

シールド工専用セグメントのセグメント
継手の挙動についてON THE BEHAVIOUR OF THE TRANSVERSE
JOINTS OF A SEGMENT

村上 博 智*・小 泉 淳**

By Hirotomu MURAKAMI and Atsushi KOIZUMI

1. ま え が き

シールドトンネルの覆工は、普通、数個のセグメントをボルトで接合したセグメントリングを用いて行われる。このセグメントリングは、継手部分における剛性がセグメント単体の剛性に比べて低下するため、剛性一様なリングに比べて変形しやすい。したがって、セグメントリングの断面力を算定し、それに基づいてセグメントの設計を行う際に、継手部分の剛性低下をどのように評価するかが重要な課題となっている。一方、また、比較的軟弱な地盤の多いわが国では、このような継手を有するリングは変形が特に大きくなるため、トンネル軸方向にもボルト等で接合し、いわゆる“千鳥組”による添接効果を期待する場合が多い。この場合には継手評価の問題に加えて、この添接効果をどのように評価するかが、重要な課題となってくる。

筆者らはすでにセグメントリングの耐荷機構を考えるうえで、セグメント継手部分を曲げモーメントに対する回転ばねに評価し、千鳥組による添接効果については、リング継ぎボルトを剛体とみなし、これが千鳥に組まれた各リングの変形を拘束するものとするモデルを提案した。そしてそれらのモデルの妥当性を各種の実験に基づいて実証するとともに、それを用いた数値実験結果から、周辺地山の状況に基づいてセグメントの主桁断面を設計する方法を明らかにし、あわせて周辺地山に適應した回転ばね定数を指摘することを可能にした¹⁾。

この報告は、セグメント継手の変形挙動を明らかにすることを目的としたものであり、鋼製セグメントおよびコンクリート平板型セグメントをその対象としている。

報告は、まず引張型ボルト接合に関する予備実験を行い、ボルトに生ずる軸力に着目して従来からの解析モデル^{2)~9)}の適用性を検討する。そして従来からのモデルに修正を加えて、実験結果をよく説明し得る解析モデルを提案する。次に鋼製模型セグメントおよびコンクリート平板型模型セグメントを用いて継手試験を行い、予備実験より得られた解析モデルを基として、特に継手部の回転角およびボルトに生ずる軸力に関して、試験結果をよく説明し得る解析モデルを提案する。さらに実用されたセグメントについても検討を行って、これらの解析モデルが実用セグメントにも適用できることを示す。

2. 引張型ボルト接合に関する予備実験

鋼製セグメントの継手試験を行った結果、継手板の挙動は引張型ボルト接合の挙動と類似していることが認められた。このため継手性状の解明にあたって、予備的な引張型ボルト接合実験を行い、その挙動を説明する解析モデルを考えることとした。

2. 引張型ボルト接合に関する予備実験

(1) 実験供試体の形状寸法

予備実験に用いた供試体の形状寸法は、図-1 に示す 3 通りであり、TYPE-1 は単純な引張状態を明らかにする目的で作られ、TYPE-2, 3 は継手板どうしがせり合うことによって生じる、いわゆるてこ反力の状態を調べる目的で作られたものである。なお、TYPE-3 は、次章で述べる継手試験に使用した、鋼製模型セグメントから切り出される供試体を想定したものである。

(1) 実験供試体の形状寸法

(2) 実験方法

実験はひずみ測定用の溝を切った高力ボルトを用いて、上述の供試体を接合し、図-2 に示す引張力を作用させて、ボルトに生ずるひずみ ϵ_b などを測定した。

(2) 実験方法

(3) 引張型ボルト接合に関する従来の解析法

引張型ボルト接合に関する研究は、国内においては、

(3) 引張型ボルト接合に関する従来の解析法

引張型ボルト接合に関する研究は、国内においては、

* 正会員 早稲田大学教授 理工学部土木工学科

** 工博 早稲田大学理工学研究奨励研究生

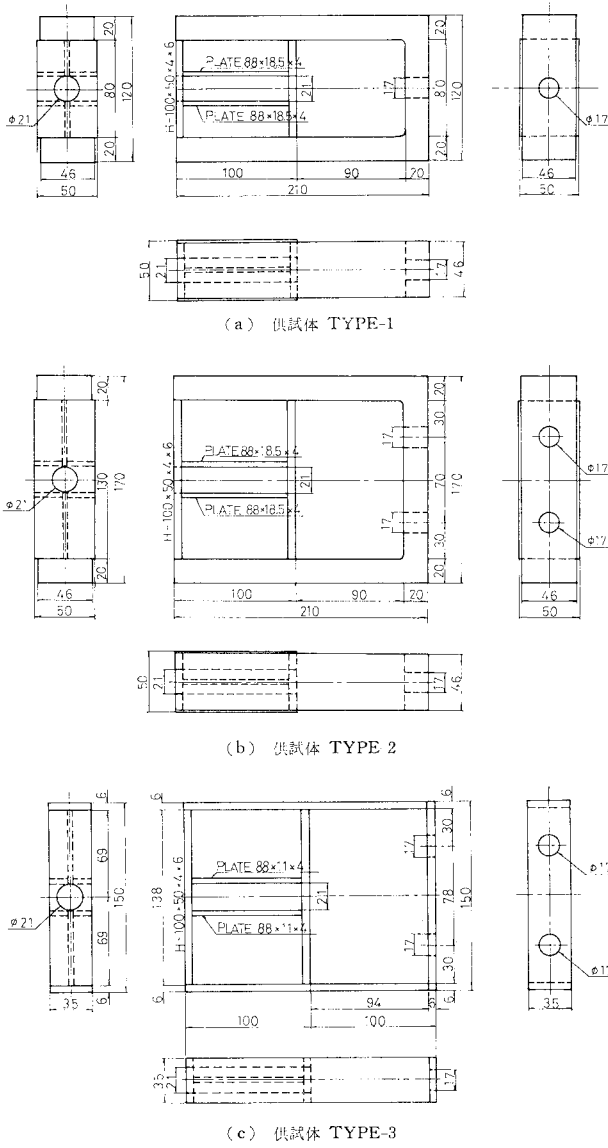


図-1 供試体

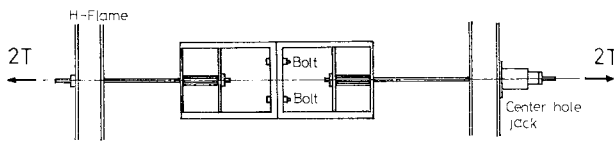
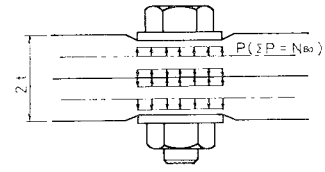
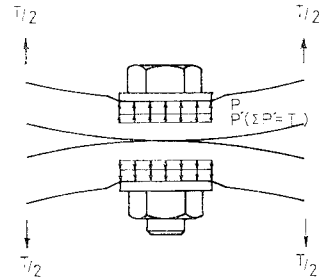


図-2 予備実験方法

日本建築学会、日本鋼構造協会などを中心に数多く見受けられる。そのうち参考文献にあげた2)~9)の研究は、セグメント継手の解析を行う場合にその適用性が高いと考えられる。中でも藤本・橋本の一連の研究^{9)~11)}は、本報告中のセグメント継手モデルの基本となるものである。そこで以下には、セグメント継手を念頭においたうえで、これら一連の研究に基づく従来の解析法について



(a) 締付け時



(b) 離間時

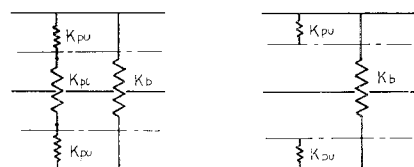
図-3 継手部の応力状態

述べる。

a) TYPE-1

まず図-3 (a) に示すように、2枚の継手板はボルトの初期締付け力によって圧縮ひずみ ϵ_{b0} を受ける。次に T なる引張力が作用すると、図-3 (b) のように継手板はそれぞれ両端からめくり上がり、板の上側(座金に接する側)はさらに圧縮され、一方、板の下側(2枚の板の接する側)では板に与えられていた初期圧縮ひずみが解放される。便宜上この両者の状態の境目を、それぞれの継手板の中立軸位置と仮定すると、引張力 T の作用する前後の状態は、図-4 (a), (b) に示すように、ばねを用いて表わすことができる。図中、 k_{pu} は引張力 T の増加に伴ってさらに圧縮されるばねのばね定数、 k_{pl} は圧縮ひずみを解放するように働くばねのばね定数、さらに k_b はボルトを表わすばねのばね定数を意味している。

