

大幅厚比角形断面を有するコンクリート充填鋼管のせん断特性

複合構造分野 宇渡 康正

1. はじめに

コンクリート充填鋼管 (Concrete Filled steel Tubular: 以下, CFT という) 部材とは鋼管にコンクリートを充填した合成部材であり, 耐荷力・靱性に優れている。そのため土木・建築構造に広く用いられてきており, それに伴い研究も活発に行なわれている。ただし, 幅厚比: B (鋼管幅) / t_s (鋼管厚) や径厚比: D (鋼管外径) / t_s (鋼管厚) が小さなものを対象とした研究が多い。それは 10~20cm 程度の既製の鋼管を利用して供試体を作成しているため, あるいは鋼製橋脚にコンクリートを充填するという形式で供試体を作成しているというのが大半を占めているためである。土木構造物は建築構造物に比べて相対的に軸方向耐力に対する作用軸力比が小さくかつ, 断面寸法が大きくなることを考えれば, より幅厚比や径厚比が大きな CFT 部材を利用することがより経済的かつ合理的であると考えている [1]。また, CFT 部材のせん断に関する研究はほとんどされていない。そこで本研究では建築文献 [2] における制限幅厚比 72 (SS400 相当) を大きく超える角形 CFT 部材を対象とし, 曲げモーメントとせん断力が同時に作用する逆対称曲げ荷重実験を行い, その耐荷力特性, 特に鋼管および充填コンクリートが負担するせん断力の割合を明確にすることで, より合理的な設計法を確立するための基礎資料を得ることを本研究の目的とする。

2. 供試体

供試体は幅厚比 3 種類とせん断スパン比 (M/Sd) 2 種類を実験変数とした計 6 体を用いた。鋼管に用いた鋼材は SS400 相当の圧延板, また充填用コンクリートには設計強度 24 (MPa) のものを用いた。供試体とその両端に設置する加圧板とは溶接により一体化させた。これにより, 荷重時に鋼管端部において局部座屈の発生が危惧されたため, 端部の増厚補強を行った。ここで各 6 供試体の諸元と使用した材料特性を表-1 に示す。供試体名については T に続く数字が公称板厚の略称を, また S に続く数字がせん断スパン比を示している。

3. 実験方法

図-1 に荷重設置概略および断面力を示す。荷重方式は供試体の両端を荷重点および支点とするような逆対称の 4 点曲げである。これにより, 供試体中央断面にて正負反転する曲げモーメントならびに供試体全断面に様にせん断力が作用する仕組みになっている。荷重方法としては一方向単純漸増荷重とし, 供試体の最大荷重を得る

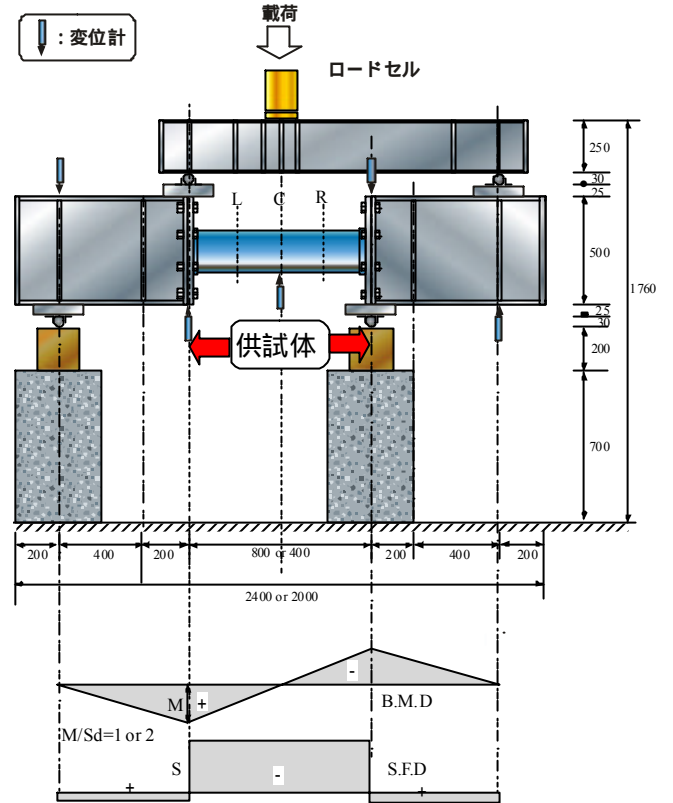


図-1 荷重設置概略図ならびに断面力 (単位: mm)

