

論文 大幅厚比角形コンクリート充填鋼管部材の力学性状に関する研究

小林 靖典^{*1}・角掛 久雄^{*2}・大内 一^{*3}

要旨: 本研究では, コンクリートを鋼板で巻いた合成部材に関して, 既存以下の薄肉鋼板(大幅厚比)を用いた時の CFT や鋼板巻き立て補強への適用を考え, その力学性状を検討するため, 角形コンクリート充填鋼管部材の幅厚比およびせん断スパン比に着目して, 逆対称 4 点曲げ載荷実験および 3 次元非線形有限要素解析を行った。そして, 幅厚比の大小に関わらず, せん断スパン比の違いによって力学性状が異なることを示した。

キーワード: コンクリート充填鋼管, 幅厚比, せん断スパン比

1. はじめに

コンクリート充填鋼管(CFT)構造は耐荷力・靱性に優れており, 土木・建築構造物に広く用いられてきた。それに伴い研究も活発に行われているが, 幅厚比および径厚比が小さなものを対象とした研究が多い。しかし, 土木構造物は建築構造物に比べて相対的に軸力比が小さくなり, 断面寸法が大きくなることを考えれば, 幅厚比や径厚比がより大きな 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られている。そのため, 著者らは薄肉鋼管にコンクリートを充填し, 建築基準における幅厚比の制限値より大きなものを対象として実験を行った^{1),2)}。さらに, 既設の RC 橋脚に鋼板を巻き立てて補強する場合にも, 既存以下の薄肉鋼板を用いることで基礎への影響や桁下空間の減少を抑えることができ, 有用な補強方法であることは自明である³⁾。ただ, 文献 1)では制限幅厚比⁴⁾(72:SS400 相当)を大きく越える 200 以上の幅厚比の角形 CFT 部材に対してのみ実験を行っており, 制限幅厚比以下の幅厚比の供試体との耐荷力特性および変形性状に関する比較検討がなされていない。そこで, 本研究では制限幅厚比前後の幅厚比と破壊性状の違いに着目したせん断スパン比に対して曲げモーメントとせん断力

が同時に作用するように逆対称 4 点曲げ載荷実験を行い, さらに実験結果に対して, 3 次元非線形有限要素解析を行って, 力学性状を検討した。

2. 実験概要

本実験に用いた供試体は, 断面 $200 \times 200\text{mm}$, 長さ 400 or 800mm の角形 CFT 部材である。鋼管内部にはリブなど一切配置しない基本形状とした。また, 鋼管端部を増厚し, 左右加圧板は溶接により供試体と一体化させた。載荷方式は逆対称 4 点曲げ載荷であり, 載荷治具をボルト接

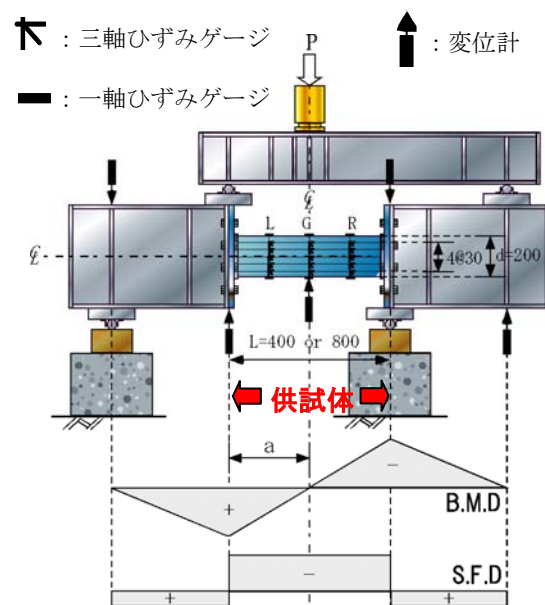


図-1 実験概要図

*1 西日本旅客鉄道(株) 修(工) (正会員)

*2 大阪市立大学大学院 助手 工学研究科都市系専攻 修(工) (正会員)

*3 大阪市立大学大学院 教授 工学研究科都市系専攻 工博 (正会員)

