

等曲げモーメントを受ける接着接合された鋼管重ね継手の必要定着長

関西大学 学生会員 ○水谷 壮志, 正会員 石川 敏之

1. はじめに

鋼管を接合する場合には溶接やボルト接合が用いられることが多い。鋼管径が小さい場合には、裏当て金を用いた片側からの溶接や外フランジを設けてボルト接合される。しかし、これらの接合は施工環境の制約や品質確保などの課題があり、簡便な接合方法が求められている。

他方、簡便な鋼管の接合方法として、接着接合が提案されている¹⁾。鋼管を接着接合する際には同径の鋼管をそれよりも径が大きな鋼管内で突き合わせて接合する方法や径の異なる鋼管を重ねて接合する方法などがある。接着接合した鋼管の強度は、接合長さが長いほど高いことが実験により確認されている¹⁾。また、平均せん断応力を仮定して接合長さ(定着長)の提案も行われている¹⁾。

本研究では、せん断遅れ理論を適用し、図-1に示す、接着接合による鋼管重ね継手の力学特性を明らかにする。そして、接着剤端部に生じるせん断応力の収束式を与え、せん断応力が収束するために必要な定着長を導出する。

2. 接着接合による鋼管重ね継手のせん断遅れ理論

図-1に示すような、異なる径の鋼管が接合されている範囲の内鋼管に生じる曲げモーメント $M_i(x)$ は次式で与えられる²⁾。

$$M_i(x) = \{B_1 \cosh(c_b x) + B_2 \sinh(c_b x) + \xi_b\} M \quad (1)$$

ここに、 $c_b = \sqrt{\pi \left(r_i + \frac{h}{2}\right)^3 \frac{G_e}{h} \frac{1}{E_i I_i} \frac{1}{1 - \xi_b}}$, $\xi_b = \frac{E_i I_i}{E_i I_i + E_o I_o}$,

B_1 および B_2 は未定係数、 I_i は内鋼管の断面二次モーメント、 I_o は外鋼管の断面二次モーメント、 E_i は内鋼管のヤング係数、 E_o は外鋼管のヤング係数、 G_e は接着剤のせん断弾性係数、 M は作用曲げモーメント。その他の部材寸法については図-1に示す通りである。

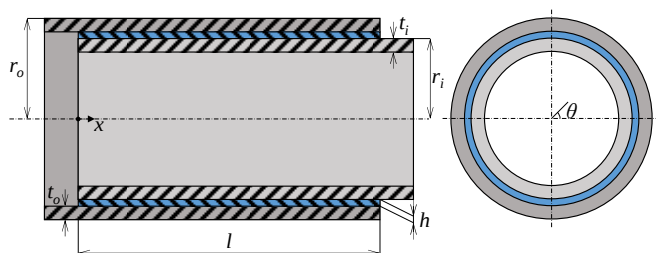


図-1 接着接合による鋼管重ね継手

外鋼管の曲げモーメントは $M_o(x) = M - M_i(x)$ である。また、せん断応力は、最大となる $\theta = -90^\circ$ において次式で与えられる²⁾。

$$\tau(x) = c_b / \left\{ \pi \left(r_i + \frac{h}{2}\right)^2 \right\} \cdot \{B_1 \sinh(c_b x) + B_2 \cosh(c_b x)\} \cdot M \quad (2)$$

式(1)に $M_i(0) = 0$, $M_i(l) = M$ の境界条件を与えることで未定係数はそれぞれ次式となる。

$$B_1 = -\xi_b \quad (3)$$

$$B_2 = (1 - \xi_b) / \sinh(c_b l) + \xi_b / \tanh(c_b l) \quad (4)$$

3. 有限要素解析による提案式の検証

第2章の提案式を有限要素解析と比較する。計算例として、部材寸法および材料定数は表-1に示す値とする。作用曲げモーメントは $M = 1 \text{ kN} \cdot \text{m}$ とした。

本研究で汎用有限要素解析 Marc 2021 を用いて軸対称解析を実施した。解析要素には曲げを考慮した四節点軸対称要素 (Marc 要素番号: 95) を使用する。この要素は、通常の軸対称要素に対して、円周方向に 180° 離れた点の変位が自由度に追加されている。