まで荷重を行った。

計測は荷重, 変位およびひずみの 3 項目とした。具体的には荷重に関しては供試体上方に位置するロードセルにて, また変位に関しては, 図-1 に示すように供試体両端ならびに中央点の変位と供試体を剛結した治具の荷重点ならびに支持点反対側に位置する変位を 5 基の 25mm もしくは 50mm 変位計にて計測を行った。さらに, ひずみの測定は鋼管フランジに貼り付けた 1 軸ひずみゲージならびに鋼管ウェブに貼り付けた 3 軸ひずみゲージによって行った。その位置は図-2 に示すように, 1 軸ひずみゲージは上下フランジ中央と, 左右にそれぞれ部材長の 1/4 離れた計 3 箇所。またウェブの 3 軸ひずみゲージは, 1 軸ひずみゲージと同様の 3 ライン上ならびに中央から

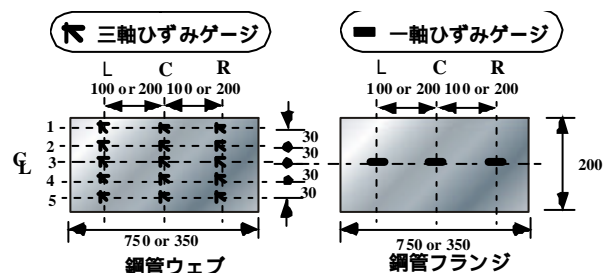


図-2 ひずみゲージ配置図 (単位: mm)

30mm間隔で5箇所の計15箇所とした。なお3軸ひずみゲージの呼称は位置(L,C,R)と高さ位置(1~5)を組合せて呼ぶこととする。

4. 算定耐力

次に、鋼構造物設計指針[3]、コンクリート標準示方書[4]およびSRC規準[2]に記載の耐力評価式を示す。設計せん断耐力については、土木学会の文献ではCFT部材のせん断耐力は鋼管のみが受け持つとしており、ここでは文献[3]を使用するものとし、文献[4]では上下フランジを鉄筋換算し、鋼管ウェブをせん断補強鉄筋とみなして算出した。なお、本研究では軸力が作用していないため文献[2]によるせん断耐力は算定できない。設計曲げ耐力については、文献[2,3]を用いて算出した。表-1には材料試験結果から得られた特性も用いて、文献[2,3,4]に示された設計せん断耐力ならびに曲げ耐力を荷重換算したものを示す。以下には具体的は式を表記したが、式中の記号に関しての詳細は文献[2,3,4]を参照されたい。

(1) せん断耐力式

「鋼構造物設計指針」:

$$S_s = t_{cul} A_w \quad (1a)$$

$$t_{cul} = t_u (R_r - 0.35)$$

$$= \left(\frac{0.6}{R_r} \right)^{0.32} f_p t_u (0.35 < R_r) \quad (1b)$$

「コンクリート標準示方書」標準RC部材:

$$S_{yd} = S_{cd} + S_{sd} \quad (2a)$$

$$S_{cd} = b_d \cdot b_p \cdot b_n \cdot s_{vcd} \cdot b \cdot d / g_b \quad (2b)$$

$$S_{sd} = [A_w s_{wyd} (\sin a_s + \cos a_s) / s_s] z / g_b \quad (2c)$$

$$s_{vcd} = 0.20 \cdot \sqrt[3]{s_c} \quad (2d)$$

「コンクリート標準示方書」ディープビーム:

$$S_{ydd} = S_{cdd} + S_{sdd} \quad (3a)$$

$$S_{cdd} = b_d \cdot b_p \cdot b_a \cdot s_{dd} \cdot b \cdot d / g_b \quad (3b)$$

