

論文 軽量コンクリート充填二重鋼管合成部材の曲げせん断特性に及ぼす内径・外径比の影響

上中宏二郎*1・水越睦視*1

要旨：骨材に人工軽量骨材を用いた軽量骨材コンクリートは、従来の普通コンクリートと比較して約 20%の軽量化が可能である。また、二重鋼管・コンクリート合成 (CFDST)部材とは、同心円上に異なる 2 種類の鋼管を配置してその間のみにコンクリートを充填したものであり、従来のコンクリート充填鋼管部材より軽量となる。本研究では、軽量コンクリート 2 種を CFDST 部材に用いたせん断スパン比 0.75, 1.0 の L-CFDST の曲げせん断実験を行った。得られた結果より、鋼管の内径・外径比, ならびにせん断スパン比が終局強度に与える影響について考察した。最後に、L-CFDST 部材の曲げ強度算定方法について言及した。

キーワード：軽量コンクリート, 二重鋼管合成部材, せん断スパン比, 内径・外径比, 逆対称二点載荷

1. はじめに

軽量骨材コンクリート(LC)¹⁾とは、コンクリート中の粗骨材のみ、あるいは粗骨材と細骨材を構造用軽量骨材に置き換えたものであり、前者を軽量コンクリート 1 種(LC1), 後者を軽量コンクリート 2 種(LC2)とよぶ。LC は骨材を軽量化することにより、従来の普通コンクリート(NC)と比較して 20%程度の軽量化が可能である。しかしながら、LC の引張強度やヤング係数は、NC よりも低いとされている。また、LC を用いた RC 部材のせん断強度は従来の NC の 70%に低減されている²⁾。

つぎに、二重鋼管・コンクリート合成(Concrete filled double skin tubular, CFDST, 図-1a)参照)部材とは、2 種類の鋼管を同心円上に配置し両鋼管の間のみにコンクリートを充填したものであり、中空断面となるため、従来のコンクリート充填鋼管^{3), 4)}(Concrete filled steel tubular, CFT, 図-1b)参照)部材と比較して軽量となる利点を有する。CFDST 部材の純曲げ⁵⁾, および曲げせん断⁶⁾などの実験的検討では、径厚比(D_o/t_o), ならびに内径・外径比(D_i/D_o)が大きくなると終局強度が低下する可能性を示している。また、さらなる軽量化のためには、構成する材料を軽量化する必要がある。なお、CFT 部材の系統的な研究結果は文献 3)に詳述されているものの、軽量コンクリートを充填したものは適用の範囲外となっている。

ところで、軽量コンクリートを鋼管に充填すれば、LC のせん断補強ができるとともに、圧縮領域において鋼管の座屈が防止できることが考えられる。さらに、従来の NC を用いた CFT よりも軽量化が可能であり、柱部材などに使用すれば、地震による被害を軽減できることが考えられる。軽量コンクリート充填鋼管 (L-CFT) 部材の既往の研究を概観すれば、Huanti⁷⁾の径厚比(鋼管の直径と板厚の比)=30 程度の圧縮および曲げ特性の研究に端を