図-5 は2枚の継手板の一方だけを表わしたものであり、図中 T_u はボルトの付加軸力であるとともに、板のへこみ量を増加させる力でもある。また T_l は板の圧縮ひずみを解放する力であり、 δ_b はボルトの伸び量、 δ_{pu} は板の中立軸より上側のちぢみ量、さらに δ_{pl} は中立軸より下側の伸び量



(a) 離間前

(b) 離間後

図-4 継手部のモデル化

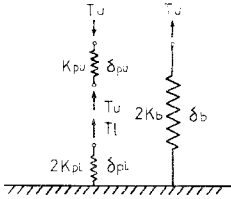


図-5 継手部のモデル化

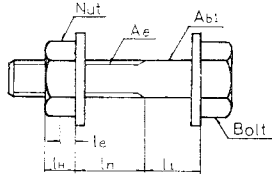


図-6 ボルトとナット

を表わしている。

ボルトのばね定数 k_b は、図-6 に示すように、それぞれねじの切っていない純断面とねじ部の有効断面に対応する2つのばねを直列に継いだものと考えられるので、図中の寸法を用いて次式のように示される。

$$k_b = \frac{E \cdot A_e}{l_l \times \frac{A_e}{A_{b1}} + l_n + l_e} \quad (1)$$

ただし、式中の有効締付け量 l_e は、ナットの厚さ l_H の6割、すなわち、 $l_e = 0.6 l_H$ とする。これはナット内のねじの応力分担からみて、ナット中のボルトの約60%までが弾性挙動をするといわれていることによる¹⁰⁾。また、 E はボルトのヤング係数である。

一方、継手板をばね

に置換する際に必要となる板の有効域は、図-7 に斜線で示すような2つの円筒形に仮定する。すなわち板の中央面より上半分は圧縮ひずみが増加する部分であり、板表面の変位が問題となるので、荷重域内の平均変位と等価な変位を生ぜしめる円筒断面を仮定している。その有効域の半径 r_u および面積 A_u は、式 (2.a) のごとくなる。

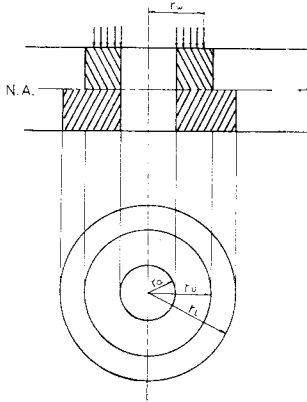


図-7 圧縮有効域

また、板の中央面より下半分は圧縮応力が減少する部分であり、応力が問題となるので、圧縮力の分布域を対象に考えて、その有効域の半径 r_l および面積 A_l は式 (2.b) のごとくに仮定している。これらの式中、 t は継手板の厚さ、 r_a はボルト孔の半径、 r_w は座金の半径である。

$$\begin{cases} r_u = r_w + t/12, A_u = \pi(r_u^2 - r_a^2) & \dots\dots(2.a) \\ r_l = r_w + t/3, A_l = \pi(r_l^2 - r_a^2) & \dots\dots(2.b) \end{cases}$$

継手板を置換したばねのばね定数 k_{pu} 、 k_{pl} は、それぞれ式 (2) に示した有効面積を用いて、

$$k_{pu} = \frac{E \cdot A_u}{t/2 + l_w} \quad (3.a)$$

$$k_{pl} = \frac{E \cdot A_l}{t} \quad (3.b)$$

で与えられる。ただし、ここに l_w は座金の厚さである。

次に、継手板と引張力との関係は、引張力 T が作用してもボルト位置で継手板が離開していない状態、ちょうど離開した状態、および離開した後の状態に分けて考える必要がある。そこで解析は以下に述べるように3つの状態に分けて行った。

① 離開前

図-5 を参照して引張力 T およびボルトの伸び量 δ_b は、それぞれ、

$$T = T_u + T_l \quad (4)$$

$$\delta_b = \delta_{pl} - \delta_{pu} \quad (5)$$

と表わされる。ここで、 $T_u = k_{pu} \cdot \delta_{pu}$ 、 $T_l = 2 k_b \cdot \delta_b$ であることを考え、 $k_{pu} \cdot \delta_{pu} = 2 k_b \cdot \delta_b$ に式 (5) を代入すると、

$$\delta_b = \frac{k_{pu}}{2 k_b + k_{pu}} \cdot \delta_{pl} \quad (6)$$

となる。また、 $T_l = 2 k_{pl} \cdot \delta_{pl}$ であるから、式 (6) を用いて、

$$\begin{aligned} T &= T_u + T_l \\ &= 2 k_b \cdot \delta_b + 2 k_{pl} \cdot \delta_{pl} \\ &= \frac{2 k_b \cdot k_{pu} + 2 k_{pl} (2 k_b + k_{pu})}{2 k_b + k_{pu}} \cdot \delta_{pl} \quad (7) \end{aligned}$$

となる。すなわち、 δ_{pl} は引張力 T を用いて次式のように書かれる。

$$\delta_{pl} = \frac{2 k_b + k_{pu}}{2 k_b \cdot k_{pu} + 2 k_{pl} (2 k_b + k_{pu})} \cdot T \quad (8)$$

一方、ボルトに生ずる軸力 N_B は、ボルトの初期締付け力を N_{B0} として、

$$N_B = N_{B0} + T_u = N_{B0} + 2 k_b \cdot \delta_b \quad (9)$$

で示される。この式 (9) に式 (6) を代入し、得られた式にさらに式 (8) を代入すると、ボルトに生ずる軸力 N_B は、引張力 T を用いて、式 (10) のように表わされる。

$$N_B = N_{B0} + \frac{k_b \cdot k_{pu}}{k_b \cdot k_{pu} + k_{pl} (2 k_b + k_{pu})} \cdot T \quad (10)$$

② 離開時

継手板の初期圧縮量を δ_{p0} とすると、 $\delta_{p0} = \delta_{pl}$ のときが離開であり、そのときには $T_l = N_{B0}$ であるから、

$$\delta_{pl} = \frac{T_l}{2 k_{pl}} = \frac{N_{B0}}{2 k_{pl}} = \delta_{p0} \quad (11)$$

となる。離開時の引張力を T_{sep} 、そのときのボルト軸力を N_{Bsep} とすると、 T_{sep} は式 (7) および式 (11) を用いて式 (12) で、また、 N_{Bsep} は式 (10) に式 (12) を代入して、式 (13) で表わされる。

$$T_{sep} = \frac{k_b \cdot k_{pu} + k_{pl} (2 k_b + k_{pu})}{k_{pl} (2 k_b + k_{pu})} \cdot N_{B0} \quad (12)$$

$$N_{Bsep} = \frac{k_b \cdot k_{pu} + k_{pl}(2k_b + k_{pu})}{k_{pl}(2k_b + k_{pu})} \cdot N_{B0} \dots (13)$$

すなわち、離間時には引張力とボルトに生ずる軸力が等しくなることがわかる。

③ 離間後

離間後は引張力 T の増加分 ΔT がそのままボルトの付加軸力となるため、 $N_B = N_{Bsep} + \Delta T$ となり、 $\Delta T = T - T_{sep}$ であることを考えると、

$$N_B = T \dots (14)$$

となる。

b) TYPE-2, 3

ボルトのばね定数や継手板のばね定数などは、TYPE-1 の場合と同様に評価できるが、TYPE-1 と異なり引張力 T が作用すると、継手板は2本のボルトの間で互いにせり合う。このため、図-8 に示すように、このせり合い部分には継手板にいわゆるてこ反力 R が生じる。したがって、引張力 T がそのままボルト位置近傍に働く TYPE-1 とは異なり、継手板の剛性やてこ反力の作用位置などを考えて、継手全体をモデル化する必要がある。図-9 はこのように考えてモデル化した継手モデルである。図中 R がてこ反力であり、両ボルト間の中央