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		耐力値		実験値
	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	ひずみ硬化係数	圧縮強度	弾性係数	曲げ	せん断	最大荷重
	t_0	t_s	B	B/t_s	L	a/d	σ_{sy}	σ_{sB}	E_s	E_s'	σ_c	E_c	P_m	P_s	P_{max}
	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)		(MPa)	(MPa)	(GPa)	(GPa)	(MPa)	(GPa)	(kN)	(kN)	(kN)
T32-S1	3.2	3.10		65	400	1	181.6	307.4	195.1	1.82	25.8	25.4	440.3	485.2	661.8
T32-S2	3.2	3.10		65	800	2	181.6	307.4	195.1	1.82	26.4	25.3	264.5	448.9	500.5
T16-S1	1.6	1.57	200	127	400	1	215.9	335.3	199.5	2.43	25.4	25.4	277.9	347.5	450.5
T16-S2	1.6	1.57		127	800	2	215.9	335.3	199.5	2.43	26.2	25.4	167.0	304.1	302.3
T10-S1	1.0	0.95		210	400	1	209.8	320.7	195.1	2.22	18.9	22.6	167.0	236.7	315.0
T10-S2	1.0	0.95		210	800	2	209.8	320.7	195.1	2.22	25.7	25.4	101.4	211.3	190.0

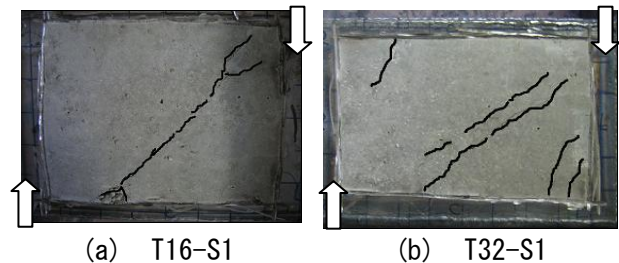
合した供試体は図－1 のようにせん断力が一定となるように設置する。載荷方法は一方向単純漸増載荷とし、供試体の最大荷重値を得るまで載荷を行った。計測箇所は図に示すように供試体全体の変形状況を検討するため、供試体支持点および載荷点に変位計を設置した。また、ひずみの計測のために鋼管フランジには一軸ひずみゲージを、鋼管ウェブには三軸ひずみゲージを、供試体中央、中央から左右へ $L/4$ ($L: 400$ or 800mm) 離れた計 3 本のライン上に設置した。実験変数は幅厚比およびせん断スパン比とし、破壊性状に着目し、曲げ破壊型となるせん断スパン比 2 とせん断破壊が生じる可能性のあるせん断スパン比 1 の 2 種類のせん断スパン比 (a/d) についてそれぞれ制限幅厚比以下の 62.5 ($t=3.2$) と制限幅厚比以上の 125 ($t=1.6$) および 200 ($t=1.0$) の 3 種類の幅厚比に関して実験を行った。ここで、供試体概要ならびに設計耐力を表－1 に示す。供試体名については、T のあとに公称板厚の略称を、S のあとにせん断スパン比を示している。なお、表中の曲げ耐力 P_m は SRC 規準⁴⁾によって算出した。せん断耐力 P_s は、鋼部分は鋼構造物設計指針⁵⁾に基づき、コンクリート部はコンクリート標準示方書のディープビーム式⁶⁾に基づき累加強度として算定した。その際、コンクリート部は鋼管フランジ部のみを圧縮、引張鉄筋に置換した RC として算定している。

3. 実験結果

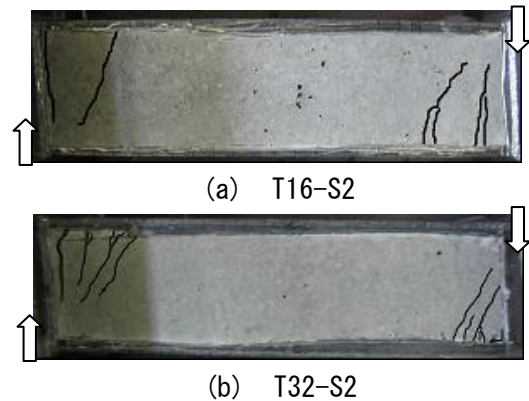
3.1 破壊性状

実験後の充填コンクリートのひび割れ状況を

写真－1, 2 に示す。せん断スパン比 1 の供試体では、幅厚比の違いによらず充填コンクリート中央付近に斜めひび割れが発生した。ただし、T32-S1 においては供試体両端付近の引張側に曲げせん断ひび割れが生じた。なお、ウェブ、フランジともに座屈は一切生じなかった。せん断スパン比 2 の供試体では、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の引張側端部付近に曲げひび割れが生じた。幅厚比が小さくなるほどひび割れ本数が増える傾向が見られたが、局部座屈については、幅厚比による明確な違いは確認できなかった。せん断スパン比 1 と 2 においてともにひび割れ本数



