少ない。したがって、式(2)より、たとえば、コンクリート強度が高い場合は、拘束係数が低下するため、拘束係数を高めるための対策としては、拘束筋量を増やし(体積比を増大させ)、より高強度な鉄筋を拘束筋として使用し、拘束筋を配筋するときの壁高さ方向ピッチを小さくすることが、限界部材角増



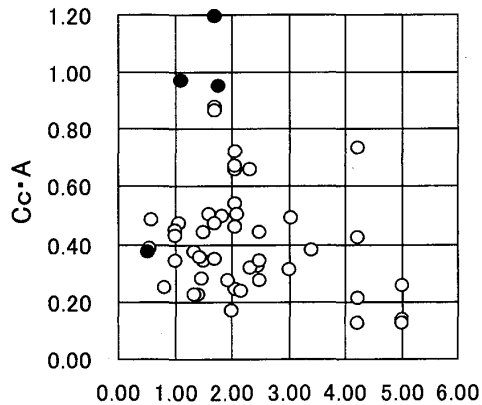
(σ_o/F_c) $\cdot(D_L/b)$
 図-3 (b) ($20/1000 \leq Ru < 30/1000$)



(σ_o/F_c) $\cdot(D_L/b)$
 図-3 (c) ($10/1000 \leq Ru < 20/1000$)



(σ_o/F_c) $\cdot(D_L/b)$
 図-3 (d) ($0 \leq Ru < 10/1000$)



$$(\sigma_o/F_c) \cdot (D_L/b)$$

図-4 (a) 拘束効果と拘束領域の積の影響

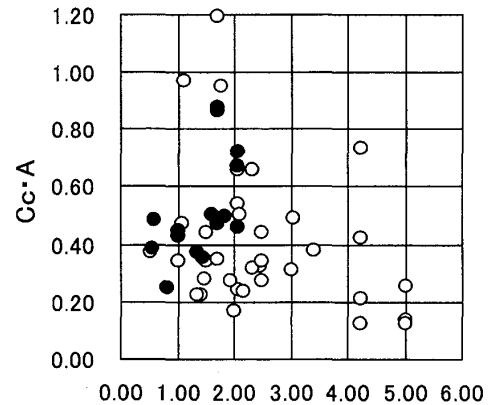
$$(30/1000 \leq Ru < 40/1000)$$

●は当該限界部材角の試験体を、○はその他の試験体を示す。

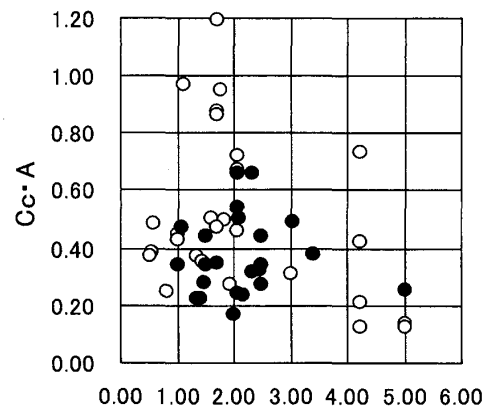
大に有効であるといえる。各パラメーターの拘束効果増大に対する寄与率についても、式(2)より明らかで、たとえば、鉄筋降伏強度を4倍にすると、拘束筋量を2倍にするのと同等の効果が期待できる。

5. 拘束領域の影響

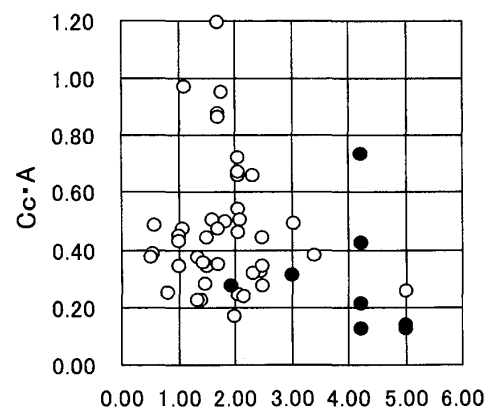
既往の研究²³⁾より、水平荷重時の圧縮領域は $(\sigma_o/F_c)D$ で表すことができると考えられ、立体耐震壁の場合も、加力方向軸に投影した壁長さと圧縮領域の関係は同様であると考えられる。 $a/(\sigma_o/F_c)D$ は圧縮領域に対する拘束領域の比率を示したもので、引張領域では、拘束効果は作用しないと考え、最大値を1としている。前述の拘束係数 C_c の場合と同様に、軸力比と偏平率の積に対する $a/(\sigma_o/F_c)D$ ($=A$ とする) の関係を限界部材角ごとに図-3に示す。図より拘束領域が大きいものほど、限界部材角が増大する傾向が明らかである。ただし、拘束係数の場合と比較するとばらつきは大きい。これは、拘束領域を大きくしても、その領域における拘束のレベルが小さい場合など、端部から先に圧縮破壊して、中央部よりの拘束領域が有効



