

I-49 シールドセグメントの継手剛性に関する実験

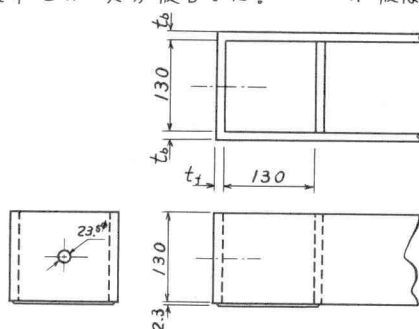
石川島播磨重工業 正員 結城皓暁
 “ “ 〃 安藤紘三

1. まえがき

シールド工法におけるトンネルは、セグメントどうしをボルトで結合（「セグメント継手」と呼ぶ）してリングを組立て、このリングを「軸方向ボルト」で連結してトンネルを形成しているが、一般に「セグメント継手」の剛性はセグメント本体部のそれに比して劣っている場合が多い。そのためこの部分の弱点をカバーし、リングの変形を少なくするために、リングどうしは「セグメント継手」がトンネル軸方向に通らないように千鳥に連結されている。このため、セグメントの力学的挙動が継手のない剛性一様なリングのそれとかなり異っていることは、先に筆者の一人が報告した。^{1) 2)} 本報は先の報告の中のセグメント継手の剛性を定量的に把握するために、合成セグメントに使用されている鋼箱型継手について実験を行ったので簡単な計算をそえて報告するものである。

2. 実験

実験体は図-1に示すような合成セグメントに使用されている鋼箱型継手をモデル化したものである。寸法は実際に使用されている継手とほぼ同寸である。又、実験体はそのフランジの板厚 $t_f = 9, 12, 16 \text{ mm}$ 、ブラケットの板厚 $t_b = 16, 20 \text{ mm}$ の組合せて合計6種類である。使用した継手ボルトは、各実験体とも $\text{W}\frac{7}{8}$ (F9T) である。実験方法は、まず実験体2ヶをボルトで接合した後、試験機治具に取付ける。負荷はシールドセグメントが軸圧縮力と曲げモーメントを受ける部材のため、図-2のように偏心した圧縮力を加え、軸力と曲げモーメントを作用させる。なお偏心距離は $e = 2h$ (130mm), $3h$ (195mm) の2種類変えて行った。実験体接合の際の初期引張力は、ボルトに貼付したストレインゲージで測定しながら導入し、各実験体とも歪にして 2300×10^{-6} ($T_0 = 14.2 \text{ t}$) とした。実験の状況を写真-1に示す。



単位: mm

図-1

実験体は図-1に示すような合成セグメントに使用されている鋼箱型継手をモデル化したものである。寸法は実際に使用されている継手とほぼ同寸である。又、実験体はそのフランジの板厚 $t_f = 9, 12, 16 \text{ mm}$ 、ブラケットの板厚 $t_b = 16, 20 \text{ mm}$ の組合せて合計6種類である。使用した継手ボルトは、各実験体とも $\text{W}\frac{7}{8}$ (F9T) である。実験方法は、まず実験体2ヶをボルトで接合した後、試験機治具に取付ける。負荷はシールドセグメントが軸圧縮力と曲げモーメントを受ける部材のため、図-2のように偏心した圧縮力を加え、軸力と曲げモーメントを作用させる。なお偏心距離は $e = 2h$ (130mm), $3h$ (195mm) の2種類変えて行った。実験体接合の際の初期引張力は、ボルトに貼付したストレインゲージで測定しながら導入し、各実験体とも歪にして 2300×10^{-6} ($T_0 = 14.2 \text{ t}$) とした。実験の状況を写真-1に示す。

写真-1

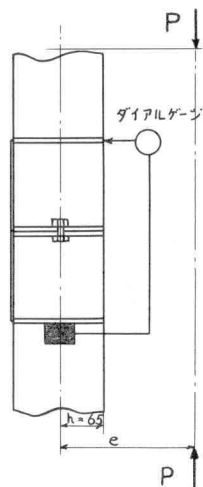
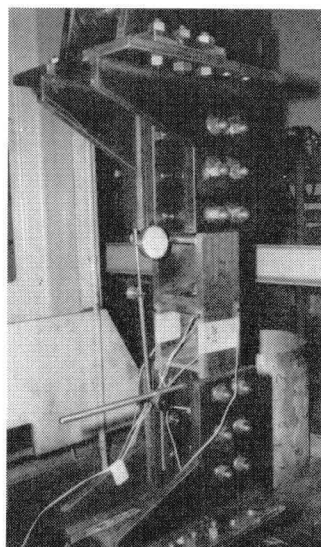


