

(33) リブ付鋼管による重ね継手の応力伝達性能

A STUDY ON BOND STRESS TRANSFER OF LAP JOINT WITH SPIRAL LIB INDUCED STEEL TUBES

岡野 素之* 大内 一** 田中 浩一***

By Motoyuki OKANO, Hajime OHUCHI, and Kouichi TANAKA

As an economical and effective joint system for steel tube connection, a new splice joint has been developed. This joint consists of external and internal steel tubes with spiral rib induced on each corresponding surfaces and filled concrete between them.

Pull off tests have been conducted focusing on bond stress transfer of this joint.

Following results were concluded ; 1) Ultimate failure can be classified into three modes, i.e. Yi: yielding of internal tube, Yo: yielding of external tube, and C: concrete failure. 2) Bond strength due to concrete failure (C mode) is provided as 85-95kgf/cm² and 80kgf/cm² respectively with and without filled concrete into internal tube. 3) Rational design equation concerning tensile force is proposed.

1. まえがき

施工の合理化と鉄筋代替に着目し、橋脚断面内に複数の鋼管を配置した鋼管・コンクリート複合構造は、高さ40~100m級の高橋脚の省力化・急速施工を目指した工法として期待されている。本構造では高さ方向の鋼管の接合は現在溶接であるが、接合点が多数で鋼管径も大きく、また検査が必要なため工期・工費を要する。そこで溶接接合の代わりに、直径の異なるスパイラルリブ付鋼管（内側鋼管は外面リブ付、外側鋼管は内面リブ付）を内外に重ねてその間にコンクリートを充填する鋼管重ね継手を考案した。

本重ね継手の強度に影響を及ぼす因子として、内外鋼管の剛性や間隔、継手長さなどが考えられる。そこで、引抜きに関する付着応力伝達機構を解明し実用設計式を提案することを目的として、これらをパラメーターとした引抜き試験を行なった。

2. 試験内容

2.1 試験体

試験体と試験結果の一覧を表-1に、試験体の概要を図-1にそれぞれ示す。試験体は、外径700~800mm、高さ950mmの円柱状（合計13体）で、市販のリブ付き鋼管を中心軸を合わせて内外重ね、両鋼管の間にコンクリートを充填した構造である。内側鋼管内部は、中空シリーズでは空洞、中詰めシリーズではコンクリートを充填してある。内側鋼管にはφ600の外面リブ付鋼管を、また外側鋼管にはφ700・750・800の内面リブ付鋼管をそれぞれ使用した。引張力は両鋼管の間のコンクリートを介して鋼管相互のリブに伝達される。

*大林組技術研究所、**工博 大林組技術研究所、***大林組技術研究所

表-1 試験体と試験結果の一覧

	試験体No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	シリーズ		中空				中詰め								
試験体の諸元	箇目点		内外管剛性				外管剛性		重ね継手長さ		内外管空き		偏心	標準	
	内側鋼管	外径 ϕ_i (mm)	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
		厚さ t_i (mm)	9	12	16	9	9	6	9	9	9	9	9	9	9
	外側鋼管	外径 ϕ_o (mm)	750	750	750	750	750	750	750	750	750	700	800	750	750
		厚さ t_o (mm)	12	12	12	9	16	6	9	9	9	9	9	9	9
	有効継手長 ℓ_e (mm)		270	270	270	270	270	270	210	330	390	270	270	270	270
	鋼管相互の間隔 d (mm)		63	63	63	66	59	69	66	66	66	41	91	66	66
試験結果	最大荷重 P_{max} (tf)		335.0	371.1	399.2	355.0	481.5	384.3	338.0	550.0	678.1	450.0	436.9	476.5	439.3
	最大付着応力度*1 τ_{max} (kgf/cm ²)		65.8	72.9	78.4	69.8	94.6	75.5	85.4	88.4	92.2	88.4	85.8	93.6	86.3
	鋼管最大引張応力度*2 (kgf/cm ²)	内側鋼管	2005	1674	1360	2124	2882	3431	2023	3291	4058	2693	2615	2852	2629
		外側鋼管	1204	1334	1435	1695	1305	2741	1613	2625	3237	2303	1954	2274	2097
	最大荷重時変位*3 s (mm)		4.58	4.86	3.49	7.81	4.78	2.39	3.67	5.42	7.58	5.62	3.68	6.07	5.86
	破壊形式*4		YI	YI	C	YI	C	Yo	C	C	C	C	Yo	C	C