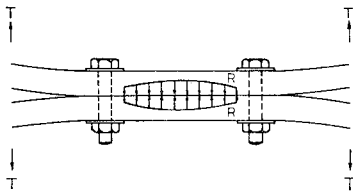
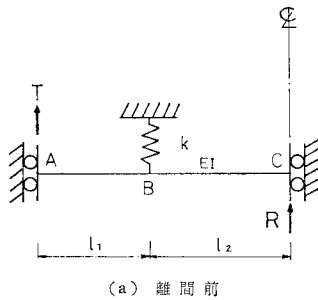
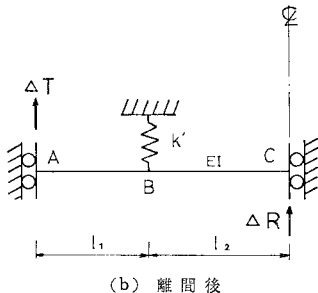


図-8 てこ反力の発生状態



(a) 離間前



(b) 離間後

図-9 供試体のモデル化 (TYPE-2, 3)

に働くものと仮定している。また k および k' は離間前および離間後のボルトと継手板のばねを複合したばね定数であり、次式で与えられる (式 (4)~(7) 参照)。

$$k = \frac{2k_b \cdot k_{pu}}{2k_b + k_{pu}} + 2k_{pl} \dots (15)$$

$$k' = \frac{2k_b \cdot k_{pu}}{2k_b + k_{pu}} \dots (16)$$

解析は TYPE-1 と同様に、ボルト位置で継手板が離間していない状態、離間時の状態、および離間した後の状態の3つに分けて考えた。

① 離間前

ボルトの軸力は式 (10) を参照して、

$$N_B = N_{B0} + \frac{k_b \cdot k_{pu}}{k_b \cdot k_{pu} + k_{pl}(2k_b + k_{pu})} \cdot F \dots (17)$$

で表わされる。ただし、ここに $F = T + R$ である。図-9 (a) において、はりの曲げ剛性を EI 、C 点のたわみを δ_c とすると、てこ反力 R は $\delta_c = 0$ である条件により、

$$R = \frac{3l_1 l_2^2 \cdot k - 6EI}{2l_2^3 \cdot k + 6EI} \cdot T = \mu \cdot T \dots (18)$$

となる。したがって、 $F = T + R = (1 + \mu)T$ より、ボルトに生ずる軸力 N_B は引張力 T を用いて、式 (19) のように表わされる。

$$N_B = N_{B0} + \frac{k_b \cdot k_{pu}}{k_b \cdot k_{pu} + k_{pl}(2k_b + k_{pu})} \cdot (1 + \mu)T \dots (19)$$

② 離間時

TYPE-1 の場合と同様に、 $F_{sep} = (1 + \mu) \cdot T_{sep}$ であることを考えると、離間時の引張力 T_{sep} およびそのときのボルト軸力 N_{Bsep} は、

$$T_{sep} = \frac{k_b \cdot k_{pu} + k_{pl}(2k_b + k_{pu})}{(1 + \mu) \cdot k_{pl} \cdot (2k_b + k_{pu})} \cdot N_{B0} \dots (20)$$

$$N_{Bsep} = \frac{k_b \cdot k_{pu} + k_{pl}(2k_b + k_{pu})}{(1 + \mu) \cdot k_{pl} \cdot (2k_b + k_{pu})} \cdot N_{B0} \dots (21)$$

で与えられる。したがって、離間時には、 T_{sep} と N_{Bsep} は等しい。

③ 離間後

離間後のボルト軸力 N_B は、

$$N_B = N_{Bsep} + \Delta F \dots (22)$$

で示される。ここに、 ΔF は、 $\Delta F = \Delta T + \Delta R$ で表わされる。てこ反力の増分 ΔR は、図-9 (b) において $\delta_c = 0$ である条件より、

$$\Delta R = \frac{3l_1 l_2^2 \cdot k' - 6EI}{2l_2^3 \cdot k' + 6EI} \cdot \Delta T = \mu' \Delta T \dots (23)$$

となる。したがって、ボルト軸力 N_B は、

$$N_B = N_{Bsep} + (1 + \mu') \cdot \Delta T \dots (24)$$

となる。

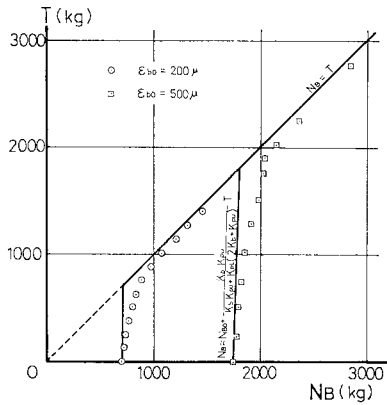


図-10 予備実験結果 (TYPE-1)

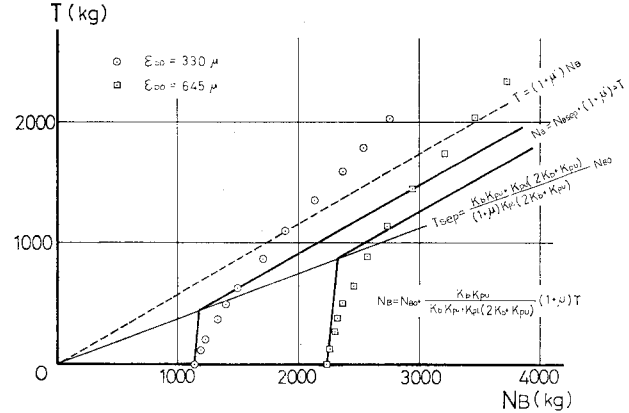


図-11 予備実験結果 (TYPE-2)

(4) 実験結果と従来の解析法に基づく解析結果との比較

a) TYPE-1

TYPE-1 に対する実験結果と解析結果の一例を図-10 に示す。図中、点は実験結果を、また実線は解析結果を示す。この図より、実験結果と解析結果は非常に一致しており、単純引張状態を表わす TYPE-1 に対してはこの解析法が妥当であることがわかる。

b) TYPE-2, 3

TYPE-2, 3 に対する実験結果と解析結果の一例を図-11 および 図-12 に示す。これらの図をみると、解析結果は実験結果をあまりよく説明していない。TYPE-1 の場合をあわせ考えると、この原因はおもにて反力の評価方法にあると考えられる。セグメント継手の挙動を考えるにあたって、このてこ反力評価の問題は避けて通ることのできない問題であるため、次の項ではこの TYPE-2, 3 について、特にてこ反力の評価を中心に解析モデルの修正を行う。

(5) 修正した解析モデル

解析モデルの修正にあたっては次の2点に留意した。まず上述のモデルでは、広がりのある圧縮有効域を1本のばね(図-9 (a), (b) 中の k および k') に置き換えたため、引張力が離間荷重に達したときには、全圧縮域が同時に離間することになる。これは引張力の増加に伴い、圧縮域が順次解放されていくと考えられる現実とはかなり異なると思われる。そこでボルトおよび継手板を評価するばねを細分して、圧縮有効域が徐々に解放されるようなモデルを考える必要がある。

次に前述のモデルにおいて、てこ反力は集中力として与えているが、実際には継手板どうしがせり合う部分に作用する分布力と考えられる。しかしながら、この分布を明らかにすることは非常に困難であり、適切な変形条

件が得られたとしてもこれを解析的に求めることには無理があると思われる。そこで継手板どうしがせり合う部分に数個の支点を仮想し、その支点反力の合計がてこ反力となるよ

うなモデルを考えることとした。

以上の検討の結果、TYPE-2, 3 に対する解析モデルを以下のように仮定した。

- ① 継手板を軸線で評価する骨組部材に置換する。
- ② 継手板はボルトの初期締付けによって、ボルト近傍で一樣な圧縮変形を生ずる。

この圧縮有効域の半径および面積は、式(25)のごとくに仮定する(図-13)。

$$\left. \begin{aligned} r_e &= r_w + t/6 \\ A &= \pi(r_e^2 - r_a^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (25)$$

