

論文 H 型鉄骨を内蔵した CES 柱の構造特性

田口 孝^{*1}・永田 諭^{*2}・松井 智哉^{*3}・倉本 洋^{*4}

要旨: H 型鉄骨を内蔵した CES 柱のコンクリートの一体性が構造特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、繊維補強コンクリートによる一体打ち CES 柱および外殻に PCa 繊維補強コンクリートパネルを用いた CES 柱の曲げせん断実験を実施し、比較検討した。その結果、両試験体とも安定した履歴特性を示すことが確認された。一方、一体打ち CES 柱は PCa-CES 柱に比して初期剛性が増加する等、両試験体に差異があることも確認された。

キーワード: 鉄骨コンクリート構造、繊維補強コンクリート、一体性、構造実験、柱試験体

1. はじめに

鉄骨鉄筋コンクリート構造は優れた構造システムであるが、その反面、鉄骨・鉄筋工事の必要性、コスト増加、鉄筋・鉄骨配置に要するスペースの確保等に問題が残る。そこで筆者らは、鉄骨とコンクリートのみからなる合成構造（CES構造：Concrete Encased Steel）に関する研究を継続的に行ってきた^{1)~5)}。これまでの研究では、体積混入率 2.0%の繊維補強コンクリートを用いることで安定した履歴特性を示すことは確認されたが、施工性に若干の課題を残した³⁾。そのため、PCa繊維補強モルタルパネル、およびPCa繊維補強コンクリートパネルで内蔵鉄骨を囲み、その中に普通コンクリートを打設することとした。これによって、安定した履歴特性を示すとともに、施工性の問題は解消されたが、PCaパネル部分と内部コンクリートの一体性について問題点が残った^{4),5)}。

本研究では、PCa パネル部分と内部コンクリートの一体性の改善を図るとともに、一体打ち CES 柱（CES-U）、外殻 PCa パネル使用の PCa-CES 柱（CES-S）の違いが構造特性にどのような影響を及ぼすかについて比較・検討することを目的として、曲げせん断実験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体形状および寸法を図-1 に示す。試験体の柱部分は、断面が $b \times D = 400\text{mm} \times 400\text{mm}$ 、内法高さ $h = 1,600\text{mm}$ （せん断スパン比 $M/QD = 2$ ）である。内蔵鉄骨には、H-300 $\times$ 220 $\times$ 10 $\times$ 15 の H 形鋼を用いた。試験体は 2 体とし、繊維補強

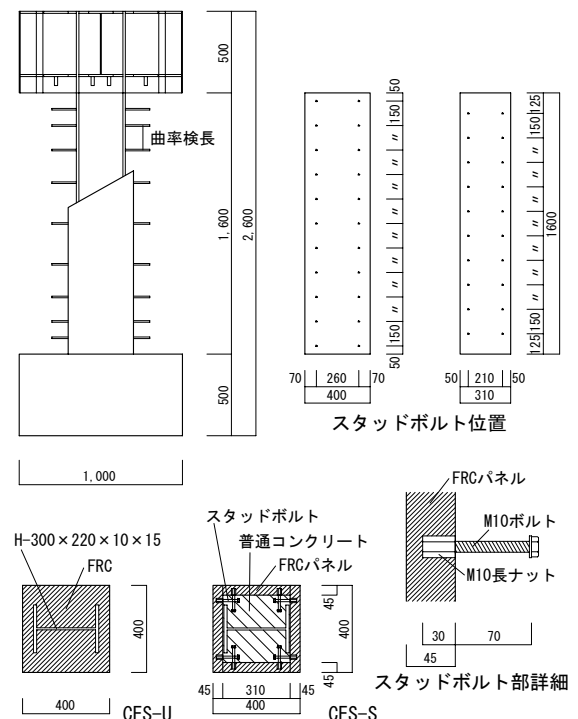


図-1 試験体形状

*1 矢作建設工業（株） 建築技術部 課長 博士（工学）（正会員）

*2 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻（正会員）

*3 豊橋技術科学大学 工学部建設工学系 助手 博士（工学）（正会員）

*4 豊橋技術科学大学 工学部建設工学系 助教授 博士（工学）（正会員）

コンクリート（FRC）による一体打ち CES 柱（CES-U）と、外殻に PCa 繊維補強コンクリートパネルを用い、内部に普通コンクリート（NC）を打設した CES 柱（CES-S）を製作した。CES-S 試験体は、PCa パネル間の接合部および上下スタブとの接合部をエポキシ系接着剤で接着するとともに、PCa パネル内部にスタッドボルトを取り付けることで内部の普通コンクリートとの一体性を高めるようにした。