$$S_{sdd} = f \cdot S_{sd} \quad (3c)$$

$$s_{dd} = 0.19 \sqrt{s_c} \quad (3d)$$

$$f_p = -0.17 + 0.3(a_v / d) + 0.33 / p_{wb} \leq 1.0 \quad (3e)$$

(2) 曲げ耐力式

「鋼構造物設計指針」:

$$M_{uv} = f_b \cdot s_{cuo} \cdot Z \quad (4a)$$

「SRC規準」:

$$M_U = M_{cU} + M_{sU} \quad (5a)$$

$$M_{cU} = (1 - x_n) x_n \cdot B_c^3 \cdot g_{cU} \cdot s_c \quad (5b)$$

$$M_{sU} = (1 - t_s / B) B^2 \cdot t_s \cdot s_{sy} + 2(1 - x_n) x_n \cdot B_c^2 \cdot t_s \cdot s_{sy} \quad (5c)$$

5. 結果と考察

(1) 破壊形式

実験後の充填コンクリートの破壊状況はせん断スパン比1と2の供試体で大きな差異が認められた。せん断スパン比1の供試体では、ウェブ中央付近から斜め上下に向かって発生する斜めひび割れを伴ってせん断破壊したもので、供試体T32-S1ならびにT16-S2がそれに相当する。なお供試体T10-S1に関しては、ひび割れが一切生じていなかった。せん断スパン比2の全供試体では、上下フランジの圧縮側に局部座屈が発生し、かつ充填コンクリートに鉛直方向に向かって発生する曲げひび割れを伴った曲げ破壊生じており、せん断スパン比2の全ての供試体がそれに相当する。前者の一例としてT32-S1、後者の一例としてT32-S2をそれぞれ写真-1ならびに写真-2に示す。なお、写真には特に目立ったひび割れおよび局部座屈の拡大写真を併せて示している。