ここに、 r_e は有効域の半径、 r_w は座金の半径、 t は継手板の厚さ、 A は有効域の面積、 r_a はボルト孔の半径である(このモデル化では、継手板の中立軸をはさんだ上下の圧縮有効域を等しくとっている)。

- ③ 継手板を評価するばねは、初期圧縮ひずみを解放するばねのみを考える。したがって、そのばね定数 k_p は、式(25)中の圧縮有効域の面積 A を用いて、

$$k_p = \frac{E \cdot A}{t/2} = \frac{2EA}{t} \dots\dots\dots (26)$$

で与えられる。次に圧縮有効域を図-14 に示すように分割し、その分割面積 A_i に比例するばね定数 k_{pi} をも

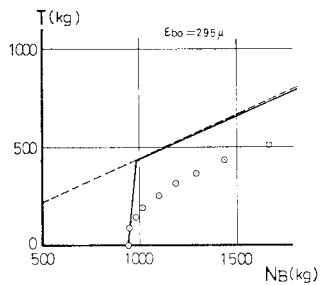


図-12 予備実験結果 (TYPE-3)

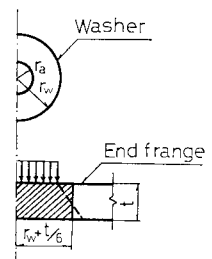


図-13 初期締付け力による圧縮有効域

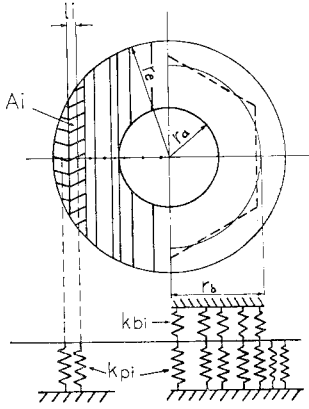


図-14 継手板とボルトのばね

つばねを、分割部分の図心に配置する。すなわち、ばね定数 k_{pi} は、

$$k_{pi} = k_p \times \frac{A_i}{A} \quad (\sum k_{pi} = k_p) \quad \dots\dots\dots (27)$$

④ ボルトを評価するばねのばね定数 k_b は、図-6を参照して、式(1)中の A_e を $A_e = A_{bi}$ とした次式で与える。

$$k_b = \frac{E \cdot A_e}{l_1 + l_n + l_e} \quad \dots\dots\dots (28)$$

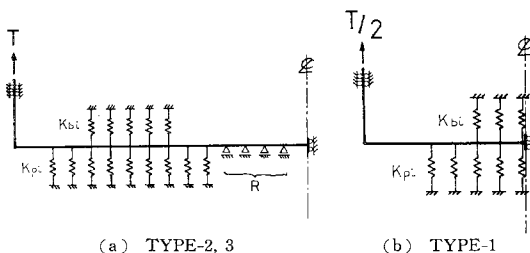
さらにこのばねは、ボルトヘッドの面積と等価な面積をもつ円の直径 $2r_b$ 内で、上に述べた継手板の圧縮ひずみの解放を評価するばねが配置される位置に分割して設けることとする。その分割したばねのばね定数は、 $2r_b$ 内に存在する継手板を評価するばねの個数に等分割した k_{bi} を用いる(図-14を参照)。

⑤ てこ反力は図-15に R で示すように支点反力の総和で評価する。

⑥ 骨組部材は、曲げ剛性、軸剛性およびせん断剛性を考慮する。

⑦ 変形は弾性的微小変形とする。

解析にはマトリックス法を用いる。解析は図-15(a)に示すようなモデルにおいて、作用荷重 $T=0$ から始めて、 $4T$ ずつ荷重を増加させていき、ボルトの初期締め付けによる継手板の圧縮変位が解放されるごとに、その分割区間で圧縮ひずみの解放を評価するばねを取り除く。



(a) TYPE-2, 3 (b) TYPE-1

図-15 供試体のモデル化

そして、このばねが取り除かれていく各段階ごとに、変形が継手板どうしのせり合いを生ずる方向に向かう節点はこれを支点とみなし、支点となる節点の位置が収束するまで繰り返し計算を行う。

ボルトに生ずる軸力 N_B は、ボルトを評価する各ばねに生ずる内力の総和で与えられる。なお、TYPE-1についてもこの解析モデルの適用性を検討した。図-15(b)はそのモデルを示す。

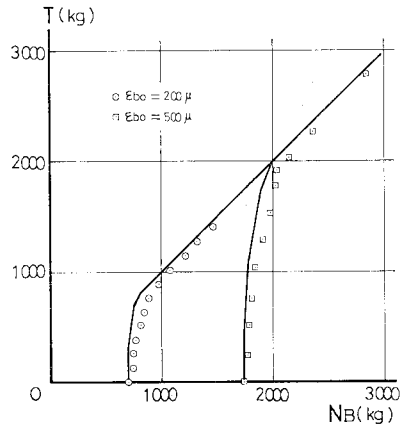


図-16 予備実験結果と解析結果 (TYPE-1)

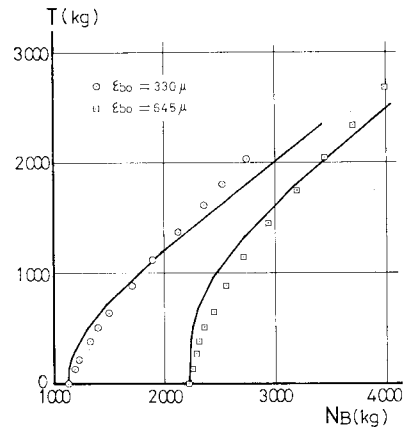


図-17 予備実験結果と解析結果 (TYPE-2)

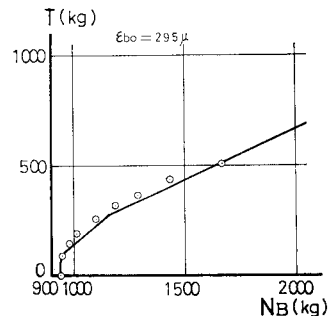


図-18 予備実験結果と解析結果 (TYPE-3)

(6) 実験結果と修正したモデルによる解析結果との比較

図-16~18 は、それぞれ TYPE-1~3 の実験結果(図中、点で示す)と解析結果(図中、実線で示す)を示したものであり、この修正したモデルが実験結果をよく説明していることがわかる。

3. 鋼製セグメントの継手の挙動^{11),12)}

(1) 模型セグメントの継手試験

a) 模型セグメントの形状寸法

鋼製模型セグメントの形状は図-19 に示すとおりで、表-1 に掲げた5ケースの寸法を用いた。表中 No. 1~No. 4 は正の曲げ用に、また、No. 5 は負の曲げ用に製作したものである。セグメントの材質は一般構造用鋼材 SS-41 である。

b) 継手試験方法

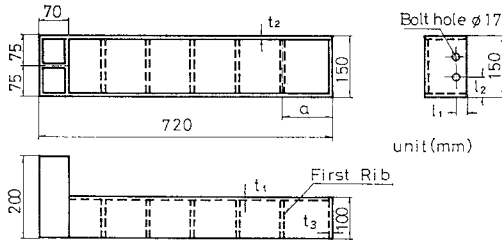





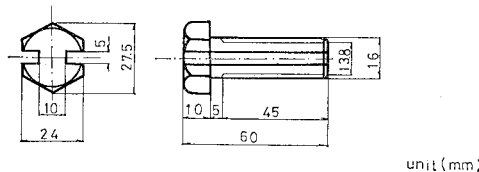


図-19 継手試験用鋼製模型セグメント

表-1 継手試験用鋼製模型セグメントの断面寸法

No.	a	t ₁	t ₂	t ₃	l ₁	l ₂	Type of test
1	100	3.2	6.0	6.0	25	36	()
2	100	3.2	6.0	6.0	25	36	()
3	200	3.2	6.0	6.0	25	36	()
4	200	6.0	6.0	6.0	25	36	()
5	150	3.2	6.0	6.0	35	36	()

unit (mm)



unit (mm)