2.2 使用材料

繊維補強コンクリートに使用した繊維は、繊維直径 0.66mm、長さ 30mm のビニロンファイバー（RF4000）であり、一体打ち、PCa パネルともに体積混入率で 1.5%とした。表－1 に使用した繊維補強コンクリートの調合表を示す。また、表－2 にコンクリートの、表－3 に鉄骨の材料特性を示す。

2.3 荷重方法

荷重は図－2 に示す荷重装置を用いて正負交番逆対称曲げせん断加力を行った。実験は図－2 に示すように、2 本の軸力用ジャッキにより軸力比（ $N/(bD\sigma_B)$ ）で 0.3 に相当する一定圧縮軸力（CES-U 試験体：1,600kN、CES-S 試験体：1,500kN）を負荷した後、水平力ジャッキにより変位制御による繰り返し漸増水平力を荷重した。荷重プログラムは図－3 に示すように、柱上下端の相対水平変位 δ と柱長さ h で与えられる相対部材角（ $R = \delta/h$ ）で、0.005、0.01、0.015、0.02、

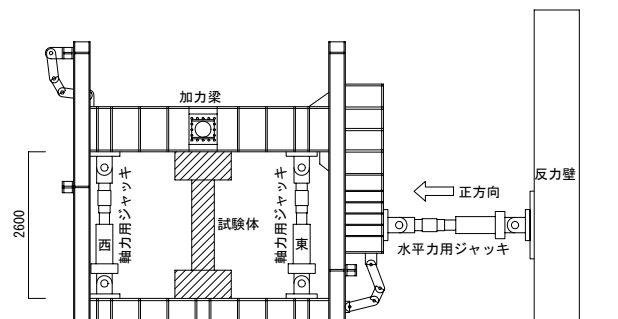
0.03、0.04rad.を 2 サイクルずつ繰り返した後、0.05rad.まで一方向荷重するように設定した。

3. 実験結果と考察

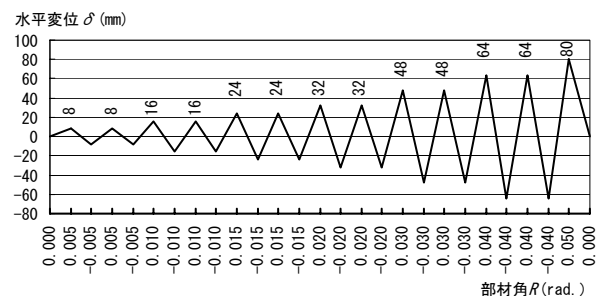
3.1 ひび割れおよび破壊状況

各試験体の $R=0.01\text{rad.}$ 、 $R=0.02\text{rad.}$ におけるひび割れ状況および $R=0.05\text{rad.}$ の最終破壊状況を写真－1 に示す。

CES-U 試験体では、 $R=0.005\text{rad.}$ で柱頭・柱脚部の引張側で、スタブと柱の境界部にひび割れが発生し、同時に柱頭・柱脚部近辺に曲げひび割れが発生した。 $R=0.01\text{rad.}$ では曲げひび割れが



図－2 荷重装置



図－3 荷重プログラム

表－1 繊維補強コンクリート調合表

試験体名	水セメント比 W/C (%)	繊維混入率 vol. (%)	所要量				
			水 W (kg)	セメント C (kg)	細骨材 S (kg)	粗骨材 A (kg)	繊維 V_f (kg)
CES-U	60.0	1.5	182	300	1051	525	19.5
CES-S	53.0	1.5	182	343	1282	536	19.5

表－2 コンクリート材料試験結果

試験体名	種類	圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	材齢
CES-U	FRC	33.5	71
	NC	25.3	45

FRC：繊維補強コンクリート、NC：普通コンクリート

表－3 鉄骨材料試験結果

	鋼種	降伏点 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_U (N/mm ²)	部位
H-300×220 ×10×15	SS400	288.6	450.5	フランジ
		298.8	454.9	ウェブ