写真－1 充填コンクリートのひび割れ状況
(せん断スパン比 1)



写真－2 充填コンクリートのひび割れ状況
(せん断スパン比 2)

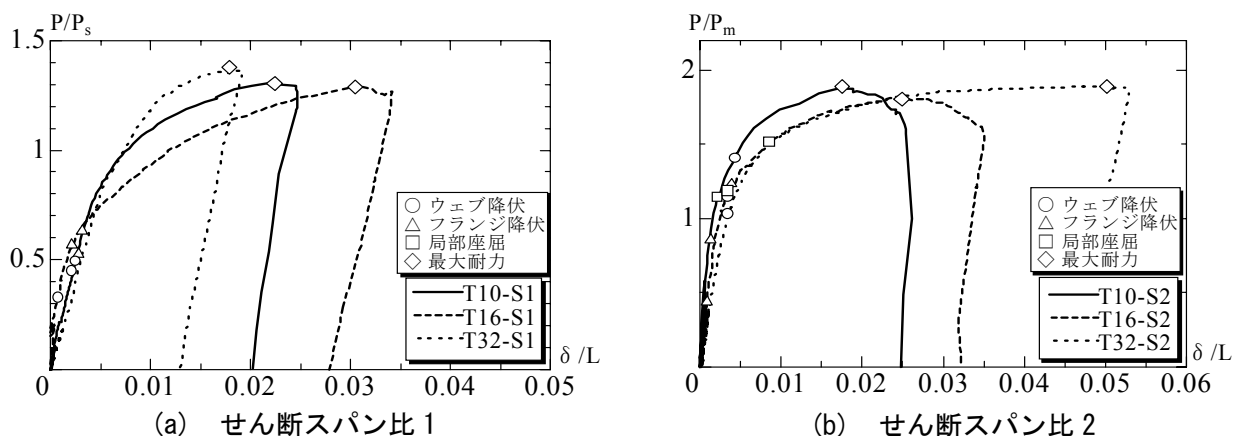


図-2 無次元化荷重と回転角

は、幅厚比の小さい方が増加する傾向が見られたが、幅厚比によらず、それぞれせん断破壊型および曲げ破壊型の性状を示す結果となった。

3.2 荷重—変位

実験時荷重を算定耐力（破壊性状を考慮し、せん断スパン比 1 の場合はせん断耐力, 2 の場合は曲げ耐力）により無次元化した荷重値と供試体変位 δ を部材長 L で除した部材回転角の関係を図-2 に示す。図中の○印はウェブ降伏を、△印はフランジ降伏を表している。なお、それぞれの降伏は計測ひずみより算出している。さらに、フランジに局部座屈が発生した点に□印を、最大荷重点に◇印を付した。

せん断スパン比 1 の供試体では、すべての供試体において、耐力比 0.5 以下でウェブが降伏し、約 0.5～0.65 でフランジが降伏した。鋼管部においてもせん断の影響が大きいことが分かる。なお、T16-S1 はウェブの降伏が他より早いこともあり、耐力比 0.7 程度で部材としての降伏が生じる結果となり、最大耐力発生時の回転角も最も大きな値となった。ただし、最大荷重は耐力比 1.3～1.4 と近似しているが、最大荷重発生時の回転角には幅厚比とは相関性のないばらつきが見られた。せん断スパン比 2 においては、T16-S2 を除いて、まずフランジが降伏し、その後ウェブが降伏した。局部座屈の発生順序はばらつきがあり幅厚比による相関性は見られなかったが、T32-S2 を除くと耐力比 1.1 程度であった。初期勾配は幅厚比が小さくなるほど小さな勾配とな