凡例 *1: $\tau_{max} = P_{max} / (\pi \cdot \phi_i \cdot \ell_e)$ *2: 最大荷重を鋼管断面積で除した値

*3: 継ぎ手部下端における内側鋼管とコンクリートとの相対変位

*4: YI: 内側鋼管降伏、 Yo: 外側鋼管降伏、 C: コンクリート破壊

実験パラメーターとして以下の5点に着目した。

- 1) 内外鋼管の剛性: 鋼管厚さ6・9・12・16mm
- 2) 有効継手長: 210・270・310・390mm
- 3) 鋼管相互の間隔: 41・66・91mm
- 4) 偏心荷重の影響
- 5) 内部コンクリート充填の影響

ここで有効継手長(ℓ_e)とは、継ぎ手の重ね部分の内実際に付着性能を発揮すると考えた長さで、重ね長さ ℓ から鋼管相互の間隔を差し引いて求めた。

2.2 使用材料

内側鋼管、外側鋼管ともにJIS A5525に規定される製品を用いた。リブは概略、高さ3、幅11、間隔40mmの形状で、傾き45°でスパイラル状に配置されている。材料試験結果を表-2に示す。

コンクリートはレディーミクストコンクリート(早強)を使用した。材料試験結果を表-3に示す。

2.3 加力方法

加力装置を図-2に示す。本試験では基本的な付着伝達のメカニズムに着目しているため、継ぎ手部には引張荷重のみが作用する加力方法とした。試験体は接続治具に溶接し、加力はりにPC鋼棒で固定した。加力は、500tfジャッキ2台で加力はり中心を加力中心として左右から押し開くことにより行なった。ただしNo.12試験体はジャッキを移動し加力の中心を鋼管の中心から3.6cm偏心させた。一方向単調増加で加力し、最大荷重の後内外鋼管の相対変位

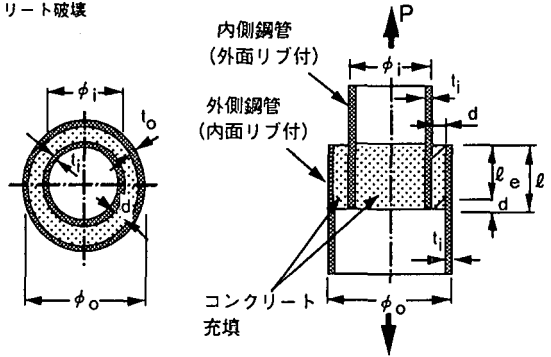


図-1 試験体の概要

表-2 リブ付鋼管の材料試験結果

種類	材質	公称厚さ (mm)	0.2%耐力 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	伸び率 (%)	ヤング係数 $\times 10^5$ (kgf/cm ²)	試験体No.
外リブ 内側鋼管	SKK 490	6	4307	5770	30.9	2.13	No.6
		9	3875	5289	23.1	2.09	No.1,4,5,7~13
		12	3673	5132	22.9	2.04	No.2
		16	4384	6226	36.5	1.95	No.3
		6	3898	5473	33.5	1.99	No.6
内リブ 外側鋼管	SKK 490	9	4146	5669	33.0	2.04	No.4,7~10,12,13
		12	3976	5645	37.8	2.00	No.1,2,3
		16	4565	6452	37.1	1.98	No.5
	SKK 400	9	2563	4433	40.4	1.95	No.11

表-3 コンクリートの材料試験結果

使用部位と試験体No.	材齢	圧縮強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 $\times 10^5$ (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)
No.1,2,3,13 継ぎ手、中詰め部	28・44日 平均	298	2.33	25.1
No.4~12継ぎ手部	66・100日 平均	328	2.48	26.4
No.4~12中詰め部	7・41日 平均	474	2.88	31.6