解析モデルを図-2に示す。解析要素は x 軸方向に 1 mm ずつ、厚さ方向は4分割とした。また、円周方向の積分点の数を 15° 間隔の13とした。境界条件は、外鋼管の左端で $\theta = \pm 90^\circ$ に対する x 軸方向の変位を固定し、内鋼管の右端で $\theta = 0^\circ$ に対する円周方向の変位を固定した。ま

表-1 計算例の材料定数および寸法

	内鋼管	外鋼管
ヤング係数 $[\text{N/mm}^2]$	$E_i = E_o = 200,000$	
ポアソン比	0.3	
外径 $[\text{mm}]$	$2r_i = 89.1$	$2r_o = 101.6$
板厚 $[\text{mm}]$	$t_i = 3.2$	$t_o = 4.2$
接着剤		
ヤング係数 $[\text{N/mm}^2]$	2,800	
ポアソン比	0.4	
せん断弾性係数 $[\text{N/mm}^2]$	$G_e = 1,000$	
接着厚さ $[\text{mm}]$	$h = 2.05$	
接着長さ $[\text{mm}]$	$l = 100$	

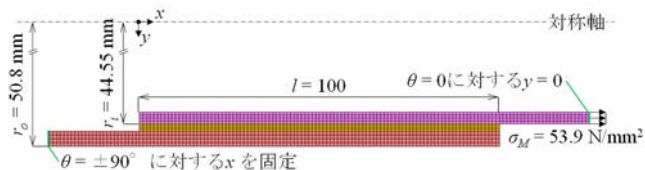


図-2 軸対称解析モデル

キーワード 鋼管, 重ね継手, 接着接合, せん断遅れ, 軸対称解析

連絡先 〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3-35 関西大学 TEL 06-6368-0926

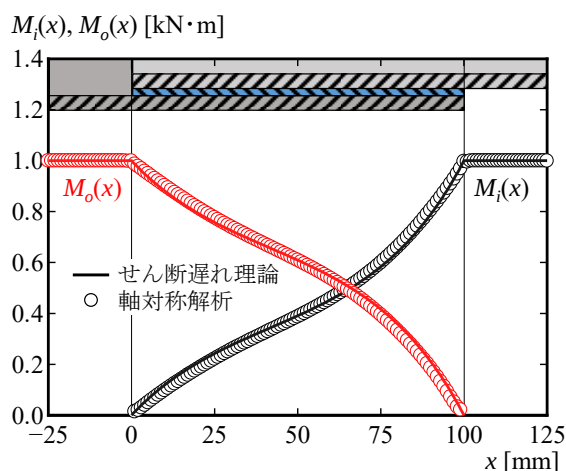


図-3 分担曲げモーメント分布

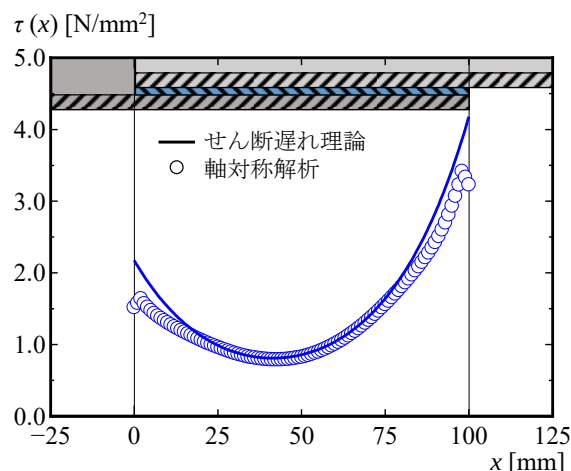


図-4 せん断応力分布

表-2 接着端部のせん断応力とその収束度

t_o [mm]	r_o [mm]	ζ_b	X	l_n [mm]	$\tau(0)$ [N/mm²]	$\tau(l)$ [N/mm²]	$\tau(0)/\tau(0)$	$\tau(l)/\tau(l)$
6	52.6	0.257	0.346	142	1.43	< 4.00	1.0404	1.0049
4.2	50.8	0.343	0.522	144	1.99	< 3.76	1.0181	1.0050
2.3	48.9	0.503	0.987	140	3.32	> 3.27	1.0050	1.0051
1	47.6	0.708	0.412	92	6.09	> 2.57	1.0049	1.0286