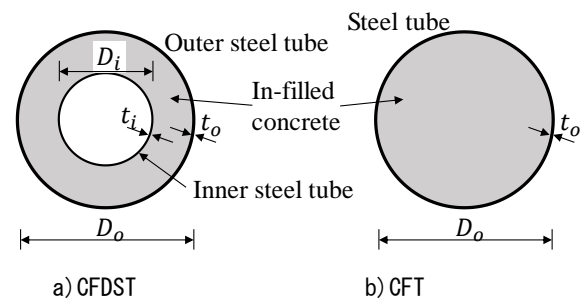


図-1 CFDST と CFT の断面

発する。しかしながら、LC を用いた鋼・コンクリート合成部材の活用にはさらなる系統的検討が必要となる。

このような背景のもと、著者ら⁸⁾は 100 程度の大きな径厚比を有する LC2 を充填した軽量コンクリート充填鋼管 (L-CFT) 部材の曲げせん断特性の実験的検討を行い、せん断スパン比を実験変数として、曲げ、またはせん断破壊を呈する場合のそれぞれの終局強度算定方法について提案した。具体的には、曲げ破壊を呈したものは、コンクリート圧縮強度と鋼管の引張強度を用いて曲げ強度を、せん断破壊を呈したものは、従来の RC のせん断強度に準じた算定手法により、それぞれ終局強度が予測できることを確認した。さらに、L-CFT 部材よりさらに軽量化が期待できる二重鋼管に軽量コンクリートを充填した二重鋼管・軽量コンクリート合成(L-CFDST)短柱に関する実験的検討⁹⁾を行い、L-CFDST 短柱の中心圧縮強度は、コンクリートの圧縮強度と鋼管の降伏強度の累加強度で推定できることを示している。

そこで、本研究では、既報の L-CFDST 部材の中心圧縮実験⁹⁾, せん断スパン比 0.5 の曲げせん断特性¹⁰⁾の検討に引き続き、2 種類のせん断スパン比を実験変数とした逆対称二点載荷方法を用いて L-CFDST 部材の曲げせん

*1 神戸市立工業高等専門学校 教授 都市工学科 博士 (工学) (正会員)

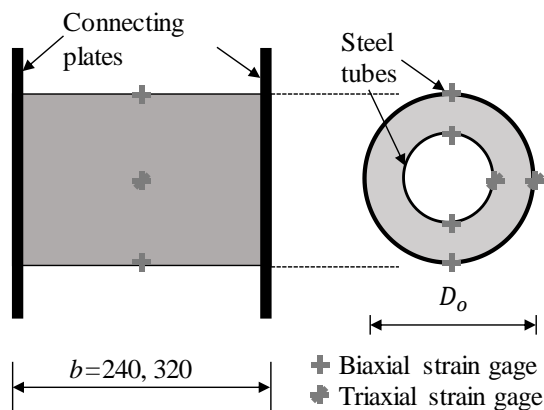


図-2 供試体の詳細とゲージ貼付位置

断特性の把握を目的とした実験的検討を合計6体行った。さらに、既報⁸⁾で行った L-CFT 部材との比較を行った。実験変数はせん断スパン比($2D_o/b$)、ならびに内径・外径比(D_i/D_o)であり、上記変数が曲げせん断特性に与える影響について実験的に検討した。最後に、L-CFDST の終局曲げ強度算定方法に関して検討した。

2. 実験方法

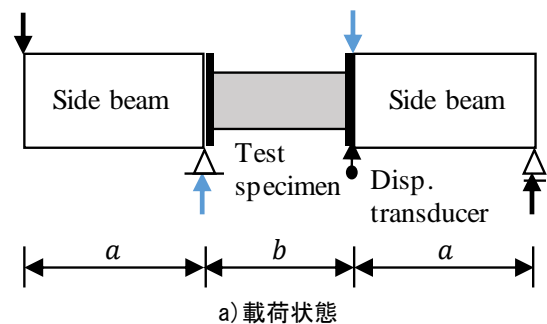
2.1 供試体の概要

表-1 に供試体一覧を示す。外鋼管の直径(D_o)は160mm、供試体長さ(b)は240mm、320mmとしている。また、内鋼管径(D_i)は、0(CFT)、38mm、75mm、ならびに113mmである。さらに、鋼管厚(t_i, t_o)は2.3mmであり、内外鋼管の鋼管厚は等しくしている。したがって、内外鋼管の直径の比(内径・外径比, D_i / D_o)の範囲は0.24~0.7、および外鋼管の径厚比(D_o/t_o)は69.6となる。さらに、比較のために既報で得られた LC2 を充填した CFT(L-CFT)部材の曲げ供試体を表-1 内 No. 1, 5 に示している。

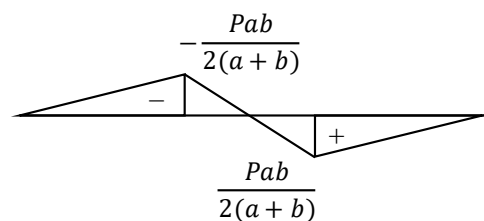
内外鋼管は、鋼板を円形状に加工後突合せ溶接にて製作した。また、外鋼管は溶接後、図-2 に示すように両端には荷重治具と高力ボルトで固定の接続板(Connecting plates)を溶接した。なお、内鋼管は端部と溶接していないため、実験結果は溶接している場合と比較して控えめの強度が得られると考えられる。