が18mm程度となった時点で除荷した。

3 試験結果

3.1 破壊状況と破壊タイプ

内外鋼管間コンクリートの破壊状況の一例を写真—1に示す。写真はコンクリートの鉛直断面で、継手上部でコンクリートがコーン状に抜け落ちた様子と斜めのひびわれが観察される。

強度を決定する破壊形式は次の3種類に分かれた。

1) 内側鋼管降伏型 (Yi)

内側鋼管厚の小さいものは、内側鋼管下部で外圧による円周方向圧縮応力により鋼管が降伏し、抜け出した。

2) 外側鋼管降伏型 (Yo)

外側鋼管厚の小さいものは、外側鋼管上部で内圧による円周方向引張応力により鋼管が降伏し、抜け出した。

3) コンクリート破壊型 (C)

鋼管厚さの大きいものや中詰め型のほとんどは、内外鋼管とも降伏せず、内側鋼管リブ表面でコンクリートが破壊して抜け出した。なおNo.9は内側鋼管母材部で引張降伏後、抜け出している。

3.2 鋼管のひずみ分布

図—3に中空型であるNo.4試験体のひずみ分布を示す。内側鋼管が降伏したYi型である。外側鋼管は、付着剥離力により円周方向引張ひずみが上方で卓越する逆三角形分布となっている。また鉛直方向ひずみは、自由端である上方で圧縮側であるが、これは円周方向の引張力の影響と思われる。下方に向かうにつれ引張側に移行する。内側鋼管は、逆に下方で外圧力による円周方向圧縮ひずみが卓越しやがて降伏に到る三角形分布を示す。また鉛直方向ひずみは下縁では最大荷重時に降伏しひずみが増大している。

図—4に中詰め型であるNo.13試験体 (C型破壊) のひずみ分布を示す。内側鋼管は、内部にコンクリートが中詰めされているため円周方向のひずみは小さく、最大荷重時で平均 250×10^{-6} 程度であった。また鉛直方向は概ね逆三角形分布となっている。

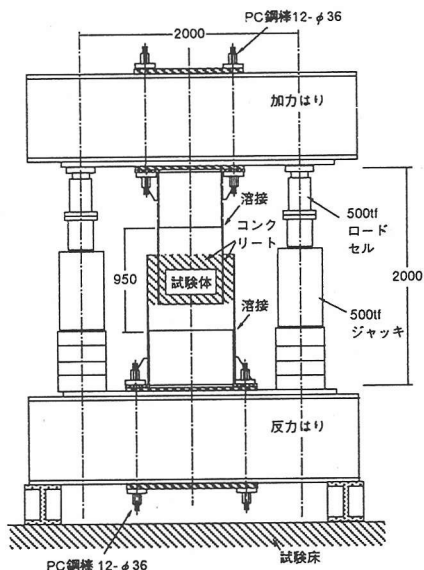
3.3 付着強度

表—6に実験で得られた最大荷重時の諸値を示す。付着強度は最大荷重時の平均付着応力度とし有効継手長を用いて求めた。また鋼管の降伏はVon Misesの降伏条件式で判定した。以下、各パラメータが付着強度に及ぼす影響について述べる。

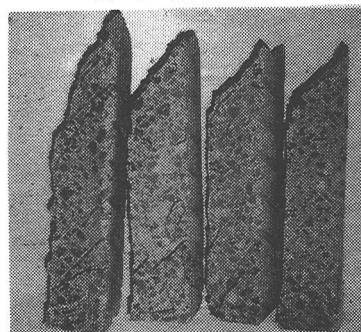
1) 内外鋼管の剛性 No.1～No.4の中空型は、内側鋼管が厚くなるにつれコンクリート破壊型に移行し、約80kgf/cm²程度の付着強度であった。一方No.5～No.13の中詰め型では、鋼管厚さの小さいNo.6と降伏点強度の低いNo.11を除きコンクリート破壊型で、85～95 kgf/cm²の付着強度であった。また、外側鋼管厚さ16mmのNo.5は、同9mmのNo.13に比較し付着強度が約10%高い結果であり、鋼管の拘束力による効果が出ている。