進行するとともに、柱頭・柱脚部にせん断ひび割れが発生し、圧縮破壊によるひび割れも確認された。その後、変形角の増加に伴い曲げひび割れ、せん断ひび割れが増加し、特に圧縮破壊が進行して最終状態を迎えた。

CES-S 試験体では、 $R=0.005\text{rad.}$ で柱頭・柱脚部の引張側でスタブと柱の境界部（PCa パネルの境界）の接着面が剥離し始め、第2サイクル目終了時には、この剥離が全周に渡って確認された。 $R=0.01\text{rad.}$ には、PCa パネルの柱頭・柱脚部で圧縮破壊によるひび割れが発生し、さらに、PCa パネルどうしの接着面でもひび割れが発生した。 $R=0.015\text{rad.}$ に達すると柱頭・柱脚部の圧縮破壊が進行し、PCa パネル表面が剥離する現象が見られた。さらに、 $R=0.03\text{rad.}$ に達すると、PCa パネルどうしの接着面のひび割れが進行して柱頭部から柱脚部まで完全に繋がった。 $R=0.04\text{rad.}$ に達すると、その接着面のひび割れ幅が進行するとともに、柱頭・柱脚部の PCa パネル表面はほとんど剥離した。しかし、 $R=0.05\text{rad.}$ まで PCa パネル中央部ではひび割れは確認できなかった。

クラックスケールにより測定した、各部材角 R の第1サイクル除荷時の最大残留せん断ひび割れ幅を図-4に示す。

この結果、CES-U 試験体は CES-S 試験体に比べて $R=0.02\text{rad.}$ 以降、せん断ひび割れ幅が増加する傾向にあることが確認された。また、ここでは示していないが、CES-U 試験体は部材角 R の進行とともに徐々に曲げひび割れ幅が進行する結果が得られ、CES-S 試験体ではスタブと柱の境界部（PCa パネル境界部）の接着面が目開きすることによって曲げ変形が発生する結果が得られている。従って、両試験体のひび割れ幅の差異は、PCa パネル使用の有無によるものと推測される。すなわち、CES-U 試験体は一体化されているために、柱にせん断ひび割れ、曲げひび割れが発生するのに対し、CES-S 試験体は PCa パネルを使用していることにより、スタブと柱の境界部に変形や損傷が集中することによって他の箇所でひび割れが低減し、特に曲げひび割れはほとんど発生しないものと考察される。