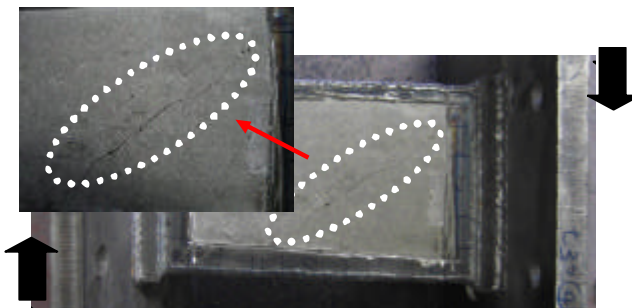


写真-1 供試体 T32-S1 の破壊状況

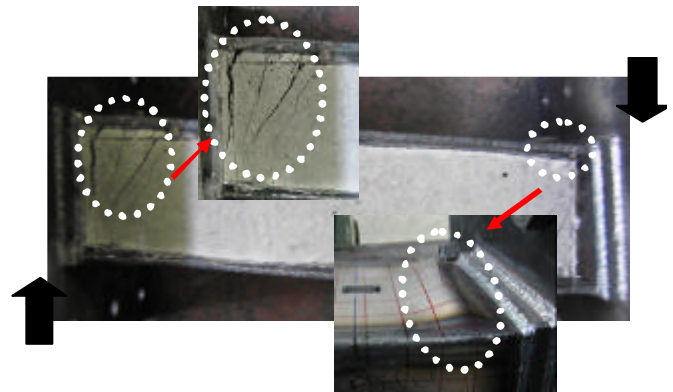


写真-2 供試体 T32-S2 の破壊状況

表-1 供試体概要ならびに設計耐力

| 供試体名 | 供試体諸元 | | | | | | 鋼材の材料特性 | | | | | コンクリートの材料特性 | | 設計せん断耐力 | | | | | | | 設計曲げ耐力 | |
|--------|-------|-------|-----|---------|-------|---------|----------|----------|-------|-------|-------|-------------|----------|-----------|----------|-----------------------------|-----------|-----------|-------------------------------|----------|-----------|--|
| | 公称板厚 | 実測板厚 | 鋼管幅 | 幅厚比 | 供試体全長 | せん断スパン比 | 降伏強度 | 引張強度 | 弾性係数 | 圧縮強度 | 弾性係数 | 文献[3] | | 文献[4] | | | | | 文献[3] | 文献[3] | | |
| | | | | | | | | | | | | 局部座屈考慮 | 局部座屈無視 | 標準RC(棒)部材 | | | ディープビーム | | 合成柱 | 合成柱 | | |
| | t_0 | t_s | B | B/t_s | L | a/d | s_{sy} | s_{sb} | E_s | s_c | E_c | P_{ss} | P_{sU} | P_{cd} | P_{sd} | $P_{cd} = P_{sd} + P_{sdd}$ | P_{cdd} | P_{sdd} | $P_{ydd} = P_{cdd} + P_{sdd}$ | P_{sm} | P_{src} | |
| (mm) | (mm) | (mm) | | (mm) | | (MPa) | (MPa) | (GPa) | (MPa) | (GPa) | kN | kN | kN | kN | kN | kN | kN | kN | kN | kN | kN | |
| T32-S1 | 3.2 | 3.10 | 200 | 65 | 400 | 1 | 181.6 | 307.4 | 195.1 | 25.8 | 25.4 | 200.8 | 209.8 | 68.0 | 323.6 | 391.5 | 275.4 | 77.3 | 352.7 | 640.8 | 567.3 | |
| T32-S2 | 3.2 | 3.10 | 200 | 65 | 800 | 2 | 181.6 | 307.4 | 195.1 | 26.4 | 25.3 | 281.1 | 293.7 | 95.9 | 453.0 | 548.9 | 155.2 | 245.2 | 400.4 | 383.2 | 343.0 | |
| T16-S1 | 1.6 | 1.57 | 200 | 127 | 400 | 1 | 215.9 | 335.3 | 199.5 | 25.4 | 25.4 | 96.3 | 128.5 | 54.0 | 195.8 | 249.8 | 219.1 | 66.8 | 285.9 | 293.1 | 378.2 | |
| T16-S2 | 1.6 | 1.57 | 200 | 127 | 800 | 2 | 215.9 | 335.3 | 199.5 | 26.2 | 25.4 | 134.8 | 179.8 | 76.4 | 274.1 | 350.5 | 124.3 | 176.1 | 300.4 | 175.6 | 228.7 | |
| T10-S1 | 1.0 | 0.95 | 200 | 210 | 400 | 1 | 209.8 | 320.7 | 195.1 | 18.9 | 22.6 | 48.8 | 76.3 | 41.5 | 115.7 | 157.2 | 160.4 | 55.2 | 215.6 | 151.7 | 233.3 | |
| T10-S2 | 1.0 | 0.95 | 200 | 210 | 800 | 2 | 209.8 | 320.7 | 195.1 | 25.7 | 25.4 | 68.3 | 106.8 | 64.3 | 162.0 | 226.3 | 104.5 | 126.0 | 230.5 | 97.7 | 144.8 | |

(2) 鋼管圧縮側のひずみ

図-3に荷重 P と下フランジのR位置のひずみの履歴曲線を包絡線により示す。この結果より、せん断破壊をしたせん断スパン比1の供試体にはいずれもひずみが正の値をとっており、フランジに引張力が生じている。曲げの影響を受ければ、せん断スパン比2の供試体のようにひずみが負の値をとるはずなので、せん断スパン比1の供試体は曲げ変形よりもせん断変形が卓越しているのがわかる。図において印の位置でひずみが反転している現象が確認できる。これは、圧縮を受けていた測定箇所鋼管が局部座屈発生に伴い圧縮応力の低減が生じたためと考えられる。なお観察においても局部座屈発生後にも耐力が上昇していることは確認できた。

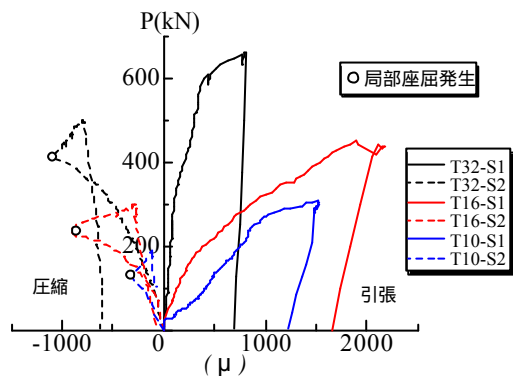


図-3 荷重 下フランジひずみ関係

(3) 主応力とその方向

次に、鋼管ウェブに働く主応力とその方向を3軸ひずみゲージより算出した。なお、応力の算出には弾塑性方程式を用い、以下の条件を仮定した。

- 1) 平面応力状態とする。
- 2) 弾性構成式には Hooke の法則を用いる。
- 3) von Mises の降伏条件を用いる。
- 4) 硬化則は等方硬化則を用いる。