2) 有効継手長 有効継手長のみを変化させた試験体 (No.7, No.8, No.9, No.13) で比較すると、付着強度は85.4～92.2kgf/cm²の範囲で、これらの平均値88.1kgf/cm²から±4%の範囲以内にありほぼ一定であった。また図—5にこれらの試験体における最大荷重時での、内側鋼管の鉛直方向ひずみ分布を示す。縦軸のひずみ測定位置は有効継手長区間での下側からの距離を示す。ばらつきはあるが全体的には線形な分布であり、前述した有効継手長に係わらず付着強度がほぼ一定であったことを考慮すれば、有効継手長区間で一定の付着応力度分布であると評価できる。

3) 鋼管相互の間隔 鋼管相互の間隔のみを変化させた試験体 (No.10, No.11, No.13) で比較すると、付着強度



図—2 加力装置



写真—1 継ぎ手部コンクリートの破壊 (No.13試験体)

は85.8~88.4kgf/cm²の範囲ではほぼ一定であり、降伏したNo.11は85.8kgf/cm²でやや低いが、鋼管相互の間隔の付着強度への影響は少なかったと言えよう。

4) 偏心荷重の影響 No.12は、実際の橋脚断面内での応力勾配を考慮し、加力中心を偏心させ全断面引張で曲げを組合せて作用させたが、標準的な試験体No.13と比較し、同様の破壊タイプ、同等以上の強度であり、付着強度への影響は少なかった。

3.4 荷重と抜出しの関係

図-6に付着応力度と鋼管のすべりの関係の代表例 (No.4、No.13) を示す。すべりは鋼管下端での内側鋼管とコンクリートの鉛直方向相対変位 (相対する点の平均値) で定義した。中空型 (No.4)、中詰め型 (No.13) とともに強度に違いはあるが、すべりで5~8mm程度で最大荷重に達し、その後なだらかに荷重が低下している。このように荷重と抜出しの関係は各試験体とも同様であった。

4 考察

4.1 応力伝達

中詰め型に関し破壊時の応力伝達のメカニズムを検討した。実験結果から内外鋼管とコンクリートとの付着応力度は、有効継手長間で一定とみなし、破壊時における継手部の応力伝達を図-7に示すように想定した。継手部のコンクリートには、ある角度を持ったひびわれが発生しており、ひびわれ間でストラットを形成していると考え。ここでひびわれが鉛直方向となす角度をストラット角度 (θ) と呼ぶ。外側鋼管のひずみ測定値をもとに、以下の手順により継手部のコンクリートに作用する外圧から θ を算出した。

ストラット方向の力は付着応力度と内圧、外圧で構成されており、内外鋼管の間のコンクリートに作用する内圧及び外圧はそれぞれ次式のように表せる。

$$P_i = \tau_i \cdot \tan \theta \quad \cdots(1)$$

$$P_o = \tau_o \cdot \tan \theta \quad \cdots(2)$$

ここで、荷重 T と内外鋼管の付着応力のそれぞれの合計はつり合うので次式が成り立つ。

$$T = \pi \cdot \phi_i \cdot \ell_e \cdot \tau_i = \pi \cdot \phi_o \cdot \ell_e \cdot \tau_o$$

したがって

$$\tau_o = \tau_i \cdot \phi_i / \phi_o \quad \cdots(3)$$

ここに、 P_i 、 P_o : 鋼管間コンクリートに作用する内圧、外圧

τ_i 、 τ_o : 内側、外側鋼管の平均付着応力度

ϕ_i 、 ϕ_o : 内側、外側鋼管の外径

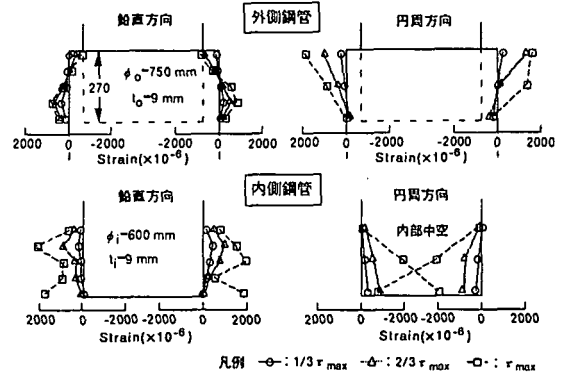


図-3 鋼管のひずみ分布 (No.4)