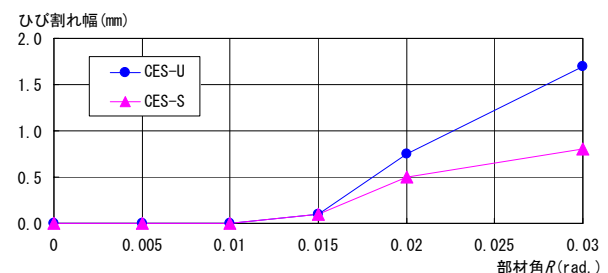


図-4 最大残留せん断ひび割れ幅

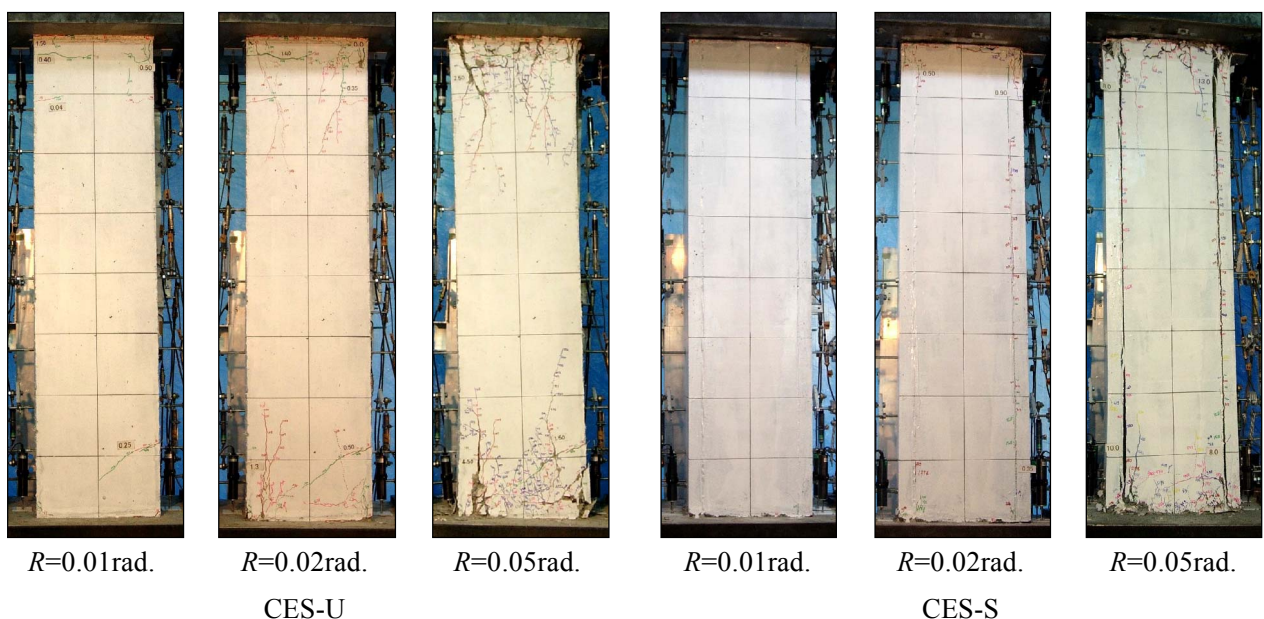


写真-1 ひび割れおよび破壊状況

3.2 水平荷重－水平変形関係

実験結果における水平荷重－水平変形関係を表－４，図－５に示す。なお，図中の●は内蔵鉄骨の柱頭および柱脚部に貼付した歪ゲージのいずれか一つが最初に降伏歪に達した点を，▲は最大耐力点を示している。また，図中の一点鎖線は $P-\delta$ 効果を考慮した累加強度理論⁶⁾による終局強度を示している。

CES-U 試験体は，鉄骨が降伏するまで弾的な挙動を示し，正載荷時 $R=0.0126\text{rad.}$ で，負載荷時 $R=-0.0138\text{rad.}$ で最大耐力に達した後，耐力は低下する傾向が確認された。ただし， $R=\pm 0.015\text{rad.}$ から $R=\pm 0.04\text{rad.}$ の間は，顕著な耐力低下は見られず， $R=0.05\text{rad.}$ で耐力低下が見られた。

CES-S 試験体は CES-U 試験体と比べ，鉄骨降伏の発生した変形角はほぼ同様であるのに対し，最大耐力の発生した変形角は，正載荷時 $R=0.0252\text{rad.}$ ，負載荷時 $R=-0.0203\text{rad.}$ と大きな変形量を示した。また，最大耐力発生後も $R=\pm 0.04\text{rad.}$ まで顕著な耐力低下は見られなかった。しかし， $R=0.05\text{rad.}$ では，CES-U 試験体と同様に若干の耐力低下が見られた。

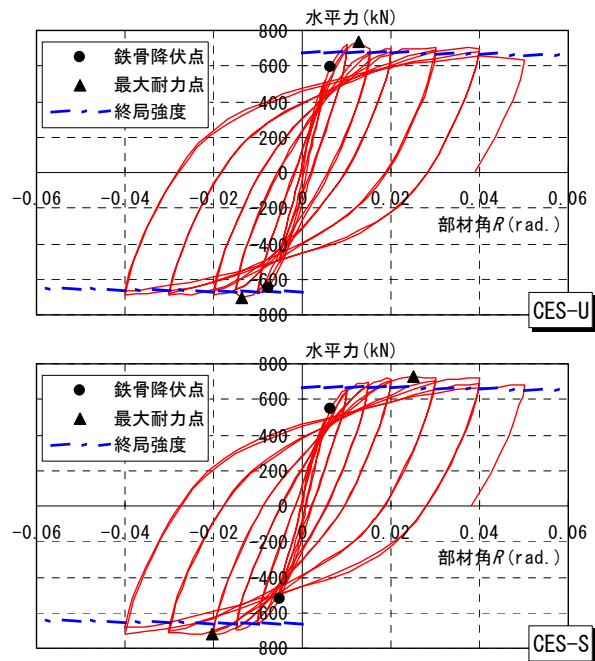
図－６には両試験体の水平荷重－水平変形関係の包絡線を比較したものを示している。

いずれの試験体も鉄骨の降伏が発生する ($R=0.006\text{rad.}$ 程度) までは剛性低下は少なく，弾的な挙動を示している。しかし，CES-U 試験体では，CES-S 試験体と比較して，若干高い初期剛性を示した。また，CES-U 試験体では，最大耐力発生 ($R=0.0126\text{rad.}$) 後，耐力低下が確認されるが，その後は，CES-S 試験体と同様に $R=0.04\text{rad.}$ まで大きな耐力低下は見られない。