っている。最大荷重時の耐力比は幅厚比の違いによる大きな差異は見られず、1.8～1.9 程度であった。せん断スパン比 1 ではせん断の影響を受けウェブから、2 では曲げの影響を受けフランジから降伏していく結果となった。

4. 解析概要

本解析では、有限要素法非線形解析ソフト FINAL を用い解析を行った。逆対称性を考慮して、図-3 に示すような供試体と治具を含む 2 分

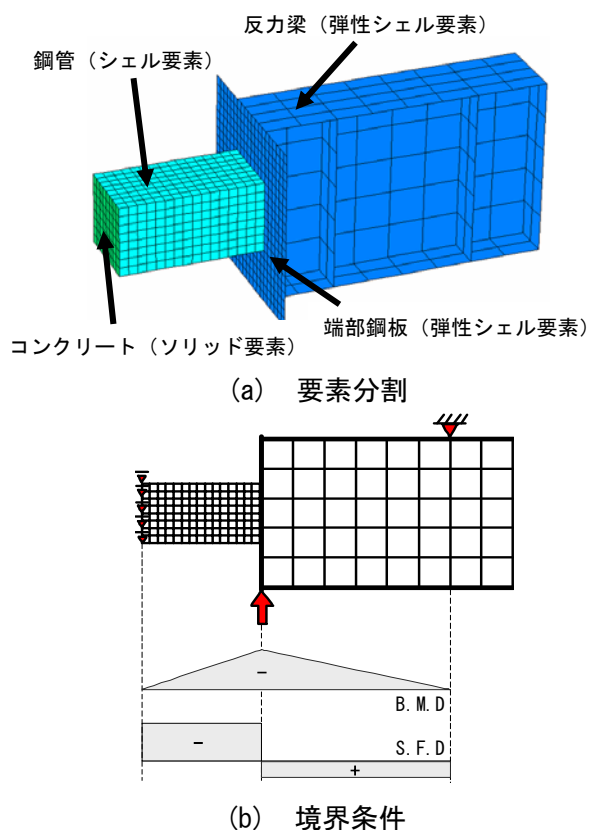


図-3 解析モデル

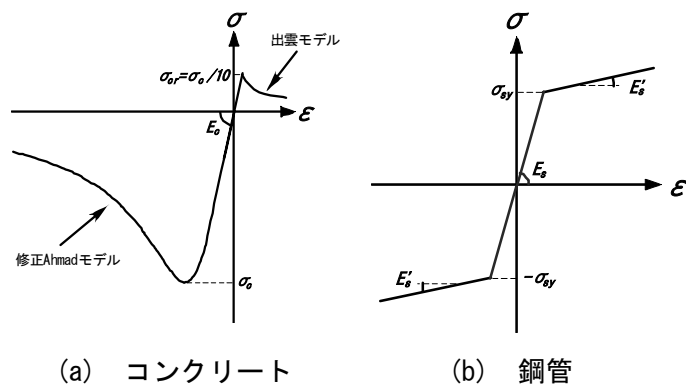


図-4 応力-ひずみ関係

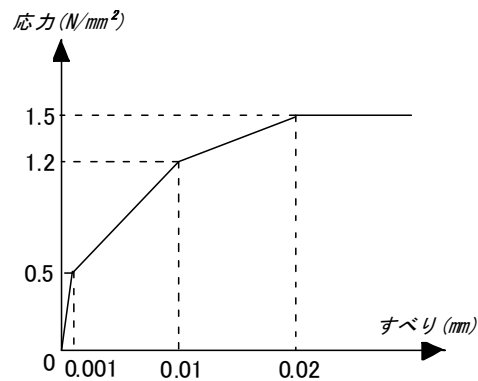


図-5 付着応力-すべり関係

の 1 モデルを対象とした。供試体中央断面をローラー支持，実験載荷点をヒンジ支持し，実験支持点から荷重を載荷することで同様のせん断力と曲げモーメント分布を得るよう境界条件を設定している。治具を含めたモデル化は，端部鋼板を含めた治具弾性変形の影響を考慮するためである。なお，今回の解析では，鋼管の座屈は考慮していない。