主応力図からは幅厚比による変化は見られなかったため、図-4にはせん断破壊したものの例として T16-S1 を、曲げ破壊した供試体の例として T16-S2 を示した。ただし、図では最大主応力をベクトルで示し、その測定箇所は図-2に示したゲージ位置に対応している。なお、図は荷重が 100kN 時の結果を示した。図より、せん断破壊した T16-S1 の全ライン上の主応力の方向は、曲げモーメントが 0 の C ライン上の主応力の方向とほぼ同じなのがわかる。これによりウェブに斜張力場が発生しており、せん断変形が進んでいることがわかる。逆に曲げ破壊した T16-S2 では、主応力の方向が C ライン上と L および R ライン上とは違い、鋼管引張側になるにつれて主応力の方向が部材軸方向へと推移しているのがわかる。これにより、曲げの影響を受けた変形が進んでいると推測できる。よって鋼管ウェブの計測によってもせん断スパン比1の供試体はせん断変形が卓越していたことがわかる。

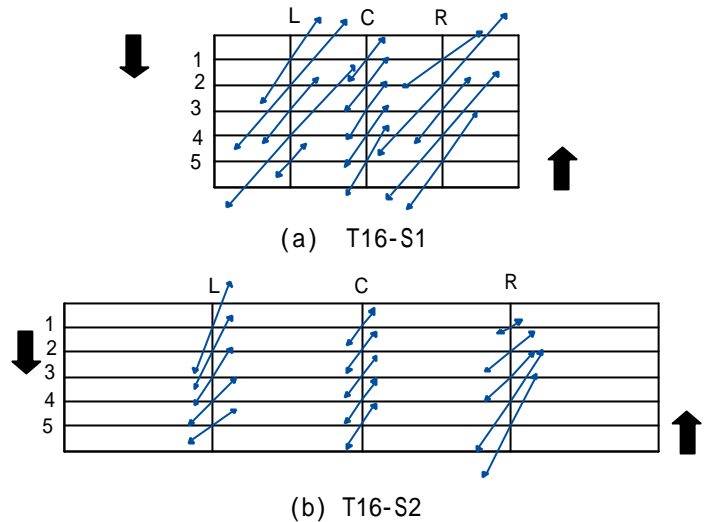


図-4 主応力とその方向

(4) 鋼管の分担せん断力

鋼管ウェブに貼り付けた3軸ひずみゲージより、前記した手法により鋼管に作用するせん断応力を求め、その応力分布を数値積分し、断面積を掛け合わせることで鋼管が負担するせん断力を算出した。

鋼管ウェブに働くせん断力を S_s とし、載荷荷重から供試体全体にかかるせん断力 S を算出し、 S_s と S の比つまり部材全体にかかるせん断力に対して鋼管が負担するせん断力の割合 $R_s(\%)$ を図-5に示す。せん断スパン比1の供試体は、図中印のところで R_s が上昇しているのがわかる。文献[1]では、充填コンクリートにひび割れが発生すると鋼管の負担率が急激に上がるとされており、本研究においては図中印以降も耐力は上昇しているが、安全側の立場から印位置を供試体のせん断破壊点と定義し、以後の考察に移る。なお図中破線で示したせん断スパン比2の供試体については、 R_s が上昇することなく終局に至っているが、これは曲げ破壊に達したためであると推測される。