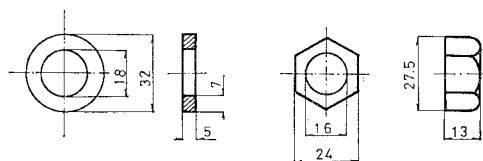


図-20 高力ボルト、ナットおよび平座金

継手試験は 図-20 に示すひずみ測定用の溝を切った高力ボルト M16・F11T を用いて鋼製模型セグメントを接合し、図-21 に示す偏心軸圧縮力 P を作用させて、継手直下のたわみ δ_V 、継手部の回転角 θ 、およびボルトに生ずるひずみ ϵ_b などを測定した。なおボルトの初期締付けひずみ ϵ_{b0} は 600 μ 、800 μ 、1000 μ の3通りとし、軸圧縮荷重の偏心量 e は 5cm、6cm、7cm の3通りを行った。これらの値はほぼ実用上の締付けひずみおよび偏心量を示している。

c) 継手の解析モデル

前節で述べた予備実験および継手試験の結果をもととして、継手部を以下のようにモデル化した。

① 継手板は継手ボルトの締付けによって、ボルト近傍で一様な圧縮変形を生ずる。この圧縮有効域の半径および面積は、式(25)のごとく仮定する。

② 継手板、主桁およびスキンプレーートを 図-22 に示す立体ラーメンに評価する。継手板の有効幅 b_1 は式(25)に示す $2r_e$ を、また主桁の有効幅 b_2 は同図中に示す A/a を(ただし、ここに A は継手板から第1縦リブまでの主桁斜線部の面積であり、 a はその距離である)注1)、さらにスキンプレーートの有効幅 b_3 はスキンプ

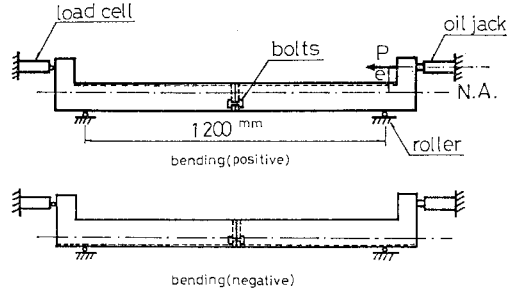


図-21 継手試験概要

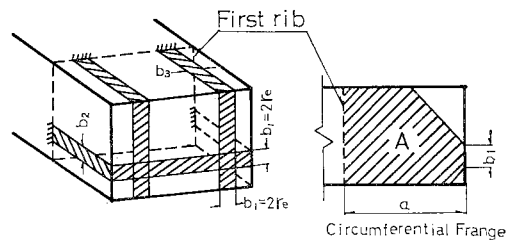


図-22 立体ラーメンとその有効幅

注1) 実験結果(主桁の応力分布や変形状態)によれば、継手部のモデル化にあたっては主桁を考慮する必要性が認められた。継手板の有効幅内から主桁への応力の伝播は、図-22 のように考えられ、その影響は第1縦リブまでと観測された。この結果、モデル化にあたって主桁は変断面のはり部材とも考えられるが、水平ラーメンの変形状態などを考えると、これを面積的に等価な一樣断面のはり部材としても大差がないと考えられる。そこで計算の単純化も考え合わせて、この有効幅を、 $b_2=A/a$ とした。

レート幅の半分を注2)仮定する。

③ 継手部の力のつり合いを 図-23 のように仮定する。図中 P は偏心軸荷重、 C は曲げによって生ずる圧縮応力の総計、 T はボルト位置に生ずる内力の総計であり、また、 e はセグメント主桁の中立軸からの偏心量、 y_0 は中立軸からセグメント外縁までの距離、 d はボルト中心よりセグメント外縁までの距離である。

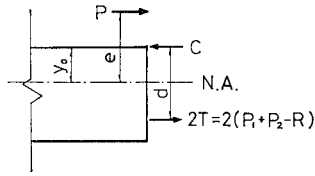


図-23 力のつり合い

図-24 はセグメント継手部の変形状態を考えて、力のつり合いを模式的に表わしたものであって、図中 $2H$ は曲げによって生じる引張応力の総計であり、 P_1 、 P_2 はそれぞれ水平方向と垂直方向のラーメンの剛性に対応した応力、また $2R$ は継手板どうしがせり合うために生ずるいわゆるてこ反力の総計である。また継手試験の結果から継手の影響範囲がほぼ第1縦リブまでであったため、ラーメンの脚の長さをセグメント先端から第1縦リブまでの距離とした。

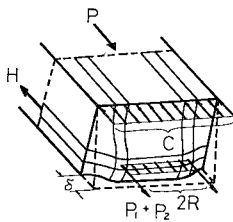


図-24 力のつり合い状態の模式図

④ ボルトの初期締付けによる圧縮ひずみの解放に寄与する継手板の剛性と、ボルト本体の剛性を 図-25 に示すような水平骨組に働く A および B のばね群に評価する。これらのばねの取扱いは、前節で述べたモデルとまったく同様である。

⑤ てこ反力が発生する部分には 図-25 に示すような支点を配して、支点反力の総和をてこ反力 R とみなし、継手板どうしのせり合いを評価するものとする。

⑥ 骨組部材は、曲げ剛性、軸剛性、およびせん断剛性を考慮する。

⑦ 変形は弾性的微小変形とする。

なお、継手の変形状態を考えると、正の曲げを受ける場合と負の曲げを受ける場合のモデルの違いは、図-27 に示すように垂直方向ラーメンにおける境界条件だけである。また、同図の垂直方向ラーメン中の水平メンバーは、スキンプレートを表わしている。

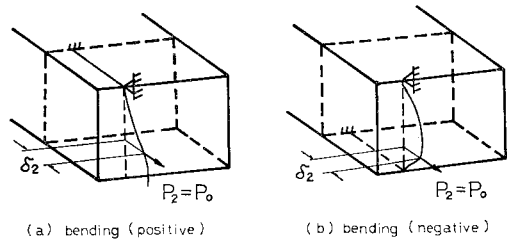


図-27 垂直方向ラーメン

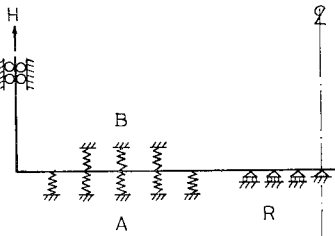


図-25 水平方向ラーメン (変形前)

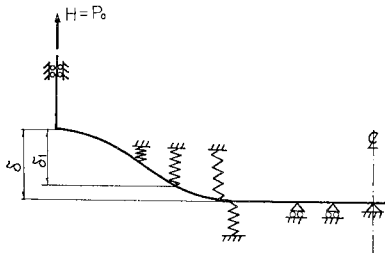


図-26 水平方向ラーメン (変形後)

d) 解析方法およびその手順

解析は 図-25 に示す骨組構造に対してマトリックス法を用いた。計算は、同図において作用荷重 $H=0$ から始めて ΔH ずつ荷重を漸増させていき、ボルトの初期締付けによる継手板の圧縮変位が解放されるごとに、その分割区間で圧縮ひずみの解放を評価するばねを取り除く。また同時に、変形が継手板どうしのせり合いが生ずる方向へ向かう節点は、これを支点とみなし、支点となる位置が確定するまで収束計算を繰り返す。そして各段階ごとに 図-26 に示す変位 θ およびボルトを評価するばねに発生する内力の総和 N_B を計算する。

図-25 および 図-26 に示した水平ラーメンに作用する荷重 H は、前節で述べた引張型ボルト接合の実験とは異なり、継手試験荷重すなわち 図-21 中の偏心軸圧縮荷重 P とは等しくない。そこで実験結果と解析結果とを比較するためには、水平ラーメンに作用する荷重 H とセグメントに作用する偏心軸圧縮荷重 P との関係性を明らかにする必要がある。いま、図-23 に示した力のつり合いから偏心軸圧縮荷重 P と、ボルトの存在する水平位置に働く力の総和 $2T$ とは、次式で結びつけられる。

$$P(e - y_0) = 2T \cdot d = 2(P_1 + P_2 - R) \cdot d \dots\dots (29)$$

注 2) 実験結果(スキンプレートの応力分布や変形状態)によれば、主桁と同様にスキンプレートも考慮する必要性が認められた。そこでスキンプレートの有効断面は、スキンプレートが薄いものであることを考えて全断面とし、その有効幅 b_0 はボルト1本分にあたる $B/2$ とした(計算結果によれば、この有効幅の取り方は、継手の変形挙動全体にはほとんど影響はなかった)。