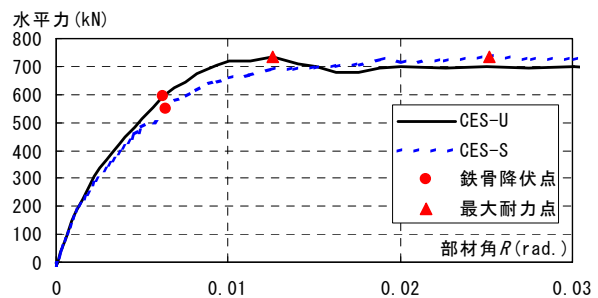
CES-U 試験体が若干高い初期剛性を示した理由としては，CES-U 試験体は一体打ちであるため，柱部分とスタブのコンクリートに一体性があり，さらに繊維補強コンクリートを用いているため，その引張剛性が初期剛性の増加に寄与しているものと考察される。また，最大耐力時には，この繊維補強コンクリートの引張耐力も累加されているが，図－４に示されるひび割

表－４ 実験結果

試験体	載荷方向	部材降伏時		最大耐力時	
		R_y (rad.)	P_y (kN)	R_{max} (rad.)	P_{max} (kN)
CES-U	正	0.0062	591.9	0.0126	734.4
	負	-0.0078	-647.4	-0.0138	-704.4
CES-S	正	0.0063	546.1	0.0252	732.2
	負	-0.0051	-519.1	-0.0203	-723.9



図－５ 水平荷重－水平変形関係



図－６ 水平荷重－水平変形の包絡線

れ幅が増加し始めた変位に耐力低下が発生した変位が一致することからも，損傷が増加すると，この引張耐力が無くなることによって耐力低下が発生したものと考えられる。ただし，最大耐力発生後は，繊維補強コンクリートの引張耐力分は低下しても，鉄骨の拘束効果等は低下しないことから，急激な耐力低下は見られず，安定した挙動を示したものと考察される。一方，CES-S 試験体は PCa パネル境界部で初期の段階

から接着面が剥離するため、CES-U 試験体に比べて剛性が小さいものと考えられる。また、3.1 節でも見られたように、外殻 PCa パネルの損傷が少ないことから、曲げ応力状態にある柱断面内の圧縮領域において、損傷による圧縮面積の変化が少ないために曲げ耐力低下がほとんど無く、優れた靱性性能を示すものと考えられる。ただし、大変形時 ($R=0.05\text{rad.}$) になると、外殻 PCa パネルが剥離することによって、耐力が低下するものと考えられる。

3.3 軸変形－水平変形関係

軸変形－水平変形関係を図－7 に示す。

CES-U 試験体は、 $R=0.015\text{rad.}$ まで、すなわち最大耐力が発生するまでは、一様な軸変形を繰り返すが、その後、繰返し载荷を行うごとに圧縮変形が進行し、 $R=-0.04\text{rad.}$ の第 2 サイクル目では、6.8mm まで圧縮変形が増加していた。

CES-S 試験体は、 $R=0.02\text{rad.}$ まで、すなわち CES-U 試験体と同様に最大耐力が発生するまでは、一様な軸変形を繰り返す、その後、繰返し载荷を行うごとに圧縮変形が増加している。ただし、CES-U 試験体ほどの圧縮変形は発生しておらず、 $R=-0.04\text{rad.}$ の第 2 サイクル目の段階で、3.0mm であった。