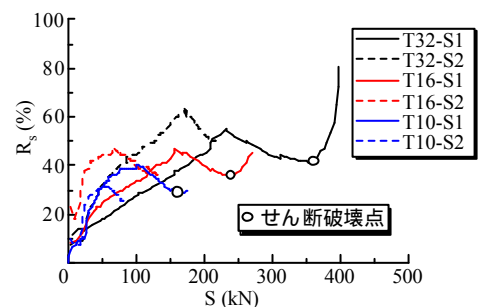


図-5 鋼管ウェブが負担するせん断力の割合

次に、部材全体が受け持つせん断力 S から鋼管ウェブに作用するせん断力 S_s を差し引いたものは、全て充填コンクリートが負担するせん断力 S_c として、各部材に働くせん断力と載荷荷重の関係を図-6および図-7に示す。幅厚比の違いによる変化はあまりなかったため、図-6および図-7には、せん断スパン比1および2の例としてそれぞれ T16-S1 と T16-S2 における C ライン上の位置におけ

る荷重と各部材に働くせん断力の関係を示した。なお、図中には鋼構造物設計指針に示されたせん断耐力値 S_{ss} (局部座屈考慮) ならびに S_{sU} (局部座屈無視), また上記で定義したせん断破壊時の荷重を P_{Shear} として示した。図より供試体 T16-S1 はせん断降伏しているのに対し供試体 T16-S2 は降伏していないのがわかる。これは、供試体 T16-S2 がウェブのせん断降伏前に曲げ破壊に達したためである。

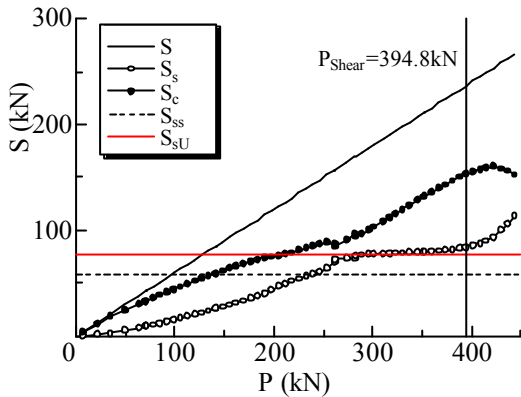


図-6 T16-S1, 荷重 せん断力関係

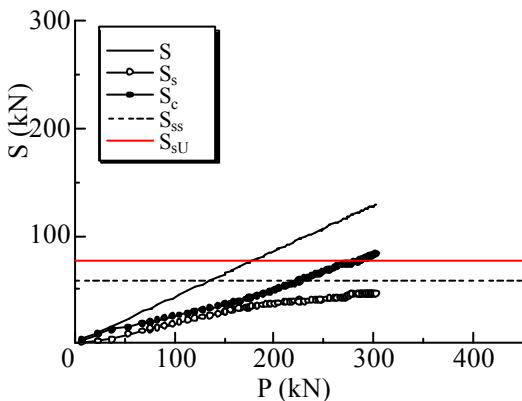


図-7 T16-S2, 荷重 せん断力関係

(5) 各部材が負担したせん断力

表-2 にはせん断破壊した供試体については、前項で定義したせん断破壊時での各部材のせん断耐力と表-1 で示された設計値との比較を、また曲げ破壊した供試体については、最大荷重でのせん断耐力比較を示した。さらに、部材の最大荷重との耐力比較も併せて示している。以下の考察において、各部材のせん断耐力比較はせん断破壊した(せん断スパン比 1 の)供試体についてのみ考察する。表-2 より、せん断破壊時の鋼管が負担する割合は幅厚比が大きくなるにつれて 40% ~ 30% と推移しており、

逆に断面の 90%以上を占める充填コンクリートがせん断耐力に及ぼす影響が大きいことがわかる。また鋼管ウェブが受け持つせん断力については、文献[3]で示された耐力比が 1.17 ~ 1.07 と近似しており、幅厚比が大きい場合にも精度良く評価されているのがわかる。次に充填コンクリートについては、ディープビームの耐力比が 1.25 ~ 1.15 と近い結果となっており、幅厚比が大きい場合にも安全側に評価されているのがわかる。

続いて部材の耐力比較について考察する。本研究では幅厚比が大きいため、耐力評価には充填コンクリートも考慮した設計を取り入れる必要があると考えている。そこで文献[3,4]で示された鋼管ウェブと充填コンクリートのせん断累加強度を試みた。表-2 よりせん断破壊した供試体については、せん断累加強度による耐力比が幅厚比に関係なく 1.3 程度とほぼ一定になっているのがわかる。また曲げ耐力に関しては、文献[2,3]で示された設計耐力との比較については、全供試体共に安全側に評価されていることから、大幅厚比の供試体においても既往の設計が適用可能であると言える。