ここに、 P_1 は水平ラーメンにおいてボルト周辺に働く内力、 P_2 は垂直ラーメンのボルト位置に働く内力、 R はてこ反力である。図-26 に示す水平ラーメンの変位 δ_1 は、この系の荷重 H に対するたわみ性を f_1 とすれば、

$$\delta_1 = f_1 \cdot H \dots\dots\dots (30)$$

と表わされる。また、図-27 に示す垂直ラーメンの変位 δ_2 は、この系の荷重 P_2 に対するたわみ性を f_2 とすれば、

$$\delta_2 = f_2 \cdot P_2 \dots\dots\dots (31)$$

と表わされる。次に式 (30) と式 (31) で表わされる変位の比を α とすると、

$$\alpha = \frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{f_1 \cdot H}{f_2 \cdot P_2} \dots\dots\dots (32)$$

となる。ここで水平ラーメンに作用する荷重 H と垂直ラーメンに作用する荷重 P_2 を等しくおくと、 α は式 (32) となり、この2つのラーメンのたわみ性の比率を表わす。

$$\alpha = \frac{f_1}{f_2} \dots\dots\dots (33)$$

一方、逆にこの2つのラーメンに作用する荷重 H と P_2 との比を β とすると、

$$\beta = \frac{P_2}{H} = \frac{\delta_2 / f_2}{\delta_1 / f_1} = \frac{f_1 \cdot \delta_2}{f_2 \cdot \delta_1} \dots\dots\dots (34)$$

となる。ここでこの2つのラーメンに生ずる変位 δ_1 と δ_2 とを等しくおくと、 β は式 (34) に示すように、この2つのラーメンのたわみ性の比率を表わすことになる。

$$\beta = \frac{f_1}{f_2} \dots\dots\dots (35)$$

すなわち前者の状態における変位の比率 α と後者の状態における荷重の比率 β は等しく、ともにこの2つのラーメンのたわみ性の比率となっていることがわかる。

水平ラーメンと垂直ラーメンとは、もともと継手板、主桁およびスキンプレートをモデル化したものであるから、この2つのラーメンに生じる変位 δ_1 と δ_2 とは等しい。したがって、これは後者の状態を意味している。垂直ラーメンの作用荷重 P_2 は、式 (34) より、

$$P_2 = \beta \cdot H \dots\dots\dots (36)$$

と書けるが、この式 (36) 中の β は、これを直接求める代わりに、前者の状態、すなわち2つのラーメンに $P_2 = H = P_0$ なる荷重を作用させ、そのとき生じたそれぞれの変位 δ_1 、 δ_2 からその比率 α を求めることによって得られる。いまこのようにして α を求めたとすれば、式 (36) はこの α を使って、

$$P_2 = \alpha \cdot H \dots\dots\dots (37)$$

と書くことができる。

次にてこ反力の総計を R 、水平ラーメンのボルト位置近傍に働く力の総計を P_1 とすると、水平ラーメンに作

用する荷重 H は、 $H = P_1 - R$ であるから、式 (37) を使って、次の式 (38) なる関係が得られる。

$$\begin{aligned} T &= P_1 + P_2 - R \\ &= P_1 + \alpha \cdot H - R \\ &= H + \alpha \cdot H \\ &= (1 + \alpha) H \dots\dots\dots (38) \end{aligned}$$

この式 (38) を初めの力のつり合い式 (29) に代入すると、セグメントに作用する偏心軸圧縮荷重 P と、モデル化した水平ラーメンに作用する荷重 H とは、次式で結びつけることができる。すなわち、

$$H = \frac{(e - y_0)}{2d(1 + \alpha)} \cdot P \dots\dots\dots (39)$$

である。なおこの α は、圧縮ひずみの解放を評価するばねを取り除くことによる構造系の変化に伴って変わるため、その各段階ごとに計算を行う必要がある。

e) 試験結果と解析結果との比較およびその考察

試験結果および解析結果は、セグメント継手部分の設計に対する適用を考慮して、ボルトに生ずる軸力 N_B および継手部回転角 θ に着目して整理した。解析値のうちボルトに生ずる軸力 N_B は、ボルトを評価するばねに生ずる力の総和として求め、また回転角 θ は式 (40) より求めた。

$$\theta = \frac{2\delta}{d} \dots\dots\dots (40)$$

ここに δ は、図-26 に示す水平ラーメンにおける、セグメント中心位置と主桁端部との相対変位量であり、 d は図-23 に示すようにボルト中心からセグメント外縁までの距離である。

このようにして得られた解析結果と、継手試験結果を図-28 から図-33 に示す。図中点は実測値を、また実線は本解析モデルによる理論値を示す。図-28、29 は作用曲げモーメント M とボルト軸力 N_B の関係を示した一例であり、特に図-30 はその関係をセグメントの

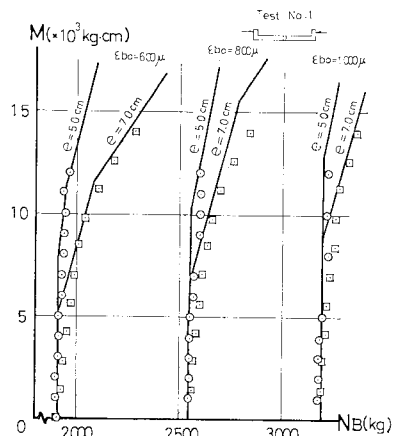


図-28 曲げモーメントとボルト軸力 (正の曲げ)