つぎに、本研究で用いた軽量骨材コンクリート2種(LC2)に用いた骨材は、膨張頁岩系の構造用骨材であり、細骨材、粗骨材の表乾密度はそれぞれ $1.92(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、ならびに $1.65(\text{g}/\text{cm}^3)$ である。LC2 を充填後、十分な養生期間を経たのち、荷重実験を実施した。圧縮強度(f_c')、およびヤング係数(E_c)はそれぞれ $45.6\text{N}/\text{mm}^2$ 、ならびに $17.2\text{kN}/\text{mm}^2$ であった。

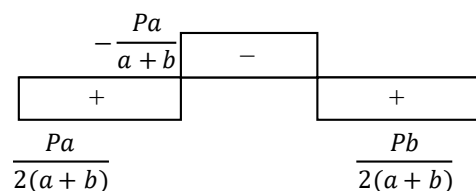
さらに、荷重方法を図-3 a) に示す。供試体両端を高力ボルトで荷重治具に固定し、荷重はりを介して曲げモ



a) 荷重状態



b) 曲げモーメント図 (B. M. D.)



c) せん断力図 (S. F. D.)

図-3 逆対称二点荷重方法

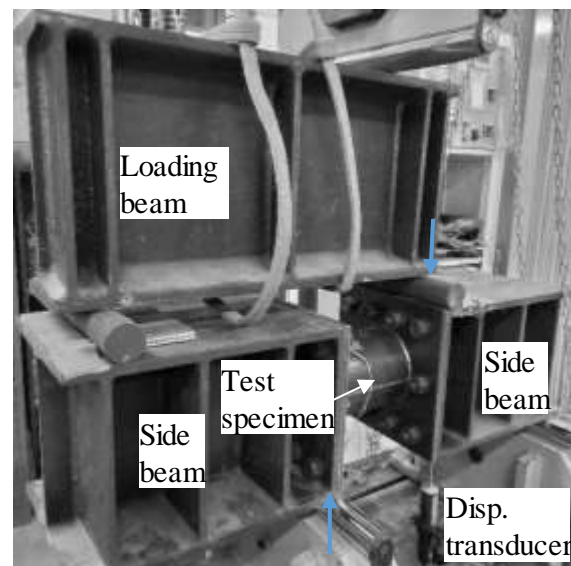


写真-1 荷重風景

ーメントは反転するものの供試体に一定のせん断力 ($V=Pa/(a+b)$) を作用させた(図-3 b), c) 参照)。この方法により、せん断スパン長は $b/2$ となるため、有効高さを外鋼管の直径(D_o)とするとせん断スパン比($d=2D_o/b$)は0.75, 1.0 となる。最後に、荷重風景を写真-1 に示す。

表-1 供試体一覧

| Tag | Steel tube | | | | | | Concrete | | |
|-------------------------|---------------|---------------|--------------------|-----------|-----------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| | D_o (mm) | D_i (mm) | t_i, t_o (mm) | D_i/D_o | D_o/t_o | b (mm) | f_y (N/mm ²) | f_u (N/mm ²) | f_c' (N/mm ²) |
| 1 L23-240 ⁸⁾ | | 0 | | 0.00 | | | 182 | 319 | 35.6 |
| 2 L23-038-240 | | 38.0 | | 0.24 | | 240 | 258 | 373 | 45.6 |
| 3 L23-075-240 | | 75.0 | | 0.47 | | | | | |
| 4 L23-113-240 | | 113.0 | 2.3 | 0.71 | 69.6 | | | | |
| 5 L23-320 ⁸⁾ | 160 | 0.0 | | 0.00 | | | 182 | 319 | 35.6 |
| 6 L23-038-320 | | 38.0 | | 0.24 | | 320 | 258 | 373 | 45.6 |
| 7 L23-075-320 | | 75.0 | | 0.47 | | | | | |
| 8 L23-113-320 | | 113.0 | | 0.71 | | | | | |

