

吊橋主塔現場水平継手の応力・変形挙動に 関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON BOLTED JOINT OF SUSPENSION BRIDGE TOWER SHAFT

下川浩資*・辻 松雄**・奥川淳志***・植村俊郎****
By Hirotsuke SHIMOKAWA, Matsuo TSUJI, Atsushi OKUKAWA
and Shunro UEMURA

1. ま え が き

本四連絡橋における吊橋主塔の現場水平継手は、圧縮力の 50% を高力ボルト摩擦接合、残り 50% を母材のメタルタッチにより直接伝達、するものとして設計している。

この設計方法や、長大吊橋が要求する品質を反映して、製作基準¹⁾や特記仕様書等で最小限必要とする事項を精度基準として示している。その中で、塔柱ブロック端面の平面性に関連するものを表-1 に示す。タッチ率は継手部の設計方法に対応させた規定である。メタルタッチした 50% 部分を、完全な面タッチ状態に製作・架設することは不可能なので、メタルタッチの定義（以下タッチ判定すきまという）を定めている。最大すきまは、メタルタッチしていない部分の許容すきまを規定したものである。タッチ判定すきま、最大すきまおよび表面粗さは、端面の局部的な凹凸を制限したものであるが、端面直角度は端面全体の平面性と塔柱ブロックの鉛直性を規定したものと解釈される。

表-1 メタルタッチの要求精度 (因島大橋)²⁾

メタルタッチ率	50% 以上
メタルタッチの定義	0.04 mm 厚スキマゲージが停止すること
最大すきま	0.2 mm
表面粗さ	12 s 以下
端面直角度	20° 以下

* 正会員 本州四国連絡橋公団常任参与

** 正会員 工修 日本鋼管(株)技術研究所第5研究部耐風構造研究室室長

*** 正会員 工博 本州四国連絡橋公団設計部設計第一課課長代理

**** 正会員 工修 日本鋼管(株)鋼構造営業部技術室主任部員

これらの基準値は、単に精度としての意味だけでなく、塔柱の強度に影響する力学パラメーターとして重要な意味を有するものと考えられる。

第1に、継手部の設計で前提とするタッチ状態と、実塔でのタッチ状態が異なるため、実塔における継手部の力学性状は設計計算で得られるものと一致しない。すなわち、設計の考え方によると母材はその板厚の1/2で、しかも荷重の大小によらず常に面タッチしていると仮定しているため、母材と添接板の応力は等しい。しかし実塔では母材先端にタッチ判定すきまが存在し、これが閉じ、タッチしてから母材が圧縮力を直接伝達するので、このプロセスに応じた挙動を示すはずである。タッチしても、タッチ面の凹凸や表面粗さにより完全な力伝達が成されるとは考えられない。また、50%を占めるノータッチ部のすきまが0.2mmという微細な量なのに、単純に母材板厚を半分とした応力状態になるものか疑問である。

第2に、端面直角度は塔柱ブロックを積み重ね、塔が完成したときの塔頂倒れ量や曲がりに影響するので、塔全体の強度を評価するときの間接的パラメーターとして重要な意味を有するものと考えられる。

しかし、この種の研究は従来ほとんど実施されておらず、表-1に示した基準値自体、上に述べた力学的検討を経て定められたものではなく、過去の工事実績を参考に定められたものと考えられる。

一方、製作・架設においては、高度の加工・施工技术を最大限活用しており、因島大橋や大鳴門橋規模の塔柱に対しては、特に問題なく精度を確保できた。しかし、今後塔断面がさらに大型化すると、現有の設備・技術に改良を加えたとしても、現行の精度基準のすべてを満足することは困難になるものと予想される。

こうした背景から著者らは、現行の精度基準を根本から見直す必要があると考えた。そのためにはまず、タッ

チ判定すきま、最大すきまおよび表面粗さが、継手部の応力・変形に対しいかなる影響を及ぼすかを明らかにしなければならない。この研究課題は、精度基準を見直すためだけでなく、継手の安全性を確認するうえで重要である。