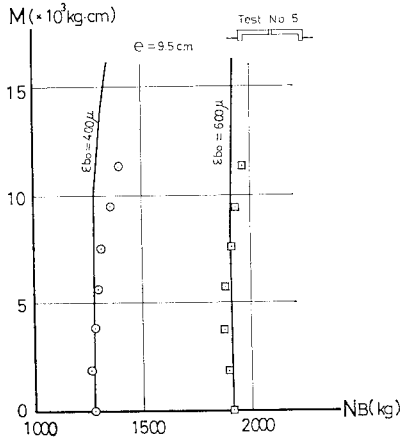


図-29 曲げモーメントとボルト軸力（負の曲げ）

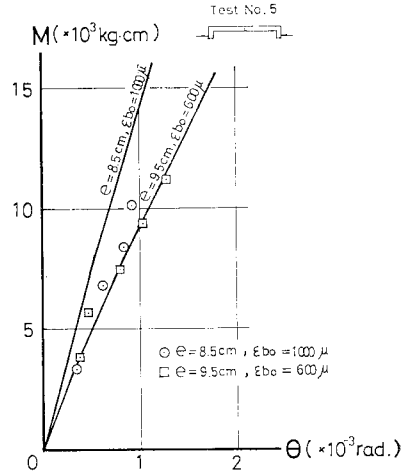


図-32 曲げモーメントと継手回転角（負の曲げ）

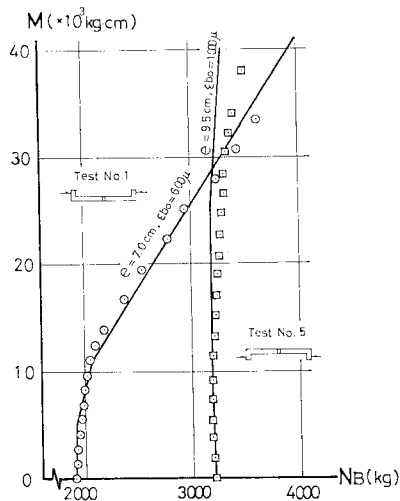


図-30 曲げモーメントとボルト軸力（破壊試験）

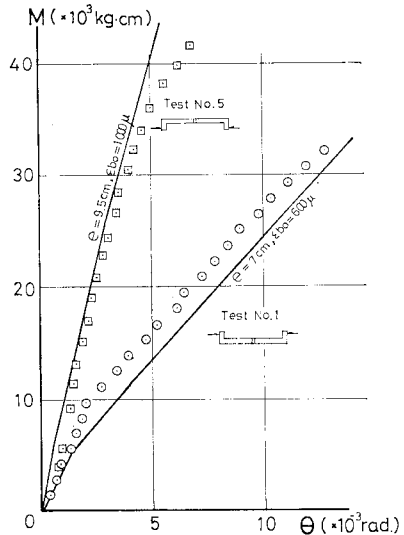


図-33 曲げモーメントと継手回転角（破壊試験）

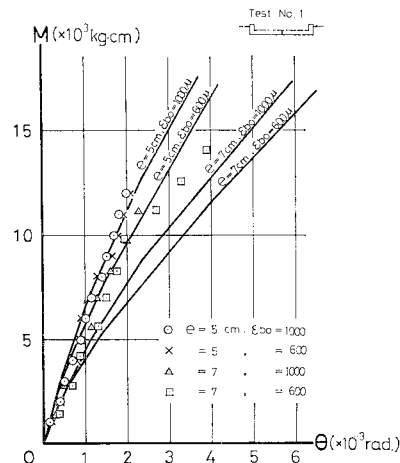


図-31 曲げモーメントと継手回転角（正の曲げ）

破壊まで追ったものである。また 図-31, 32 は継手部に作用した曲げモーメント M と継手回転角 θ の関係を示した一例であり、特に 図-33 は同様にその関係を破壊まで追ったものである。これらの図より本解析モデルが継手の挙動をよく表わしていることがわかる。これによりボルトに働く張力 N_B および $M=k_\theta \cdot \theta$ で表わせるところの回転ばね定数 k_θ を解析的に求めることが可能となる。

(2) 実物セグメントの継手試験

a) 実物セグメントの形状寸法

実物セグメントは都営地下鉄6号線白山工区のパイロットトンネルに用いられたもので、外径 $D_0=2600$ mm である。その形状寸法は 図-34 中に示すとおりである。

表-3 コンクリート示方配合

Max size of coarse aggregate (mm)	Range of slump (cm)	Range of air content (%)	Water cement ratio (%)	Sand Percentage (%)	Unit weight (kg/m ³)			
					Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate
15	7.5±1	2.5	50.2	50.3	188	375	913	905

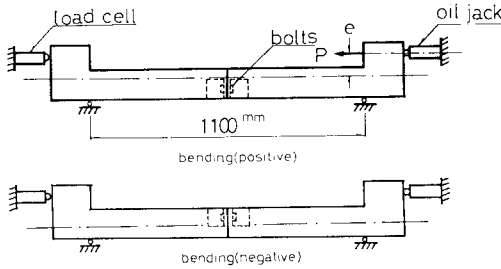


図-38 継手試験概要

b) 継手試験方法

継手試験は、セグメントを 図-20 に示したと同じ高力ボルト M16・F11 T を用いて接合し、 図-38 に示す偏心軸圧縮力 P を作用させて、継手部直下のたわみ δ_V 、継手部の回転角 θ 、およびボルトに生ずるひずみ ϵ_b などを測定した。なおボルトの初期締付けひずみ ϵ_{b0} は 600 μ とし、正の曲げを受けるもの 6 組 (Test No. 1~6)、負の曲げを受けるもの 2 組 (Test No. 7, 8) の計 8 組の継手試験を行った。

c) 継手の解析モデル

実験結果から判断すると、継手部の変形はそのほとんどが継手板自身の変形によって生じており、継手面でのせり合いは生じないようである。したがって、継手部の変形挙動を論じるにあたっては、継手板だけを取り出して考えてもよいと思われる。このことは、2. で述べた予備実験のモデルのうち、てこ反力を考えない単純引張り状態のモデルがそのまま適用できることを意味している。このことを念頭において、継手を次のようにモデル化した。

① 継手板は継手ボルトの締付けによって、ボルト近傍で圧縮変形を生ずる。その圧縮有効域の半径および面積は、 図-7 を参照して、2. で述べたように、式 (2) で表わされるものとする。

② 継手板はその側板がアンカー筋によって完全に固定されているものとする。

③ 継手板を 図-39 および 図-40 (a), (b) に示すはり部材に置換する。正の曲げに対しては、継手板は全部引張領域に入っているので、水平方向のはりだけを考え (図-40 (a))、負の曲げに対しては、継手板の下端は圧縮縁であるので、鉛直方向にもはりを考えることにした (図-40 (b))。このはりの有効幅 b は、ボルトの初期締付け力の圧縮有効域を考慮して、

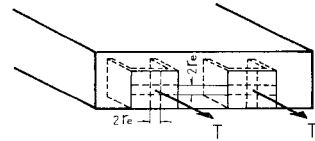


図-39 モデル化されたはり部材とその有効幅

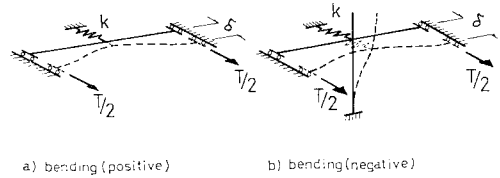


図-40 モデル化されたはり部材

$$b = 2r_e = 2 \left(r_w + \frac{t}{12} \right) \dots\dots\dots (41)$$

で与える。ここに、 r_w は座金の半径、 t は継手板の厚さである。また、このはりの曲げに対する剛性 D は、継手板が板であることを考慮して、

$$D = \frac{b \cdot t^3}{12(1-\nu^2)} \cdot E \dots\dots\dots (42)$$

とした。式中 ν はポアソン比であり、 E はヤング係数である。

④ 継手板およびボルトの剛性はばねに置換する。その要領は、2. (3) a) で述べたとおりである。ばねは 図-40 (a), (b) に示すボルト中心位置にまとめて配置する。なお同図中 k および k' は接合されているセグメントがボルト中心位置で離間する前および後におけるばね定数であって、それぞれ式 (15) および式 (16) で与えられるものとする。

⑤ 継手部の力のつり合いを 図-41 のように仮定する。

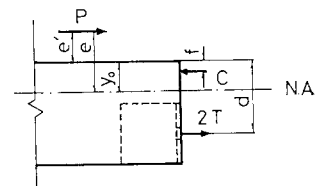


図-41 力のつり合い

図中 P は偏心軸圧縮荷重、 C は圧縮応力の合力、 T はボルト位置に生ずるボルト 1 本当りの引張力であり、 e はセグメント中立軸からの偏心量、 y_0 は中立軸からセグメント外縁までの距離、 d はボルト中心からセグメント外縁までの距離である。

⑥ 鋼製セグメントの場合に考えたようなてこ反力は生じないと仮定する。

⑦ 変形は弾性的微小変形とする。

d) 試験結果と解析結果との比較およびその考察

試験結果および解析結果は、セグメント継手部の設計に対する適用を考慮して、ボルトに生ずる軸力 N_B および継手部回転角 θ に着目して整理した。解析値 N_B および θ は以下のようにして求めた。

圧縮応力の分布状態は必ずしも明確ではないが、試験

結果から判断すれば近似的には鉄筋コンクリート理論で用いられている圧縮応力分布を用いてもよさそうである。そこで図-41中の f を $f=1/3 \cdot y_0$ とした。その結果、同図中の力のつり合いから、ボルトに作用する引

張力 N_B は、

$$N_B = T = \frac{e' + f}{2(d - f)} \cdot P \dots \dots \dots (43)$$

となる。一方、回転角 θ は図-40 (a), (b) に示すモデルのボルト位置における変位 δ を用いて、図-41を参照すると、

$$\theta = 2\delta / (d - y_0) \dots \dots \dots (44)$$

より求められる。このようにして求められた解析結果および試験結果は、図-42 から 図-44 に示す。図-42, 43 は作用曲げモーメント M とボルトの軸力 N_B の関係を示した一例であり、図-44 は作用曲げモーメント M と継手の回転角 θ の関係を示した一例である。図中点は実測値をまた実線は本解析モデルより得られた理論値を表わしている。これらの図より、本解析モデルが継手の挙動をほぼ説明していると考えてよいことがわかる。したがって、これらの解析モデルを用いることによって、ボルトに生ずる張力 N_B および $M = k_\theta \cdot \theta$ で示されるところの回転ばね定数 k_θ を解析的に求めることが可能となる。