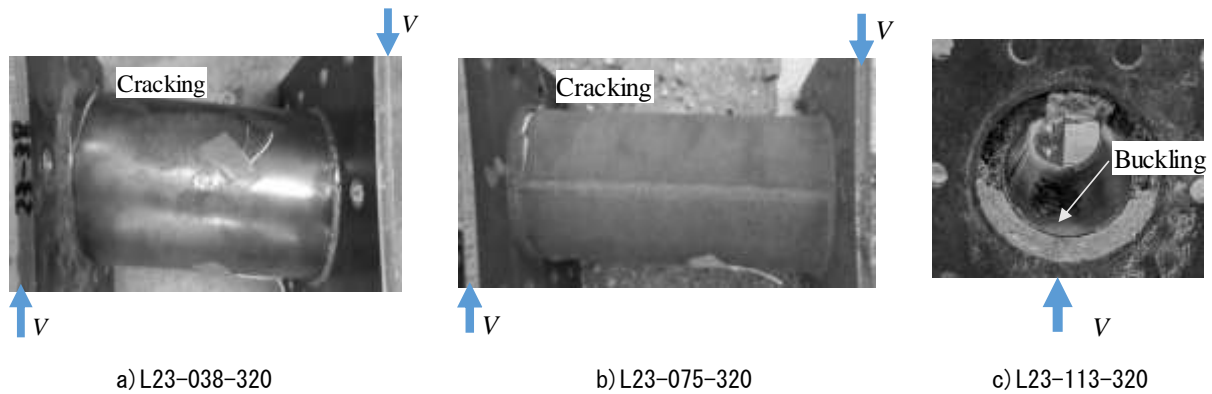


写真-2 破壊状態

2.2 測定項目

図-2にひずみゲージの貼付位置を示す。内鋼管、ならびに外鋼管外側の上下面に2枚の2軸ひずみゲージを断面中心に1枚の3軸ひずみゲージをそれぞれ貼付した。また、図-3a)に示すように、載荷点直下の変位計により、変形性能を測定した。

3.実験結果と考察

3.1 破壊形式

写真-2 a), b)に載荷終了後の破壊状態を示す。これらより、せん断力 V が作用した反対側の外鋼管の曲げ引張側破断していることがわかる。これは、せん断スパン比に関係なくすべての供試体において見られるものであった。なお、この結果は、既報の L-CFT 部材の結果⁸⁾と同じものであった。

つぎに、写真-2 c)に内鋼管の破壊状況を示す。せん断力 (V) が作用する圧縮側には内鋼管の内側への座屈を確認することができた。一方、作用せん断力の支点の反対側、すなわち曲げ引張側では充填コンクリートのひび割れが確認できた。

3.2 曲げ強度

(1)概要

3.1 破壊形式で述べたように、既報⁸⁾のせん断スパン比 0.5 の結果とは異なり、すべての供試体の外鋼管のひ

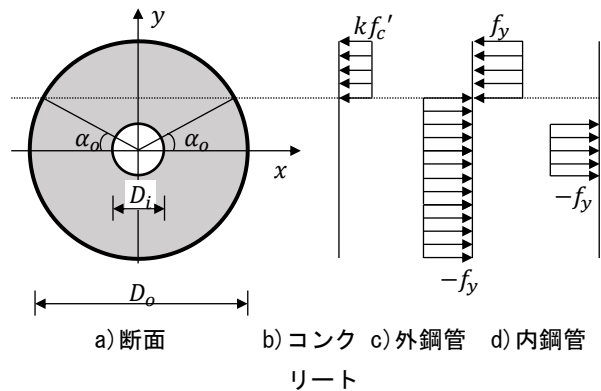


図-4 仮定した応力分布(中立軸が内鋼管外にある場合)

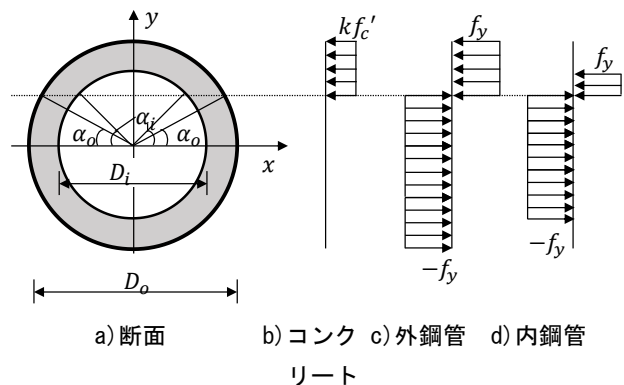


図-5 仮定した応力分布(中立軸が内鋼管内にある場合)