6. まとめ

- 幅厚比の違いに関わらず、一部の供試体を除いたせん断スパン比 1 の供試体は充填コンクリートに斜めひび割れを伴うせん断破壊を、またせん断スパン比 2 の供試体は充填コンクリートに曲げひび割れおよび鋼管フランジに局部座屈を伴う曲げ破壊に至った。同時に鋼管フランジとウェブに貼り付けたひずみの計測からも上記破壊形式を裏付ける結果が得られた。
- 本研究において、規定の幅厚比以上の供試体を用いて実験を行ったが、せん断破壊した供試体に限定すれば、そのせん断耐力は鋼管ウェブと充填コンクリートとの累加強度を適用すれば耐力評価が可能であるという結果になった。

参考文献

[1]角掛, 脇坂, 園田, 小林: 大幅厚比を有するコンクリート充填鋼管部材のせん断耐力に関する基礎的研究, 土木学会, Vol.5, pp.377-384, 2002; [2]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, 2001; [3]土木学会: 鋼構造物設計指針, 1997; [4]土木学会: コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 2002

表-2 各部材の耐力比ならびに設計耐力比

| 供試体 | 幅厚比 | 破壊形式 | 実験結果 | | | | | | 鋼管のせん断耐力比 | | | | 充填コンクリートのせん断耐力比 | | 部材の耐力比 | | | | |
|--------|-----|------|---------|-------|------------------|-------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|---------------|-----------------------|--------------|---------|------|-----------|-------|-------|
| | | | せん断破壊荷重 | 最大荷重 | せん断破壊時又は最大荷重時の割合 | | | | 文献[3] | | 文献[4] | | 文献[4] | | せん断累加強度 | 曲げ強度 | 文献[3]+[4] | 文献[3] | 文献[2] |
| | | | | | 鋼管 | | 充填コンクリート | | 局部座屈考慮 | 局部座屈無視 | 標準RC | ディープビーム | 標準RC | ディープビーム | | | | | |
| | | | | | P_s | P_c | P_s/P_{ss} | P_s/P_{sU} | P_s/P_{sd} | P_s/P_{sdi} | P_c/P_{cd} | P_c/P_{cdi} | $P_U/(P_{sl}+P_{cd})$ | P_U/P_{sm} | | | | | |
| kN | kN | kN | % | kN | % | | | | | | | | | | | | | | |
| T32-S1 | 65 | せん断 | 591.0 | 661.8 | 245.5 | 41.5 | 345.5 | 58.5 | 1.22 | 1.17 | 3.61 | 3.18 | 1.65 | 1.25 | 1.36 | 1.03 | 1.17 | | |
| T32-S2 | 65 | 曲げ | - | 500.5 | 252.0 | 50.3 | 248.5 | 49.7 | 0.90 | 0.86 | 2.63 | 1.03 | 0.85 | 1.60 | 1.11 | 1.31 | 1.46 | | |
| T16-S1 | 127 | せん断 | 394.8 | 450.5 | 142.1 | 36.0 | 252.6 | 64.0 | 1.48 | 1.11 | 2.63 | 2.13 | 1.97 | 1.15 | 1.30 | 1.54 | 1.19 | | |
| T16-S2 | 127 | 曲げ | - | 302.3 | 110.0 | 36.4 | 192.2 | 63.6 | 0.82 | 0.61 | 1.44 | 0.62 | 1.07 | 1.55 | 0.99 | 1.72 | 1.32 | | |
| T10-S1 | 210 | せん断 | 281.0 | 315.0 | 81.9 | 29.1 | 199.1 | 70.9 | 1.68 | 1.07 | 1.97 | 1.48 | 2.61 | 1.24 | 1.33 | 2.08 | 1.35 | | |
| T10-S2 | 210 | 曲げ | - | 190.0 | 48.3 | 25.4 | 141.7 | 74.6 | 0.71 | 0.45 | 0.75 | 0.46 | 1.33 | 1.36 | 0.90 | 1.94 | 1.31 | | |