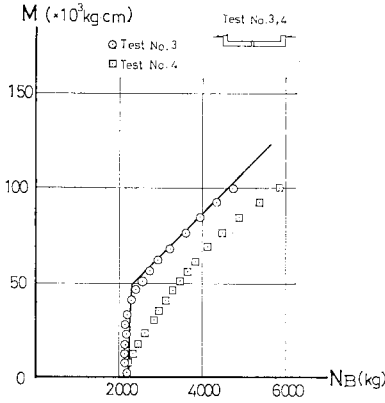


図-42 曲げモーメントとボルト軸力(正の曲げ)

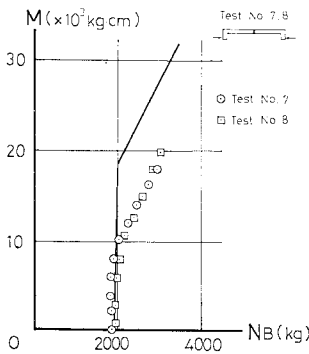


図-43 曲げモーメントとボルト軸力(負の曲げ)

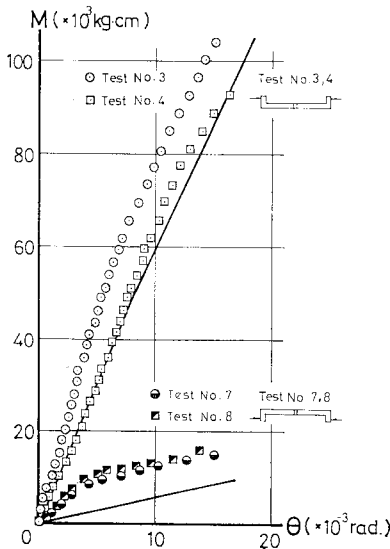


図-44 曲げモーメントと継手回転角

(2) 実物セグメントの継手試験¹⁴⁾

a) 実物セグメントの形状寸法

実物セグメントは、電電公社で実用されたものであり、外径 $D_0=4700$ mm である。その形状寸法は図-45中に示すとおりである。

b) 継手試験方法

継手試験は図-45中に示すセグメントを M 22・4 T のボルトで接合し、同図中に示すように正の純曲げを作用させて、継手部直下のたわみ δ_v 、および継手部の回転角 θ などを測定した。

c) 試験結果と解析結果との比較およびその考察

試験結果と解析結果は、セグメント継手部の設計に対

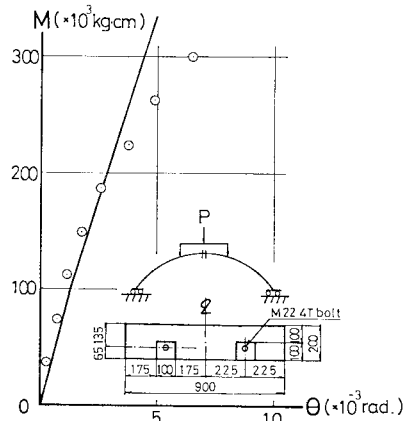


図-45 曲げモーメントと継手回転角(実物セグメント継手試験, 正の曲げ)

する適用を考慮して、継手部の回転角 θ に着目して整理した。解析モデルおよび解析方法は、(1)で述べた模型セグメントの場合とまったく同様である。図-45はその結果であり、図中点線は実測値をまた実線は本解析モデルによる理論値を表わしている。この図より、本解析モデルが、実物セグメントに対しても実用上ほぼ満足できる程度に継手の挙動を評価し得ることがわかる。

5. あとがき

以上により、鋼製セグメントおよびコンクリート平板型セグメントについて、その継手挙動をほぼ説明できる解析モデルが得られた。この結果、所定の回転ばねをもつセグメント継手の設計が可能となり、先に示したセグメントリングの耐荷機構に関する報告¹⁾とあわせて、周辺地山に適応したセグメントの主桁断面ならびにその継手部の一連の設計法が明らかになったと思われる。特にセグメント継手に対しては、その設計法が確立しておらず、この解析法は多少煩雑であるという欠点があるにしても、セグメントが製作された後に継手試験を行って安全性を確認している現状と比べれば一歩進んだ方法と思われる。なお、鋼製セグメントの場合において、ボルトを上下2段に配置するケースや3本以上のボルトを一列に配置するケースが考えられるが、前者では、片側のボルトに引張りが生ずれば、反対側のボルトは圧縮域内にあるか、または非常に小さな引張りを生ずるにとどまる。また、後者では最外縁のボルトが引張りを主導的に受け持ち、内部のボルトはほとんど遊んでいることも観測されるとおりである。継手の回転変形はおもに、主桁と継手板の引張側最外縁のボルト周辺部との相対移動により生じていると考えられ、一方、また、継手部の力のつり合いを考える場合にも、主桁および継手板の圧縮縁での圧縮応力、引張側最外縁のボルト周辺部の引張応力、ならびにてこ反力が主たる関与する力であることが観測される。したがって、本報告では、圧縮側とみなされるボルトは、モデル化にあたって考慮していない。しかしながら、もし上下2段配列の圧縮側のボルトや、一列に配置する場合の内側のボルトを考慮しなければならぬような特別な場合には、この報告に示したようなばねモデルと有効幅を考えた水平および垂直ラーメンを適宜組合わせたモデルを考えればよく、この場合、圧縮力を受けるボルトは初期締付け力を解放するように働くばねに、また、ボルト周辺の板はさらに圧縮変形が増加し

ていくばねに評価できよう。また力のつり合いも、力の作用位置が明らかであるから、本報告の計算方法（ボルト周辺に働く力の総計など）を用いて明らかにできよう。

現在、コンクリート製中子型セグメントおよび曲がりボルトを用いたコンクリートセグメントについても実験中であり、適当な解析モデルを考え、それらのセグメント継手の設計方法を検討していきたいと考えている。

最後にこの報告をまとめるにあたって、お手伝いいただいた当研究室の院生諸君、とりわけ岡村君、大塚君に深く感謝する次第です。

なお以上の数値計算は東京大学大型計算機センター、HITAC-8800 によった。

参 考 文 献

- 1) 村上・小泉：シールドセグメントリングの耐荷機構について、土木学会論文報告集，No. 272, 1978.4.
- 2) 加藤 勉・田中淳夫：高力ボルト引張接合に関する研究（その1，ボルト初張力の影響），日本建築学会論文報告集，No. 146, 1968.4.
- 3) 加藤 勉・田中淳夫：高力ボルト引張接合に関する実験的研究（その2，単純引張力を受ける接合部の性状），日本建築学会論文報告集，No. 147, 1968.5.
- 4) 藤本盛久・橋本篤秀：高力ボルト引張り接合に関する研究，第1部 板のバネ常数設定のための軸対称三次元弾性理論解析（その1），日本建築学会論文報告集，No. 164, 1969.11.
- 5) 藤本盛久・橋本篤秀：高力ボルト引張り接合に関する研究，第1部 板のバネ常数設定のための軸対称三次元弾性理論解析（その2），日本建築学会論文報告集，No. 165, 1969.12.
- 6) 藤本盛久・橋本篤秀：高力ボルト引張り接合に関する研究，第2部 Split-Tee型引張り接合の解析（その1），日本建築学会論文報告集，No. 190, 1971.12.
- 7) 藤本盛久・橋本篤秀：高力ボルト引張り接合に関する研究，第2部 Split-Tee型引張り接合の解析（その2），日本建築学会論文報告集，No. 191, 1972.1.
- 8) 日本鋼構造協会・接合小委員会・引張ボルト接合班：高力ボルト引張接合について，JSSC, Vol. 3, No. 24, 1967.
- 9) 加藤 勉：高力ボルト引張接合部の設計式（スプリットT接合），JSSC, Vol. 5, No. 46, 1969.
- 10) ねじの強さに関する講習会テキスト，ねじ技術研究会，1966.11.
- 11) 村上・小泉・岡村：セグメント継手の挙動について，第31回土木学会年次学術講演会，III-201, 1976.
- 12) 村上・小泉・岡村・大塚：セグメント継手の合理的な設計法に関する研究（1），早稲田大学理工学研究所報告，第82輯，1978.
- 13) 村上・小泉・大塚：セグメント継手の挙動について，第32回土木学会年次学術講演会，III-230, 1977.
- 14) 日本電信電話公社：コンクリートセグメント強度試験報告（未公表），1975.4.

(1978.8.19・受付)