ずみゲージから鋼管の降伏が確認された後、鋼材の引張破断により終局状態となった。したがって、既報⁵⁾で提案した普通コンクリートを充填した CFDST の純曲げ算定強度算定方法を参考に本実験結果の算定を試みる。

まず、図-4 a)に示すように、中立軸が圧縮領域の内鋼管の上方にあり、図-4 b)-d)のとおりコンクリートの圧縮強度、外鋼管、および内鋼管が降伏していると仮定すると終局曲げモーメント(M_u)および軸力(N_u)は以下の通りとなる。

$$M_u = \frac{kf'_c}{12} D_o^3 \cos^3 \alpha_o + f_y D_o^2 t \cos \alpha_o \quad (1)$$

$$N_u = \frac{kf'_c}{8} D_o^2 (\pi - 2\alpha_o - \sin 2\alpha_o) - 2f_y D_o t_o \alpha_o - f_y D_i t_i \pi \quad (2)$$

ここで、 D_i 、 D_o は内外鋼管の直径、 t_i 、 t_o は内外鋼管の管厚、 α_o は鋼管の中心から圧縮領域底辺までの角度、 $k=0.85$ をそれぞれ示す。

つぎに、図-5 a)に示すように、中立軸が内鋼管の内部にあり、充填コンクリート、内外鋼管の応力状態がそれぞれ図-5 b)-d)のとおりと仮定すると、終局曲げモーメント(M_u)ならびに軸力(N_u)は以下の通りとなる。

$$M_u = \frac{kf'_c}{12} (D_o^3 \cos^3 \alpha_o - D_i^3 \cos^3 \alpha_i) + f_y (D_o^2 t_o \cos \alpha_o + D_i^2 t_i \cos \alpha_i) \quad (3)$$

$$N_u = \frac{kf'_c}{8} \{D_o^2 (\pi - 2\alpha_o - \sin 2\alpha_o) - D_i^2 (\pi - 2\alpha_i - \sin 2\alpha_i)\} - 2f_y (D_o t_o \alpha_o + D_i t_i \alpha_i) \quad (4)$$

ここで、 α_i は内鋼管の圧縮領域底部と中心までの角度であり、外鋼管の圧縮領域までの角度 α_o を用いて以下の通りとなる。

$$\alpha_i = \sin^{-1} \left(\frac{D_o}{D_i} \sin \alpha_o \right) \quad (5)$$

表-2に実験結果一覧を示している。 P_{exp} は実験で得られた最大荷重、 M_{exp} は最大曲げモーメント ($=P_{exp} \times ab/(2(a+b))$)を示す。なお、算定曲げ強度(M_{est} 、 M_{est-u})は、以下の手法により求めている。

まず、中立軸が内鋼管の上方にある場合、式(2)から $N_u=0$ となる点となる α_o を求めた後、式(1)に代入し曲げ

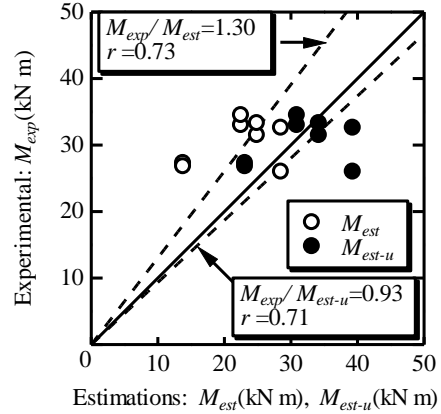


図-6 算定強度と実験曲げ強度

強度 $M_u(=M_{est})$ を求め、中立軸が内鋼管内部にある場合は式(4)により $N_u=0$ を求め、 α_o 、 α_i を式(4)に代入することにより算定曲げ強度 $M_u(=M_{est})$ を求めた。一方、鋼管が破断していることを考慮して、降伏強度 f_y の代わりに鋼材の引張強度 f_u を代入して式(1)~(4)より求めた引張強度に基づく算定強度 M_{est-u} も表-2にまとめている。なお、中立軸が内鋼管外として式(1)より曲げ強度が計算された供試体は $D_i=38\text{mm}$ 、それが内鋼管内として式(3)より計算されたものは $D_i=75$ 、および 113mm であった。