4.1 コンクリート

8 節点ソリッド要素でモデル化した。等価 1 軸ひずみに基づく直交異方性モデルを用いる。応力-ひずみ関係については，図-4(a)に示すように圧縮側の上昇域および最大強度後の下り勾配のモデル化には修正 Ahmad モデル⁷⁾を，引張側のひび割れ発生後は出雲モデル⁷⁾を適用した。なお，ひび割れは回転ひび割れモデルを用いた。

4.2 鋼管

4 節点平面シェル要素でモデル化した。図-4(b)に示すように 1 軸応力-ひずみ関係をバイリニアでモデル化する。2 軸応力での構成関係は von Mises の降伏条件式を降伏関数とする関連流動則によっている。

なお材料特性については，コンクリート，鋼管ともに表-1 の材料試験の結果を用いた。

4.3 鋼管とコンクリート間のモデル化

鋼管ウェブ，フランジとコンクリートの間には付着すべりのみを考慮した接合要素を用いる。その際の付着応力-すべり関係は文献 8)を参考に図-5 のように設定した。なお，試験体端部コンクリートと端部鋼板間については開閉の実現

象を表現するため，曲げ引張応力の作用する部分は別々の節点で，曲げ圧縮応力の作用する部分は節点を結合させている。

5. 解析結果

5.1 荷重-変位

図-6 に実験および解析によって得られた荷重-変位関係を示す。せん断スパン比 1 の供試体において，初期剛性は実験値よりも解析値の

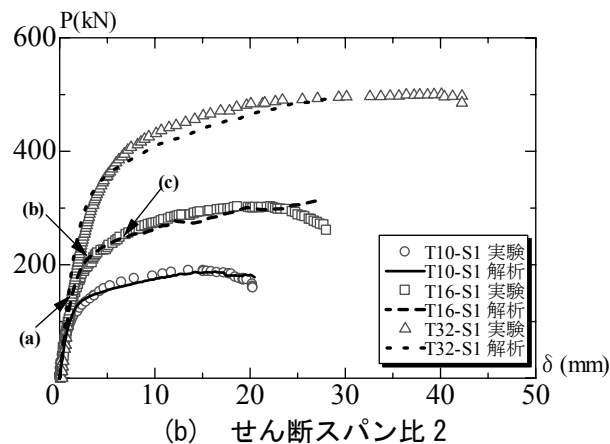
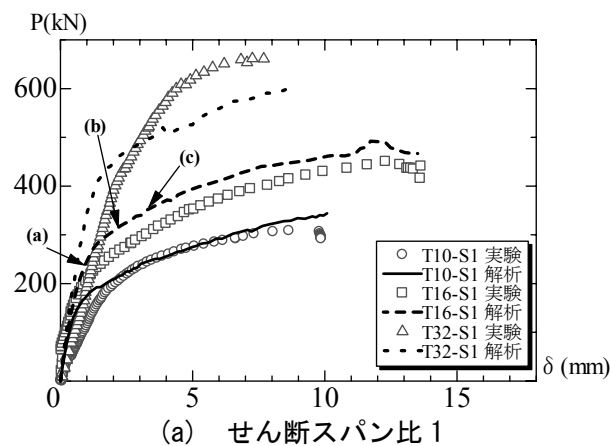


図-6 荷重-変位関係

ほうが高くなるが、左右計測変位の対称性にずれが大きかった T32-S1 を除き、降伏後の耐力はほぼ一致する結果となった。せん断スパン比 2 の供試体ではすべての幅厚比において解析値が実験値と良好に一致した。

5.2 荷重—フランジひずみ

図-7 は T16 における鋼管フランジ引張側での実験および解析により得られた荷重—ひずみ関係である。せん断スパン比 1, 2 とともに解析値が実験値と良好に対応していることが分かった。今回は T16 の場合についてのみ掲載しているが 6 体すべての供試体で実験値と解析値とが同様な結果となった。

以上より、仮定した解析モデルが実験結果を全般に再現できていることから、解析の妥当性を確認できたといえる。そこで、T16-S1 および T16-S2 をとりあげ以後の考察を行う。