図-2

3. 計算と実験結果

いま、荷重 P が継手部に偏心して負荷されるとき、その力の釣合いは、支束部の降伏の変形による支束の移動を考慮すると 図-3 のようになり、 T : ボルト引張力、 C : 支束反力とすれば、

$$P + T - C = 0 \quad (1)$$

$$P \cdot e - C(h - x) = 0 \quad (2)$$

となる。降伏応力を σ_y と書けば、支束反力 C は

$$C = 4 \cdot \sigma_y \cdot t_b \cdot x \quad (3)$$

となり、①、②、③式において、 T について整理すると

$$T = (2\beta \cdot h - P) + 2 \sqrt{\beta(\beta \cdot h^2 - P \cdot e)} \quad (4)$$

$$\therefore \beta = \sigma_y \cdot t_b$$

となる。④式より、荷重 P が e だけ偏心して作用したときの継手ボルトにかかる引張力 T が求まる。継手部の変形は、ボルトとフランジの変形の重ね合わせしたものとなる。ボルトは、ボルトにかかる引張力がその初期張力より小さいときには、フランジの離向が生じないものとするれば変形しないと考えてよい。よって、継手部の変形は、フランジの変形によるもののみ考えればよい。フランジの変形は、ある支持条件を有する矩形板にボルト引張力が中央集中荷重として働く場合の中央点のたわみとなる。中央点のたわみ δ は、文献(3)より