(2)曲げ強度

図-6に算定曲げ強度と実験曲げ強度の関係を示す。ここで、○は鋼材の降伏強度に基づく算定曲げ強度(M_{est})、●はその最大強度に基づく算定曲げ強度(M_{est-u})をそれぞれ示している。

同図より、両算定曲げ強度とも相関係数が0.7程度でばらつきは少なく評価できることを確認した。一方、降伏強度に基づく算定曲げ強度(M_{est})よりも引張強度に基づく算定強度(M_{est-u})の方が相対比 $M_{exp}/M_{est-u}=0.93$ となり最大曲げモーメント(M_{exp})に近い値を示していた。これは既報⁸⁾のL-CFTの曲げせん断実験の結果と同じものであった。なお、実験曲げ強度(M_{exp})は D_i/D_o が大きくなってL-CFTと同等あるいはそれ以上の結果を示していたため、内鋼管が引張力に抵抗していたと示唆される。

(3)実験曲げ強度比と内径・外径比

図-7 a)、b)に最大曲げモーメント(M_{exp})を式(1)、または(3)より求めた降伏強度に基づいた算定強度(M_{est})、ならびに引張強度に基づいた算定強度(M_{est-u})で除した値と内径・外径比(D_i/D_o)の関係を示す。ここで、図中の○ならびに●はせん断スパン比0.75、ならびに1.0をそれぞれ示す。

図-6においては、おおむね両算定曲げ強度は最大曲げモーメントをばらつきが少なく評価できることを示唆していたものの、図-7からは D_i/D_o が大きくなるにしたがってせん断スパン比に関係なく M_{exp}/M_{est} 、および

表-2 実験結果一覧

| No. | Tag | Experimental | | Estimation | | Ratio | |
|-----|-----------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|
| | | P_{exp} (kN) | M_{exp} (kN m) | M_{est} (kN m) | M_{est-u} (kN m) | M_{exp}/M_{est} | M_{exp}/M_{est-u} |
| 1 | L23-240 ⁸⁾ | 379.1 | 27.3 | 13.8 | 23.1 | 1.98 | 1.18 |
| 2 | L23-038-240 | 458.1 | 33.0 | 22.5 | 30.9 | 1.47 | 1.07 |
| 3 | L23-075-240 | 438.1 | 31.5 | 24.9 | 34.2 | 1.27 | 0.92 |
| 4 | L23-113-240 | 360.7 | 26.0 | 28.5 | 39.3 | 0.91 | 0.66 |
| 5 | L23-320 ⁸⁾ | 330.0 | 26.8 | 13.8 | 23.1 | 1.94 | 1.16 |
| 6 | L23-038-320 | 424.9 | 34.5 | 22.5 | 30.9 | 1.53 | 1.12 |
| 7 | L23-075-320 | 409.7 | 33.3 | 24.9 | 34.2 | 1.34 | 0.97 |
| 8 | L23-113-320 | 400.8 | 32.6 | 28.5 | 39.3 | 1.14 | 0.83 |

M_{exp}/M_{est-u} 両者とも低下する強い傾向 (相関係数 $r=0.97$ および 0.94) がわかった。これは、N-CFDST 部材同様に拘束効果の低下による終局強度の低下が考えられる。この両者の関係から、 D_i/D_o と両者の曲げ強度比の関係は以下の通りにあらわされる。

$$\frac{M_{exp}}{M_{est}} = 1.90 - 1.28 \frac{D_i}{D_o} \quad (6)$$

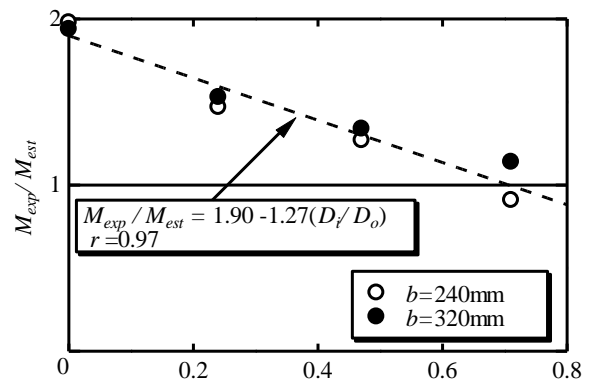
$$\frac{M_{exp}}{M_{est-u}} = 1.20 - 0.60 \frac{D_i}{D_o} \quad (7)$$