最近、植田・永田・小林³⁾はこの問題を取り上げ、理論解析と実験を行い、表面粗さとタッチ判定すきまの現行基準を緩和できることを提案しているが、継手部の力学性状を十分解明するには至っていない。

本研究の目的は、タッチ率 50% で設計され、圧縮力の伝達を母材のメタルタッチに期待した高力ボルト摩擦継手の、応力・変形挙動を明らかにし、精度基準を見直すうえでの、定量的資料を得ることである。

本論文の特徴は、挙動解明の糸口として以下に示す判断基準を設定したことである。

① 母材は本来、添接板がなくても単独で設計荷重に耐えるだけの板厚を有しているの、応力的には問題ない。応力的に最も厳しい条件にあるのは添接板の、タッチ判定すきまが存在する継手軸方向中央部であり、これを応力に関する判断基準とした。

② 母材が満足しなければならない条件は軸方向圧縮変形量であり、継手部以外の塔柱一般部分（以下母材単独という）の変形性能より劣らないことである。継手部母材の変形量は、添接板とタッチ判定すきまの存在により、軸方向に関し不均一になると考えられる。そこで、継手部は母材・添接板・高力ボルトで一体化された塔柱の一部分であるとの考えに立ち、継手軸方向全体区間における母材の変形量（以下継手全体の変形という）を、母材単独における同区間長の変形量と対比することで、変形に関する判断基準とした。

実験は2回に分けて実施した。まず予備実験で、タッチ状態の違い、タッチ判定すきまの有無、表面粗さなどに着目し、挙動の基本性状を把握した。次に本実験で、継手の設計荷重領域において、タッチ判定すきまが挙動に及ぼす影響を詳細に調べ、結合ばねによる継手の力学モデルを設定して数値解析による検討を加えた。さらに、精度基準としての許容すきまについて考察した。

2. 予備実験の概要と結果

予備実験は、比較的小型で基本的ないくつかの供試体を用い、これらの耐荷力挙動を観察することに主眼をおいた。供試体の種類は表-2に示すとおりで、タッチ率 50% を中心とし、このほかにタッチ部形状の特殊なもの、すきまのあるものなどである。タッチ率を供試体を実現する方法

は、タッチ率調整の容易さ、ひずみゲージ配線の都合などから、母材先端を板厚方向両側から切削して接触板厚を縮小することによって、このため、最大すきまに相当する寸法は、30 mm（図-1、板厚を縮小した寸法）という過大なものになっている。各供試体の特徴と実験の着目点を以下に示す。

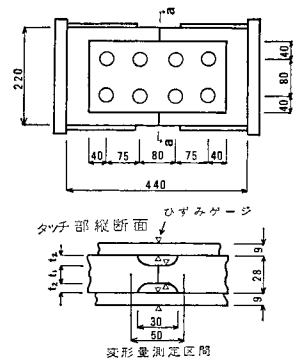


図-1 予備実験の供試体

T25A：タッチ率は 25% であるが、板厚方向が緩いテーパになっており、タッチ部が変形するとタッチ面が板厚方向へ広がり、タッチ面積が漸増することを期待した。テーパ末端板厚は、タッチ率 50% 相当になっている。

T25B：0.2mm 高さの凸型 25% タッチであり、ベースの板厚はタッチ率 50% 相当になっている。

T50：タッチ率 50% で、実験の中心的供試体。

T50R：T50 とまったく同形であるが、他の供試体のタッチ面が、表面粗さ 12s を目標に加工されているのに対し、この供試体だけ 50s と粗くし、表面粗さの影響を調べようとした。

G501：T50 と同形であるが、母材先端に 0.1mm のすきまを設けた。荷重の増加につれてすきまが閉じ、母材のメタルタッチによる力の伝達が始まるような挙動を調べる。