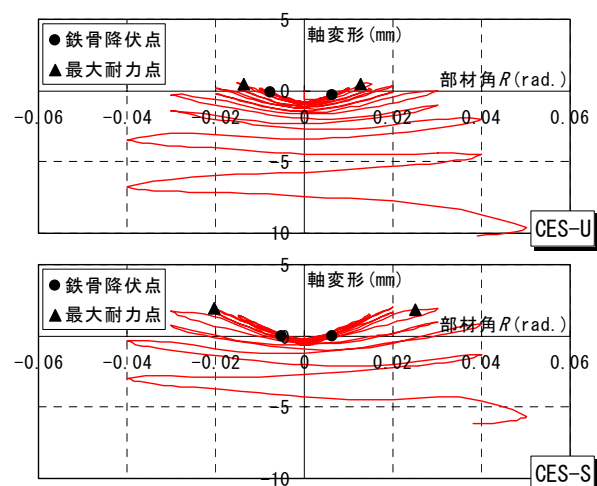
CES-U 試験体と CES-S 試験体の軸変形挙動に差異が発生した理由としては、3.1 節、3.2 節でも示したように、一体打ちの CES-U 試験体ではコンクリートが圧縮縁から順次損傷し、特に圧縮側の破壊が進行することで圧縮変形が進行するのに対し、CES-S 試験体は外殻 PCa パネルの損傷が少なく、外殻 PCa パネルでかなりの圧縮力を負担し、コア部分のコンクリートと鉄骨の

圧縮歪みの進行が緩和されるため、圧縮変形の進行が CES-U 試験体に比して遅延したものと考えられる。

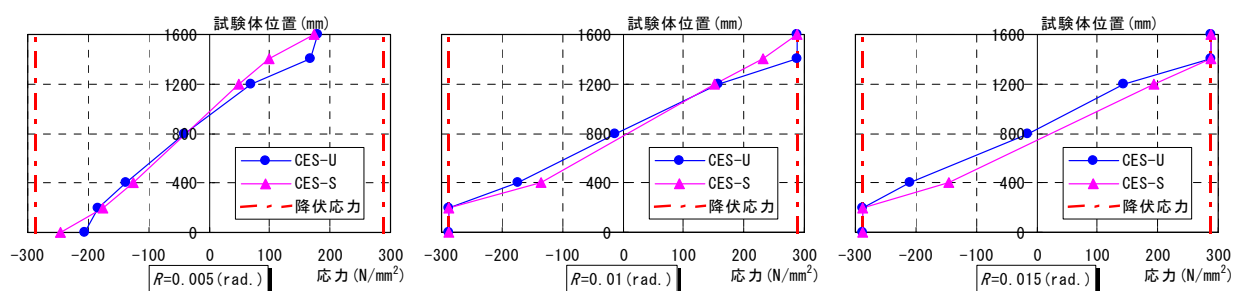
3.4 鉄骨の応力状態

内蔵鉄骨フランジの応力状態を図－8 に示す。応力の計算は、鉄骨に貼付した歪ゲージの値および材料試験結果を用いて、鋼材の応力－歪関係を完全バイリニアにモデル化して換算した。

この結果、小変形時 ($R=0.005\text{rad.}$) を比較すると、CES-S 試験体ではスタブと PCa パネル境界部の応力が最も大きく、柱の中央部に向かって直線的に応力が減少しているのに対し、CES-U 試験体では、最大値の発生箇所は同じであるが、その内側の応力も大きくなっていることが分かる。このことから、両試験体の内蔵鉄骨に発生する応力状態には差異があることが分かる。これは、CES-S 試験体ではスタブと PCa パネル境界部のみに多くの変形が集中するのに対し、CES-U 試験体では曲げひび割れの発生する、スタブから少し離れた部分まで変形している



図－7 軸変形－水平変形関係



図－8 内蔵鉄骨フランジの応力状態

るためと考えられる。ただし、変形が大きくなるにつれ、両試験体ともほぼ同様な応力状態になることが分かる。

3.5 等価減衰定数

実験結果から得られた等価粘性減衰定数を図-9に示す。ここで、図中の()内の数字は、第1サイクル目,第2サイクル目を表しており、正载荷,負载荷の平均値で表している。

CES-U 試験体, CES-S 試験体ともほぼ同様な結果を示し、変形が進むほど増加する傾向が見られた。また、両者を比較すると CES-U 試験体の方が、わずかであるが大きな値を示していることが分かる。これは、3.1 節のひび割れ状況からも分かるように、CES-U 試験体の方が、損傷が大きく発生することによって、より多くのエネルギーを吸収しているためと考察される。