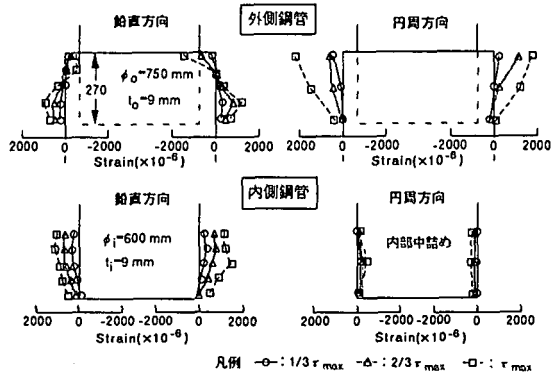


図-4 鋼管のひずみ分布 (No.13)

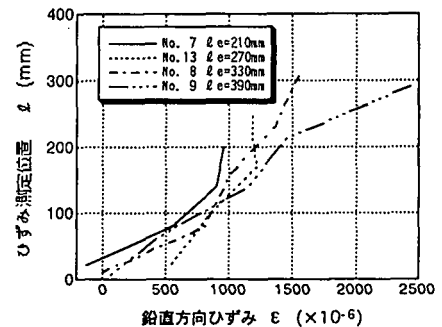


図-5 内側鋼管の鉛直方向ひずみ分布

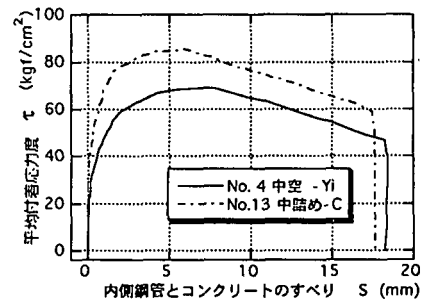


図-6 付着応力度とすべりの関係

外圧と外側鋼管円周方向応力の関係はシェルの薄肉理論により次式で表せる。

$$P_o = \sigma_{H_o} \cdot t_o / (\phi_o / 2) \quad \dots(4)$$

σ_{H_o} : 外側鋼管の円周方向引張応力度
ひずみの測定値により次式で計算

$$\sigma_{H_o} = E \cdot (\epsilon_H + \nu_s \cdot \epsilon_z) / (1 - \nu_s^2) \quad \dots(5)$$

ここに、 t_o : 外側鋼管の厚さ

ϵ_H : 円周方向のひずみ

ϵ_z : 鉛直方向のひずみ

ν_s : ポアソン比 (0.3)

E : ヤング係数

ストラット角度は次式で表せる。

$$\theta = \tan^{-1} (P_o / \tau_o) \quad \dots(6)$$

(3)式で τ_o を、(4)式により P_o をそれぞれ求め、(6)式に代入し θ を計算した。このように求めたストラット角度の分布を図-8に示す。同図は中詰め型各試験体の重ね継手部における分布で、 $\tau_i = 50 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\tau_{\max}$ (破壊時) の2ケースに関し示した。縦軸は測定位置の継手全長に対する比とした。計算中、外側鋼管の円周方向応力は材料の降伏応力度を上限とした。 $\tau_i = 50$ の場合 θ は平均 30.1° で、 $\tau_{\max}$ 時では 44.3° に上昇する。また θ は $\tau_i = 50$ の場合全体に上方が大きい逆三角形分布を示しているが、 $\tau_{\max}$ 時では上限が 55° 付近の台形分布となる。これらから、荷重の上昇にしたがい上方から下方に順にストラット角度が上限に達し平均化され则认为られる。特に有効継手区間では $\tau_{\max}$ 時の θ は一定の範囲に分布しており、破壊時には内圧が比較的均等に作用することがわかる。