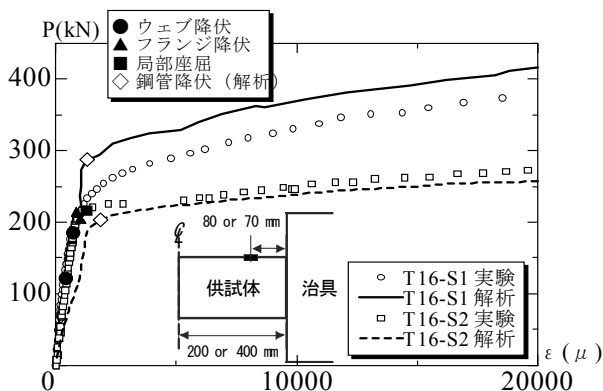


図-7 荷重—フランジひずみ関係

5.3 ウェブの降伏領域の進展

鋼管ウェブの Mises 応力のコンターを図-8, 9 に示す。なお、Mises 応力の σ_{eq} は式 (1) で定義する。

$$\sigma_{eq}^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2 \quad (1)$$

図左側は供試体中央面になっている。また、図中の丸印は 3 軸ひずみゲージで計測したひずみ値を用い、関連流動則を適用して算定した Mises 応力であり、中抜きは弾性を、中塗りは降伏したことを表わしている。なお、それぞれの図の(a)～(c)は図-6 の矢印で示している解析荷重段階

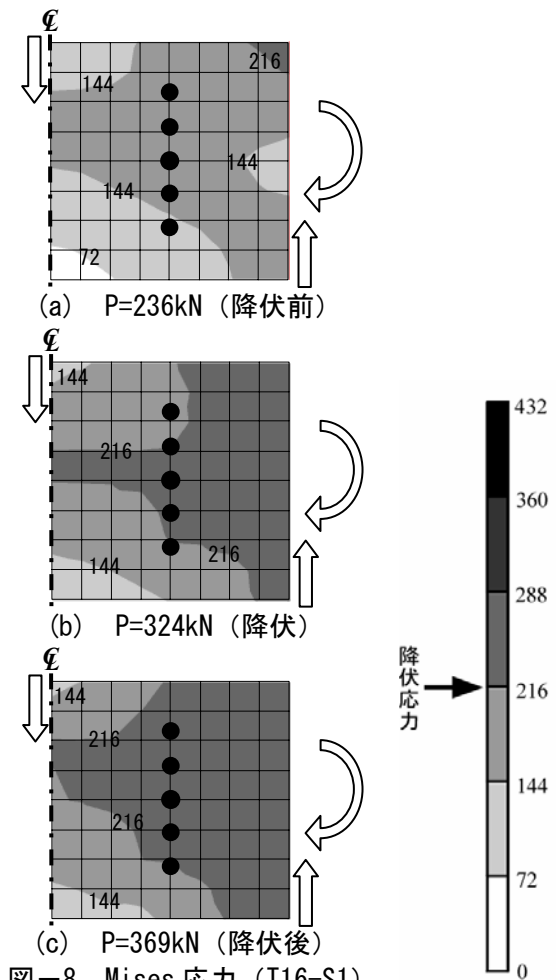


図-8 Mises 応力 (T16-S1)

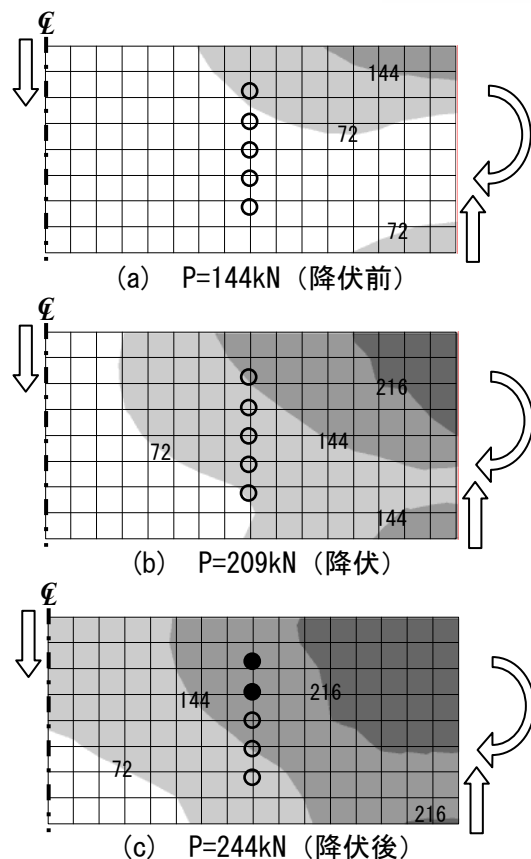


図-9 Mises 応力 (T16-S2)