3.6 曲率分布状況

実験結果から得られた鉄骨の正载荷時の曲率分布状況を図-10に示す。ここで、曲率の計算は図-1の曲率検長用の変位値を用いた。

CES-U 試験体, CES-S 試験体ともほぼ同様な傾向を示し、柱頭・柱脚部近傍での変形が大きいことが分かる。従って、試験体の変形はほとんど柱頭・柱脚部近傍で発生しているものと言える。また、試験体の違いによる差異もほとんど見られないことから、曲率分布に関しては試験体の違いによる影響はほとんど無いものと考察される。

4. まとめ

本研究では、H型鉄骨を内蔵した CES 柱について曲げせん断加力実験を実施し、特に一体打ち CES 柱と外殻 PCa パネル使用の CES 柱の違いが構造特性にどのような影響を及ぼすかについて比較・検討を行った。

実験の結果、両試験体とも良好な履歴特性を示したが、一体打ち CES 柱は、PCa-CES 柱に比して、大きなひび割れが発生するとともに、最大耐力後に若干の耐力低下が発生することが確認された。また、初期剛性や内蔵鉄骨の発生応力にも差異があることが分かった。

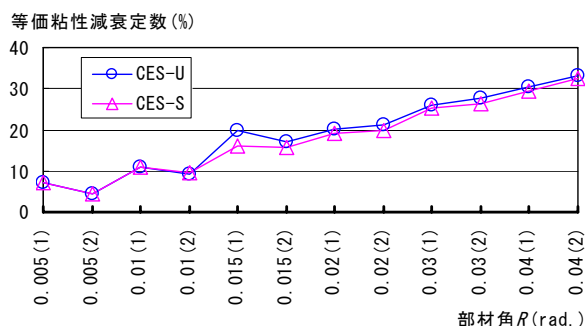


図-9 等価粘性減衰定数

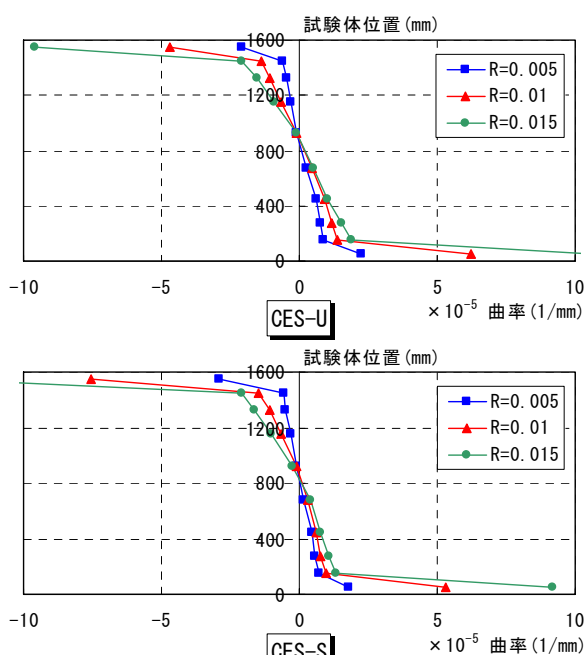


図-10 曲率分布状況

謝辞

本研究は建築研究開発コンソーシアムの共同研究「鉄骨コンクリート構造システムに関する研究開発」(委員長:倉本洋・豊橋技術科学大学助教授)の一環として実施されたものである。ここに記して関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1)高橋宏行, 前田匡樹, 倉本洋: 高靱性型セメント系材料を用いた鉄骨コンクリート構造柱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集, Vol.21, No.3, pp.1075-1080, 2000.7
- 2)足立智弘, 倉本洋, 川崎清彦: 繊維補強コンクリートを用いた鉄骨コンクリート合成構造柱の構造性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.271-276, 2002.7
- 3)足立智弘, 倉本洋, 川崎清彦, 柴山豊: 高軸力を受ける繊維補強コンクリート-鋼合成構造の構造性能に関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.25, No.2, pp.289-294, 2003.7
- 4)柴山豊, 倉本洋, 川崎清彦, Fauzan: 繊維補強モルタルパネルで被覆した CES 構造柱の構造性能に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.157-162, 2004.7
- 5)柴山豊, 倉本洋, 永田諭, 川崎清彦: 繊維補強コンクリートパネルで被覆した鉄骨コンクリート柱の復元力特性に関する研究, Vol.27, No.2, pp.241-246, 2005.7
- 6)日本建築学会: 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1987