$$(\sigma_o/F_c) \cdot (D_L/b)$$

図-4 (b) $(20/1000 \leq Ru < 30/1000)$ 

$$(\sigma_o/F_c) \cdot (D_L/b)$$

図-4 (c) $(10/1000 \leq Ru < 20/1000)$ 

$$(\sigma_o/F_c) \cdot (D_L/b)$$

図-4 (d) $(0 \leq Ru < 10/1000)$

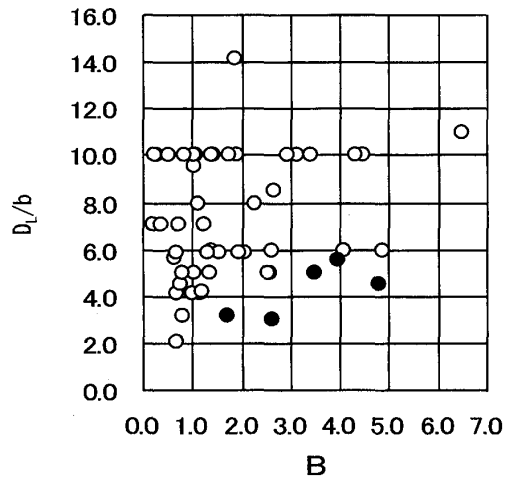


図-5 (a) 偏平率の影響
($30/1000 \leq Ru < 40/1000$)

●は当該限界部材角の試験体を、○はその他の試験体を示す。

に作用しなかった場合などが想定される。

6. 拘束効果と拘束領域の積の影響

前述の拘束効果と拘束領域の両方を考慮した場合の影響について、軸力比と偏平率の積に対する、拘束係数と $a/(\sigma_o/Fc)D$ の積の関係を限界部材角ごとに図-4に示した。図より拘束係数の場合と同程度に限界部材角との関係が示された。前述の拘束効果の影響と拘束領域の影響においては、拘束領域の影響の場合の方がばらつきが大きかったが、拘束効果と拘束領域の積の影響については拘束効果の場合と同程度のばらつきと考えられる。したがって、拘束効果と拘束領域の両方を考慮した場合は、拘束効果の影響の方が強く表れていると思われる。

7. 偏平率の影響

端部拘束指標のうち偏平率を除く $Cc \cdot \{a/(\sigma_o/Fc)D\} / (\sigma_o/Fc)$ ($=B$ とおく) と偏平率 D_L/b との関係を限界部材角ごとに図-5に示す。図より、偏平率の大きい試験体ほど、限界部材角が小さいことが

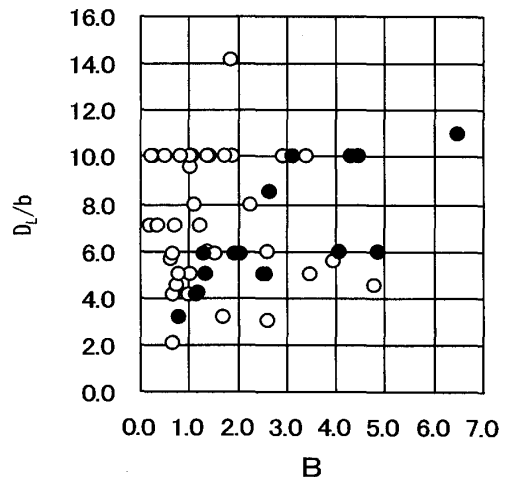


図-5 (b) ($20/1000 \leq Ru < 30/1000$)