なお、この傾向は既報^{5),6)}で見られた N-CFDST 部材の結果とおおむね一致するものであった。最後に、既報⁸⁾のせん断スパン比が 0.5 のものでは、充填コンクリートのせん断破壊形式で終局状態に至ったが、 D_i/D_o が大きくなるとせん断強度比も低下する傾向があったことも付記する。

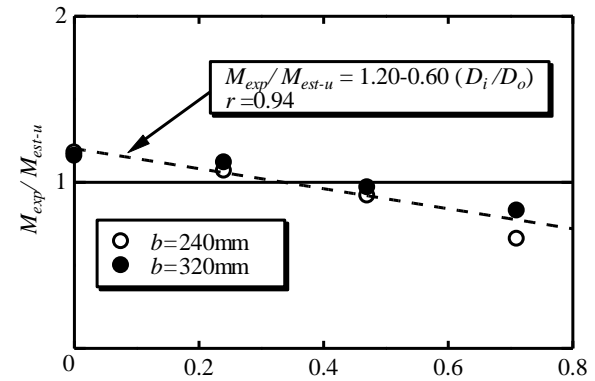
3.3 作用曲げモーメントと変位

図-8 に作用曲げモーメント(M)と載荷点直下の変位(図-3a)参照)を部材角で除した値(部材角)の関係を示す。ここで、図-8a)は $b=240\text{mm}$, b)は $b=320\text{mm}$ の変形特性をそれぞれ示しており、両図の横軸は部材長(b)で除している。

図-8a)では、内径(D_i)が 75mm までであれば、変形性能、すなわち変形が進行しても作用曲げモーメントが低下しないが、 $D_i=113\text{mm}$ では低下していることがわかる。一方、図-8b)においては、内径の影響を受けることなく変形性能の差異は見られなかった。さらに、既報⁸⁾の同じせん断スパン比の同等な曲げ引張破壊に至った同じ径厚比の L-CFT 供試体では、 $b=240\text{mm}$ および 320mm の供試体は、それぞれ $\delta/b=0.04$, および 0.02 以内で破壊に至っていた。このことから、内鋼管が変形性能の向上に寄与していたことを示唆していた。



Inner-to-outer diameter ratios: D_i/D_o
a) 降伏強度に基づく算定強度比



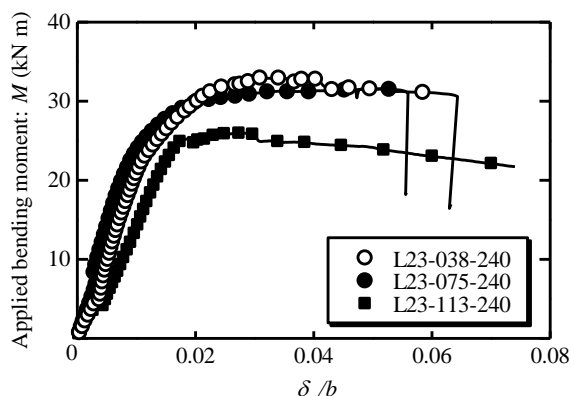
Inner-to-outer diameter ratios: D_i/D_o
b) 最大強度に基づく算定強度比