た、内鋼管の右端で x 軸方向の分布荷重 $\sigma_M = 53.9 \text{ N/mm}^2$ を与える。この分布荷重は円周方向に $\sin \theta$ で作用するため、作用曲げモーメントは $M = 1 \text{ kN} \cdot \text{m}$ となる。

図-3 に内鋼管および外鋼管の分担曲げモーメントの分布を示す。軸対称解析の曲げモーメントは節点応力を積分して算出した。図より、せん断遅れ理論および軸対称解析の結果がよく一致していることがわかる。

図-4 に接着剤のせん断応力の分布を示す。図の接着端部において、せん断遅れ理論の値が軸対称解析の値よりも大きいことがわかる。これは、本研究のせん断遅れ理論は接着剤に生じるせん断応力とピール応力を分離せずに、せん断応力のみで計算したためだと考えられる。

4. せん断応力の収束値および必要定着長

式(2)に $x=0$, l を代入し、定着長 l が十分長いと仮定すると、接着端部のせん断応力の収束値はそれぞれ次式で与えられる。

$$\tau(0) = c_b \xi_b / \{ \pi (r_s + h/2)^2 \} \cdot M \quad (5)$$

$$\tau(l) = c_b (\xi_b - 1) / \{ \pi (r_s + h/2)^2 \} \cdot M \quad (6)$$

式(5), (6)より、接着端部のせん断応力の大小は ξ_b と $(1 - \xi_b)$ で決まる。ここで、 $0 < \xi_b = E_i I_i / (E_i I_i + E_o I_o) < 1$ である。したがって、 $E_i I_i = E_o I_o$ ($\xi_b = 0.5$) のとき $\tau(0) = \tau(l)$, $E_i I_i > E_o I_o$ ($0 < \xi_b < 0.5$) のとき $\tau(0) < \tau(l)$, $E_i I_i < E_o I_o$ ($0.5 < \xi_b < 1$) のとき $\tau(0) > \tau(l)$ である。

せん断応力の最大値が収束するための必要定着長 l_n について、 $\tau(0) \leq \eta \tau(0)$ または $\tau(l) \leq \eta \tau(l)$ を満たす定着長 l を考える。ただし、 η はせん断応力の収束度として、1 より

大きく 1 に近い値。このとき、必要定着長 l_n は次式で与えられる。

$$l_n \geq 1/c_b \cdot \cosh^{-1} \left\{ \left(\eta \sqrt{\eta^2 - 1} + X^2 + X \right) / (\eta^2 - 1) \right\} \quad (8)$$

ここに、 $X = \min \{ E_i I_i / (E_o I_o), E_o I_o / (E_i I_i) \}$ 。

表-2 に必要定着長 l_n を確保した際の接着端部のせん断応力を示す。表の値は第3章の計算例をもとに、外鋼管の板厚および半径のみパラメータとしている。また、収束度は $\eta = 1.005$ で必要定着長を計算した。表-2 より、 $\xi_b < 0.5$ では $\tau(l)$ が最大となり、その収束度 $\tau(l)/\tau(l)$ は仮定した η 以内であることがわかる。また、 $\xi_b > 0.5$ では $\tau(0)$ が最大となり、その収束度は $\tau(0)/\tau(0) \leq \eta$ である。

5. おわりに

本研究では、せん断遅れ理論を用いて、接着接合による鋼管重ね継手の分担曲げモーメントおよび接着剤に生じるせん断応力を明らかにした。提案したせん断遅れ理論は、曲げを考慮した軸対称解析とよく一致した。また、接着端部に生じるせん断応力の収束式を用いて、せん断応力が収束するために必要な定着長の算出式を与えた。

参考文献

- 1) 西海健二, 川端規之, 大槻貢, 相馬英也: 鋼管杭の拡張式接着継手の曲げ耐荷性能に関する実験, 土木学会第55回年次学術講演会, III-B14, 2000.
- 2) 石川敏之, 水谷壮志: CFRP 接着された鋼管の定着長とはく離に対するエネルギー解放率, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 77, No. 1, pp. 57-72, 2021.