G502：G501 と同様の供試体であるが、すきまを 0.2mm と大きくした。

C28：母材単独の供試体。

供試体の形状は、図-1 に示すように塔柱の現場水平継手からその一部を切り出したようなもので、母材の板

表-2 予備実験供試体の種類

供試体名	メタルタッチ率 (%)	母材先端すきま (mm)	母材先端寸法 t ₁ (mm) t ₂ (mm)	表面粗さ (s)	母材先端形状 (mm)	試験数 (体)
T25A	25	0	7 10.5	12		1
T25B	25	0	7 10.5	12		1
T50	50	0	14 7	12		1
T50R	50	0	14 7	50		1
G501	0→50	0.1	14 7	12		1
G502	0→50	0.2	14 7	12		1
C28	—	—	—	—		1

を両側から添接板ではさみ、2行2列の高力ボルト (M22, F10T) で摩擦接合したものである。板厚は実塔と同等の母材 28 mm, 添接板 9 mm, 材質 SS41 とした。なお, T25A, T25B, T50, T50R の母材先端すきまは 0.03 mm 未満であった。

測定項目は、タッチ部 50 mm 区間における母材の軸方向圧縮変形量, タッチ部における母材と添接板表面の軸方向圧縮ひずみ, 高力ボルトの軸力とした。

圧縮載荷荷重は, C28 の降伏荷重を越える 200 t (1.96 MN) までとした。

図-2 は添接板の軸方向平均ひずみ (図-1 の a-a 断面) の測定結果, 図-3 は母材の変形量測定結果を示したもので, 継手部の応力・変形挙動の基本性状として以下の結果を得た。

① 図-3 の変形データから, すきまのない供試体では, 接合面のすべりは認められない。すきまを有する供試体 (G501, G502) では, すべりらしき現象がみられるが, 引張載荷時の急激で大きなすべりに比べると非常に微小なものであり, 局部的すべりを伴った接合面のせん断変形に類するものと推定される。したがって, 圧縮荷重を受け, 母材がメタルタッチする高力ボルト摩擦継手のすべりは, 継手部の挙動を支配する要素ではないものと考えられる。

② 図-2, 図-3 において T50 と T50R のひずみ, 変形を比較すると, その差は小さい。したがって, 表面粗さが 12 s でも 50 s でも圧縮力の伝達にはほとんど関係ないものと判断される。

③ T25A, T25B と T50 のひずみ, 変形には母材先端にすきまを有する供試体ほどの有意差が認められない。したがって, タッチ面の微細な凹凸は, 継手の挙動に大きな影響を及ぼす要素ではないものと考えられる。

④ 変形データをみると, すきまのない供試体は母材単独の供試体 C28 より変形は大きい, 耐力は母材単独と同等である。一方すきまのある供試体は, そのすきまが 0.2 mm 程度であれば, 荷重増加に伴う添接板の弾性変形や接合面のせん断変形によりすきまが閉じ, 母材も直接, 力の伝達に寄与するようになる。変形量は, すきまがない供試体より存在するすきまの大きさに応じて大きくなるが, その変形量を許せば母材単独と同等の耐力を有する。

⑤ 設計荷重 P_d の領域までは, 表面粗さや凹凸などタッチ状態の違いよりも, すきまの有無が挙動を支配する大きな要素になっている。したがって, タッチ判定すきまは継手部の応力・変形挙動を検討するうえで, 重要な力学パラメータであると考えられる。