図-7 曲げ強度比と内径・外径比

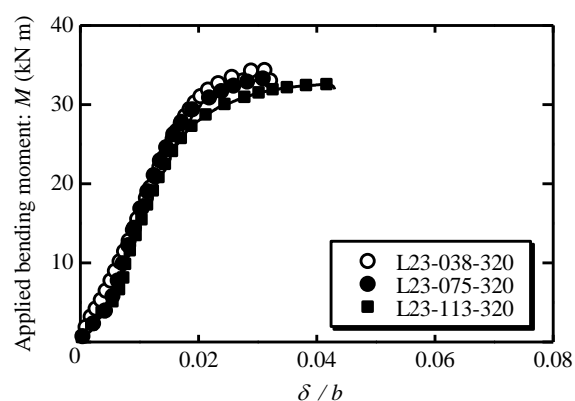
4. まとめ

本研究は、軽量コンクリート 2 種(LC2)充填二重鋼管合成(L-CFDST)部材の曲げせん断特性に関して、せん断スパン比、内径・外径比を実験変数とし、逆対称 2 点載荷方法による曲げせん断実験を行った。結論付けられる事項を列記すると以下のとおりである。

- (1) 得られた破壊形式は、せん断スパン比 1.5, 2.0 に関係なく外鋼管引張側の引張破壊であった。この破壊



a) $b=240\text{mm}$



b) $b=320\text{mm}$

図-8 変形性能

形式は、同じせん断スパン比を有する既報の L-CFT の結果と同じであった。また、内鋼管は内側に座屈していた。

- (2) 内外鋼管の応力状態を全塑性状態に仮定し、充填コンクリートの応力状態を圧縮領域のみに考慮し曲げ強度算定を行ったところ、鋼管の降伏強度に基づいた算定曲げ強度は、相関係数 $r=0.7$ 程度で評価するものの、相対比が 1.30 となり、実験曲げ強度を安全側に評価した。一方、鋼管の最大強度に基づいた算定曲げ強度では、相対比が 0.93 となった。
- (3) 上記で求めた実験曲げ強度と算定曲げ強度の比と内径・外径比の関係より、内径・外径比が大きくなるにしたがって、曲げ強度比は低下する強い相関がみられた。
- (4) 上記(3)の関係より実験曲げ強度比と内径・外径比の関係の計算式を提案した。
- (5) 得られた作用曲げモーメントと曲げ引張側の支点の変形の関係から、 $b=240\text{mm}$ では、 $D_i < 75\text{mm}$ であれば同等の変形性能が得られていた。また、 $b=320\text{mm}$ では D_i が 113mm になっても変形性能の低

下が見られなかった。

謝辞

載荷実験の実施に当たっては、神戸市立工業高等専門学校都市工学科 5 年生、ならびに都市工学専攻科に在籍された学生諸君にご協力いただきました。なお、本研究の一部は JSPS 科研費(課題番号: 18K04338)の助成を受けました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 笠井芳夫編: 軽量コンクリート, 技術書院, pp. 71-87, 2002.
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 丸善, p. 191, 2017.
- 3) 日本建築学会: コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, 丸善, 2008.
- 4) 日本建築学会: 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説-許容応力度設計と保有水平耐力-, 丸善, 2014.
- 5) Uenaka, K., Kitoh, H. and Sonoda, K.: Concrete Filled Double Skin Tubular Members subjected to Bending, *Steel and Composite Structures -An International Journal*, Techno-Press, Vol. 8, No. 4, pp. 297-312, 2008.
- 6) Uenaka, K.: Concrete Filled Double Skin Circular Tubular Beams with Large Diameter-to-thickness Ratio under Shear, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol. 70, pp. 33-38, 2013.
- 7) Hunaiti, Y. M.: Strength of composite sections with foamed and lightweight aggregate concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 9, No. 2, pp. 58-61, 1997.
- 8) Uenaka, K. and Mizukoshi, M.: Lightweight concrete filled steel tubular beam under bending-shear, *Structures - Research Journal of The Institution of Structural Engineers*, Elsevier, Vol. 30, pp. 659-666, 2021.
- 9) 上中宏二郎, 水越睦視: 二重鋼管・軽量コンクリート合成短柱の圧縮特性, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学会, Vol. 42, No. 2, pp. 931-936, 2020.
- 10) 上中宏二郎, 水越睦視: 軽量骨材コンクリートを充填した中空式二重鋼管合成部材のせん断特性, コンクリート工学年次論文集, 日本コンクリート工学会, Vol. 45, No. 2, pp. 715-720, 2023.