図-9にはNo.13における継手部の中央位置での平均付着応力度と内圧の関係を示す。低い荷重では内圧が小さく θ も小さいが、荷重の増大とともに θ も増大し最大荷重付近で $\theta = 45 \sim 50^\circ$ 程度となることがわかる。

4.2 設計方法の提案

以下の条件のもと、中詰め型において引張力 T に対する破壊時の設計式を提案する。

- 1)破壊形式はコンクリート破壊型とする。
- 2)付着応力度は、圧縮強度 300 kgf/cm^2 程度のコンクリートで 85 kgf/cm^2 を上限とする。
- 2)付着応力度分布は有効継手長間で一定とする。
- 3)コンクリートストラット角度は図-8から外側鋼管円周方向の応力に関する安全側を考え $\theta = 55^\circ$ とする。
- 4)鋼管は本製品またはこれに準じたりブ形状とする。

平均付着応力度

$$\tau_i = T / (\pi \cdot \phi_i \cdot \ell_o) \quad \dots(7)$$

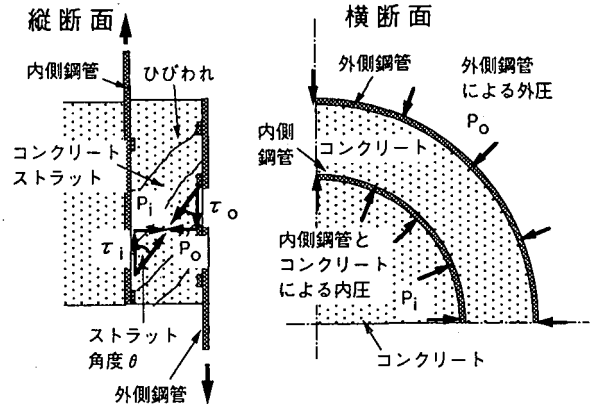


図-7 応力伝達の模式図

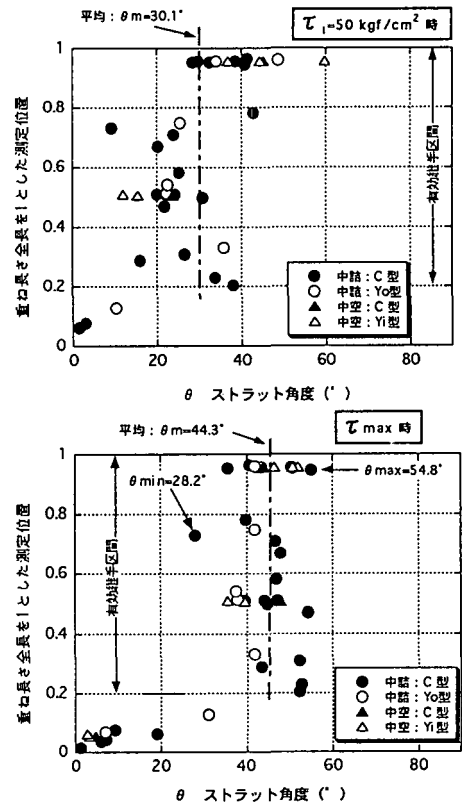


図-8 重ね継手部のストラット角度の分布

ここに、 T ：設計引張力、 l_e ：有効継手長さ ただし $\tau_i < 85 \text{ kgf/cm}^2$

外圧は(2)、(3)式より

$$P_o = \tau_o \cdot \tan 55^\circ = 1.428 \tau_i \cdot \phi_i / \phi_o \quad \cdots(8)$$

外側鋼管の円周方向応力度は(4)式より、

$$\sigma_{H_o} = P_o \cdot (\phi_o / 2) / t_o \quad \cdots(9)$$

(7)、(8)、(9)式をまとめると σ_{H_o} は

$$\sigma_{H_o} = 0.714 \cdot T / (\pi \cdot t_o \cdot l_e) \quad \cdots(10)$$

外側鋼管の相当応力度： σ_{eq}

$$\sigma_{eq} = (\sigma_{H_o}^2 + \sigma_z^2 - \sigma_{H_o} \cdot \sigma_z)^{1/2} \quad \cdots(11)$$