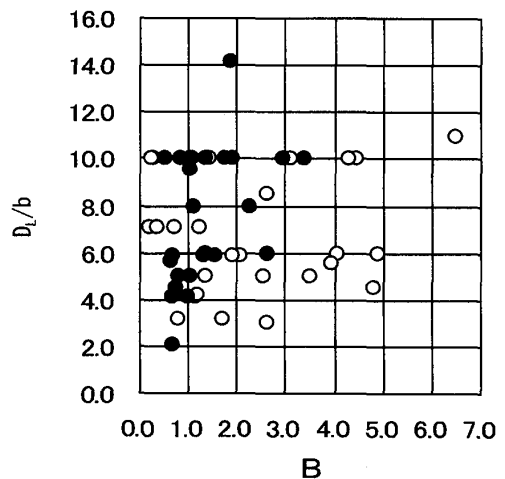


図-5 (c) ($10/1000 \leq Ru < 20/1000$)

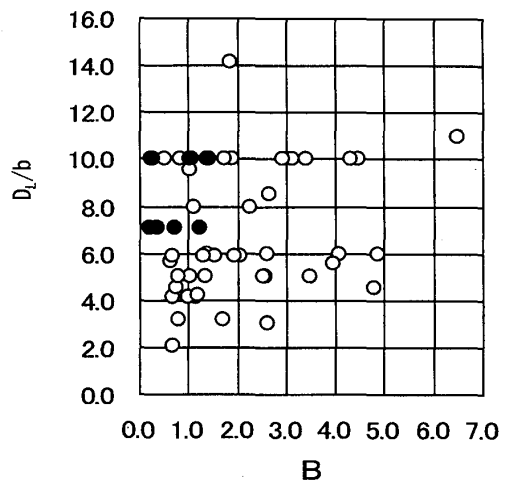


図-5 (d) ($0 \leq Ru < 10/1000$)

わかる。偏平率の影響については、拘束効果や拘束効果と拘束領域の積の場合と同程度のばらつきであり、偏平率が限界部材角に及ぼす影響は強いといえる。偏平率は一般に多く用いられる正方形断面の柱とは違い、偏平断面のコア壁等の立体耐震壁や壁柱に特有のパラメーターであり、正方形断面柱の靱性を考慮するにあたっては特に問題とされていない。しかし、鉄筋コンクリート造超高層建物にコア壁等の立体耐震壁や壁柱が用いられることが多くなってきていることから、偏平率に対する配慮が重要性を増していると思われる。図-5より、限界部材角が $10/1000\text{rad}$ 以下のものでは、偏平率が7以上となっており、偏平率の大きい立体耐震壁や壁柱では、注意を要する。構造計画上、靱性確保の点からは偏平率が小さい方が好ましいが、他の理由により偏平率が大きくなる場合は限界部材角が小さくなる可能性が高いので、前述の拘束効果や拘束領域など、他のパラメーターにより靱性を確保することが望ましい。また、本論文で用いている偏平率 D_t/b の D_t は壁板を加力方向軸へ投影したときの長さ、と定義しているが、これは入力方向によって偏平率が変化することを意味している。したがって、偏平率を考慮する場合は、靱性確保にとって最も不利な方向、すなわち、偏平率が最も大きくなる方向の偏平率で靱性を検討する必要がある。

8. まとめ

コア壁等の立体耐震壁や壁柱などの鉄筋コンクリート造耐震壁の靱性を向上させる方法として、耐震壁圧縮側端部コンクリートを拘束筋によって拘束する方法が考えられる。本研究では、端部拘束の影響について以前に提案した端部拘束指標に関して、提案時に検討した既往の実験結果に、最近行われた実験の結果を合わせて、特に、コンクリート拘束効果、拘束筋による圧縮領域コンクリートの拘束範囲、コア壁の偏平率が限界変形角に及ぼす影響について検討した。検討の結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 端部拘束指標に関して、最近の実験結果を加えての限界部材角との関係は、前回の範囲内にあった。
- 2) 拘束効果、拘束領域、および両者の積は、限界部材角との明瞭な関係が認められた。ただし、拘束領域より、拘束効果の影響の方がより明確であった。
- 3) 拘束効果と拘束領域の積は、拘束効果の場合と同程度に限界部材角との関係が明瞭であった。
- 4) 偏平率が大きくなるほど限界部材角が小さくなる傾向が明らかとなった。計画上、偏平率が大きくなる場合は拘束効果、拘束領域などにより靱性を確保することが必要である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、平成18年度福井工業大学特別研究費のご支援をいただきました。深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 仲地唯治ほか：コア壁の靱性確保に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.265-268，1994.9
- 2) 仲地唯治ほか：壁柱の端部拘束効果に関する実験的研究（高層鉄筋コンクリート造壁式ラーメン構造物の耐震性能に関する研究），第7回日本地震工学シンポジウム，pp.1189-1194，1986
- 3) 仲地唯治，平石久廣ほか：壁柱の靱性確保に関する実験的研究（高層壁式ラーメン構造に関する研究），日本建築学会大会