を指す。

T16-S1 では供試体中央から固定端部隅部に向かって斜め方向に Mises 応力の大きくなることが確認でき、 $P=324\text{kN}$ で塑性域が広がっていく様子が分かる。特に固定端曲げ引張側においては曲げ応力の影響も大きく受けている。T16-S2 では曲げ応力と対応した Mises 応力分布が確認でき、 $P=209\text{kN}$ で端部引張側のみ塑性域が広がっていった。

5.4 最大主応力

図-8(c), 9(c)と同じ荷重段階における最大主応力ベクトルを図-10に示す。

T16-S1 では、中央付近では主応力の大きさが等しく、方向がほぼ一定の傾きであり、斜張力場が発生し、せん断の影響が顕著であるのが分かる。しかし、固定端側では傾きが変化し、曲げ引張の影響を受けていることが分かる。T16-S2 においては、固定端側では、曲げの影響により主応力の角度が小さくなり曲げ応力が大きくなっているのが分かる。中央付近では応力の大きさは小さく、曲げの影響が顕著な応力の流れを示している。

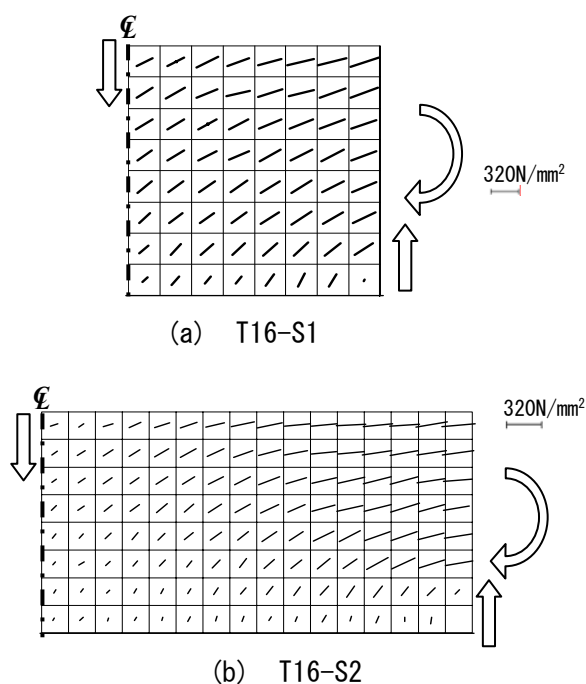


図-10 最大主応力の流れ

6. まとめ

以下に本研究で得られた結果を示す。

- 1) 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示し、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圧縮フランジに局部座屈を伴う曲げ破壊を示した。さらに、幅厚比が小さくなるほどひび割れが多く生じる傾向が見られた。
- 2) せん断破壊型の実験耐力は累加強度式の 1.3～1.4 倍となった。一方、曲げ破壊型の実験耐力は累加強度式の 1.8～1.9 倍となった。
- 3) 左右計測変位の対称性にずれの大きかった T32-S1 を除き、解析は実験結果を再現することができた。

参考文献

- 1) 角掛久雄ほか: 大幅厚比を有する角形コンクリート充填鋼管部材のせん断耐荷力に関する基礎的研究, 応用力学論文集, Vol. 5, pp. 377-384, 2002
- 2) 鬼頭宏明ほか: 大径厚比コンクリート充填円形鋼管短柱の圧縮特性, 土木学会論文集, No. 759, pp. 25-36, 2004
- 3) 岩田秀治ほか: 薄鋼板を用いた高架橋柱の耐震補強, 土木学会第 61 回年次学術講演会, pp. 45-46, 2006
- 4) 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
- 5) 土木学会: 鋼構造物設計指針, 1997
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書(構造的能照査編), 2002
- 7) 長沼一洋: 三軸応力下のコンクリートの応力-ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, No. 474, pp. 163-170, 1995
- 8) 金洗演ほか: 鋼とコンクリートからなる合成構造の付着特性に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp. 1631-1632, 1994