ここに σ_z ：鉛直方向応力度

設計手順としては、まず(7)式により $\tau_i < 85 \text{ kgf/cm}^2$ となるように l_e を決め、次に荷重と継手の諸元から(10)式により外側鋼管の円周方向応力度を求める。そして鋼管の相当応力度を式(11)で計算して材料の降伏応力度と比較し判定する。継手の強度はコンクリートの付着破壊で決まるが、継手の引張強さを鋼管母材の降伏荷重以上に設定することにより、部材としての靱性は確保できる。

内側鋼管は部材としての断面計算により決まる鋼管厚さを適用するものとする。これは、中詰めされたコンクリートの効果により円周方向の応力は小さいこと、またNo.9では内側鋼管が母材部分で引張降伏した後抜け出していることから円周方向の応力による影響は実用上問題にならないと判断できるからである。

図-10に実験時の最大荷重を T として上記の方法により

行なった各試験体の計算結果を示す。縦軸は最大付着応力度、横軸は計算により得られた相当応力度を鋼材の降伏応力度で除した値（以下、降伏応力度比と呼ぶ）である。降伏応力度比が1を超えるNo.6、No.11は円周方向に降伏して破壊しており、またコンクリートで破壊した試験体は降伏応力度比が1以下である。またNo.9は降伏応力度比が1.0程度であり、実験結果もまた外側鋼管の円周方向応力度が降伏付近であった。これらから実験結果は上記計算結果と整合しており、本法設計方法の妥当性を裏付けている。

5 まとめ

リブ付鋼管による重ね継手の引抜き試験を実施した結果以下のことがわかった。

- (1) 強度を決定づける破壊タイプは内側鋼管降伏型、外側鋼管降伏型とコンクリート破壊型に大別できる。
- (2) 中空型、中詰め型ともに外側鋼管は上部自由端で円周方向引張りずみが増加する。また中空型の内側鋼管は下部自由端で円周方向圧縮ひずみが増加する。
- (3) コンクリート破壊型の平均付着強度は、中空型で約 80 kgf/cm^2 、中詰め型で約 $85 \sim 95 \text{ kgf/cm}^2$ であった。
- (4) 有効継手長、鋼管相互の間隔および偏心荷重は実用範囲内で付着強度に影響しない。
- (5) 付着応力度分布は有効継手長内でほぼ一定とみなせる。
- (6) 破壊時には継手部でのコンクリートストラット角度はほぼ一定の範囲にあり、ストラットの角度を上限値の 55° に設定し、荷重のつり合式によって鋼管応力を実用上計算できることがわかり、設計式を提案した。

謝辞：東京大学工学部 前川宏一助教授よりご指導を頂きました。ここに記して深謝いたします。

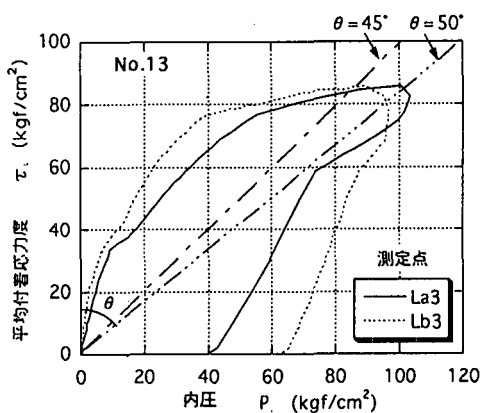


図-9 付着応力度と内圧の関係

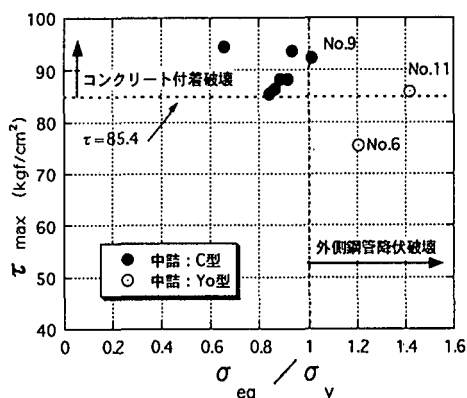


図-10 最大付着応力度と降伏応力度比