学術講演梗概集, pp.191-192, 1987.10

- 4) 坂口昇ほか: RCコアウォールシステムの実用化に関する研究 (その2 コア壁の45°方向加力実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 451-452, 1992. 8
- 5) 新田隆雄ほか: 高軸力を受ける壁柱の実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 561-562, 1992. 8
- 6) 仲地唯治, 坂壽二: 鉄筋コンクリート造耐震壁の拘束筋による靱性確保に関する実験的研究, 日本建築学会構造工学論文集, Vol. 49B, 2003. 3
- 7) 武田力ほか: 二方向水平力と鉛直力を受ける鉄筋コンクリートL形断面耐震壁の曲げ終局強度, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 293-294, 1994. 9
- 8) 荒井康幸ほか: 二方向水平力と軸圧を受ける鉄筋コンクリートL形断面耐震壁の曲げ終局強度, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 2, pp. 1037-1042, 1996
- 9) 有馬久智ほか: 変動軸力を受けるT型壁の強度と変形に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 2, pp. 1043-1048, 1996
- 10) 大久保ほか: 高軸力を受けるL型壁の隅角部拘束効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 2, pp. 1031-1036, 1996
- 11) 有馬久智ほか: 高軸力を受ける高強度RC造L型耐震壁の復元力特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 2, pp. 1089-1094, 1997
- 12) 小西覚ほか: 鉄筋コンクリート造L型断面耐震壁に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 2, pp. 1083-1088, 1997
- 13) 別所佐登志ほか: H形断面RCコア壁の構造性能確認実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 185-188, 1997. 9
- 14) 竹田拓也ほか: 高強度鉄筋コンクリート造耐震壁の曲げ性状に関する実験的研究 (その1 実験計画と破壊・履歴性状, その2 実験結果の検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 371-374, 1999. 9
- 15) 石橋久義ほか: 制震耐震壁の構造性能に関する研究 (その1 L型断面耐震壁実験概要, その2 L型断面耐震壁実験結果および考察, その3 RC造L型断面耐震壁の3次元非線形有限要素解析), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 595-600, 2001. 9
- 16) 井上貴之ほか: 壁柱の曲げせん断性状に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 373-374, 2001. 9
- 17) 戸沢正美ほか: 超高強度鉄筋コンクリート構造 ($F_c=120\text{N/mm}^2$) の開発 その9 立体耐震壁の曲げせん断実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 455-456, 2002. 8
- 18) 田畑卓ほか: 柱型のないRC連層耐震壁の曲げ変形性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 313-314, 2003. 9
- 19) 古川淳ほか: 鉄筋コンクリート造耐震壁の曲げ変形性能に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 317-318, 2003. 9
- 20) 松本智夫ほか: 柱型のないRC連層耐震壁の曲げ変形性能 (その2 プレキャスト化の影響), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 257-258, 2004. 8
- 21) 竹田史朗ほか: 中央コア壁を有する超高層RC造建物の開発 (その2 L型断面耐震壁の曲げせん断実験概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 389-390, 2005. 9
- 22) 六車熙, 渡辺史夫ほか: 横補強コンクリートの応力ひずみ曲線のモデル化, セメント技術年報, Vol. 34, pp. 429-432, 1980
- 23) 平石久廣ほか: 高層壁式ラーメン鉄筋コンクリート造建物における壁柱の耐震性能評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第439号, pp.133-144, 1992.9

(平成19年3月29日受理)