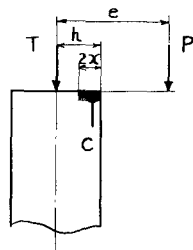


図-3

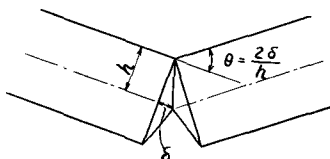


図-4

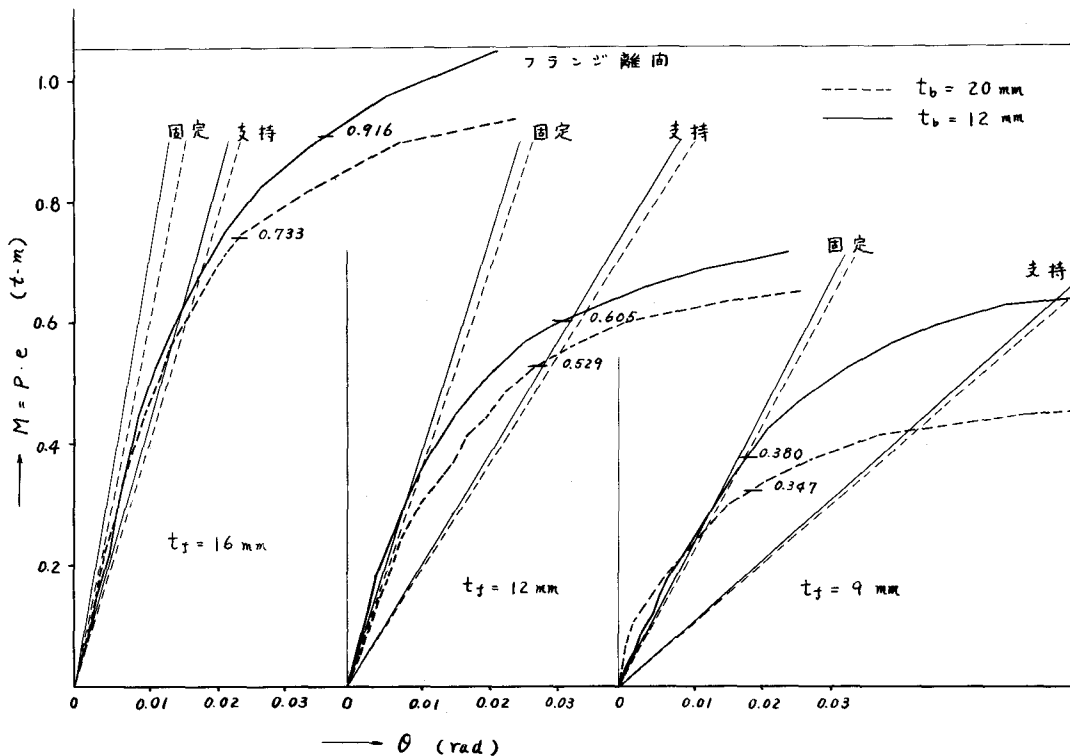


図-5

$$\delta = \alpha (h^2 / D) T \quad (5)$$

$$\therefore \alpha = 0.0116 \quad 4 \text{ 辺支持}$$

$$\alpha = 0.0056 \quad 4 \text{ 辺固定}$$

これより、図-4のように考えると、継手部の変形は、回転角として次のようになる。

$$\theta = 2\delta / h \quad (6)$$

⑥式に④、⑤式を代入すると、継手部の剛性は次式で回転バネ定数として求まる。

$$k = \frac{\theta}{M} = 2\alpha' \left[\left(\frac{2\beta}{M} - \frac{1}{e \cdot h} \right) + 2 \sqrt{\left(\frac{\beta}{M} \right)^2 - \frac{\beta}{h^2 M}} \right] \quad (7)$$

$$\therefore \alpha' = \alpha \cdot h^2 / D$$

$$M = e \cdot P$$

ここでは、矩形板の支持条件として4辺支持と4辺固定の2種類について計算した。実験と計算の結果を図-5に示す。図-5より、実験値は、各ケースともすべて4辺支持と4辺固定の計算値の間にあり、ブラケット板厚 t_b がフランジ板厚 t_f より厚くなると、実験値は4辺固定の計算値にのってくることがわかる。

4. 崩壊荷重

本題には直接の関係はないが、実際の設計にあたっては、その構造体の崩壊荷重を知ることは重要なことである。先に④式で求めたボルト引張力が矩形板に作用した場合の支桌部の降伏による塑性ヒンジラインの移動を考慮した崩壊形式は、図-6のように考えられる。フランジ部分と支桌部分の崩壊荷重 T_u 、 C_u はそれぞれ、 M_p ：全塑性曲げモーメント、 C_p ：全塑性圧縮力とすれば、次のようになる。

$$T_u = (8 + 4\alpha) \cdot M_p \quad (8)$$

$$C_u = (1 - \alpha) \cdot C_p \quad (9)$$

$$\therefore \alpha = \tan(\pi/4 - \varphi)$$

⑧、⑨式を①、②式に代入すると、崩壊荷重 P_u は

$$P_u = p \cdot C_p \quad (10)$$

$$\therefore p = \frac{\left(\frac{e}{h} (1 + 4\mu)^2 - (1 - 8\mu) \right)}{\sqrt{\left(\frac{e}{h} (1 + 4\mu)^2 - (1 - 8\mu) \right)^2 + 24\mu (1 - 2\mu)}}$$

$$\mu = M_p / C_p$$

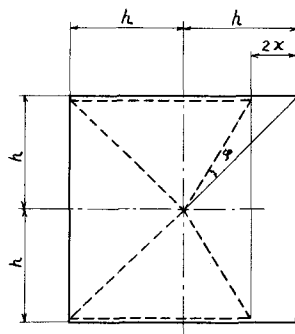


図-6

となる。この計算結果を図-5の中に示す。図からも解るように計算値は比較的良好に実験値と一致しており、フランジが離開する前にフランジが塑性崩壊し、その荷重で継手の最終強度が決定している。

5. まとめ 以上のようなラフな仮定に基づいた簡単な計算でセグメント継手の剛性を十分推察し得ることが実験的に確認された。実際の設計にあたっては、フランジとブラケットの板厚を考慮して先の計算を行えば、セグメント継手の剛性を求めることができる。

参考文献 1) 久保、結城：「シールドセグメントの応力に対する継手剛性の影響」土木学会論文集 第150号。 2) 結城：「継手剛性と組み方を考慮したシールドセグメントの解析」土木学会論文集 第176号。 3) Timoshenko : "Theory of Plates and Shells,"