以下の本実験では, 継手設計に定量的資料を与えることに主眼をおき, 荷重として継手の設計荷重領域までを

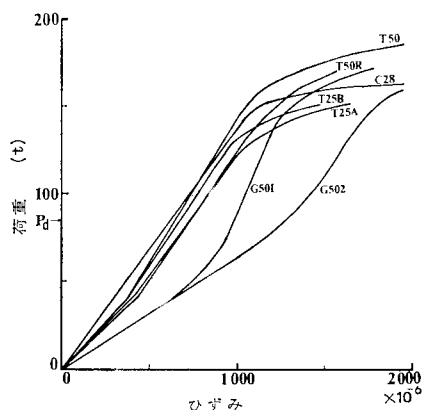


図-2 添接板および C28 の荷重-ひずみ曲線

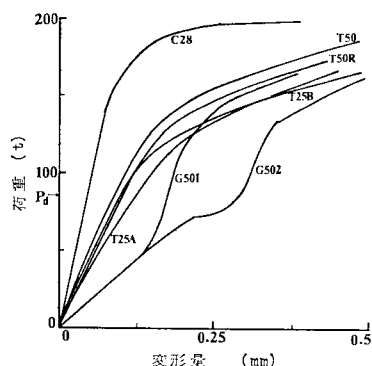


図-3 荷重-変形曲線

考え, タッチ判定すきまが挙動に及ぼす影響を詳細に調べることにした。

3. 本実験の方法

(1) 母材タッチ部のモデル化

実塔における母材のタッチ状態は, 図-4 (a) に示すようにタッチ部とノータッチ部が板幅方向に分布しているだけでなく, 板厚方向にも片当りなどがあるものと推定される。しかも, タッチ部のすきまは完全にゼロということではなく, 表面粗さも加わるので非常に複雑である。これを供試体を実現する方法として, タッチ部とノータッチ部を板厚方向に設ける場合 (図-4 (b)) と, 板幅方向に設ける場合 (図-4 (c)) が考えられる。

予備実験では前者の方法によったが, タッチ部母材の板厚を縮小することは, タッチ部の形状が実塔と掛け離れたものとなるため好ましくない。本実験では, この点を反省して後者の方法を用いた。ただし, 継手部の設計は板幅方向のどこを取ってもタッチ率が同じであることを前提にしているの, これに従いタッチ部とノータッ

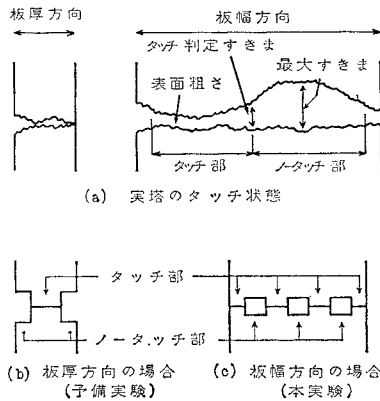


図-4 母材タッチ部のモデル化

ち部を細かく等分布させた。

精度基準でいうタッチ判定すきまと、供試体に設けられる母材先端のすきまは性質がやや異なるので、以下の記述ではタッチ判定すきまに相当するすきまを、先端すきまということにする。

(2) 供試体の形状と種類

供試体の形状および寸法を 図-5 に示す。板厚は実塔と同等の母材 36mm、添接板 9mm、材質 SM 50 である。板幅はボルトやタッチ部・ノータッチ部の板幅方向配置、および試験機の容量などを配慮し 560mm とした。ボルト配置は、軸方向に関して少なくとも実塔での最小数を満たすように 3 行とし、ピッチは 80mm である。板幅方向に関しては、ボルトによる力伝達がより均等になること、板幅の制限などを考慮し 9 列とし、ピッチを 60mm とした。このため使用するボルトは、実塔で用いられるものよりやや小径の M 20 (F 11 T) である。

供試体の種類を表-3 に示す。先端すきま g_i を、現行の精度基準に従ったものを含め、0.0~0.14mm まで 5 段階に変化させた。表に示した g_i は目標値で、データ解析では実測値を用いた。 g_i が閉じたときのタッチ率はどの供試体も 50% で、このときノータッチ部のすきま g_g は、G 04 を除いて 1mm である。したがって、精度基準で示す最大すきまに相当するすきま g_{max} は、G 04 を除いて 1mm 以上の比較的大きなすきまになっている。

タッチ面の表面粗さは、予備実験の結果から判断して粗面としてもよいが、供試体製作や実験精度の確保の面から 12s とした。

(3) 供試体の製作

供試体の加工は、板厚・板幅・タッチ部などの寸法精度を得るためすべて機械切削による。本実験のポイントである先端すきまは、板幅の両端にスキマゲージを挟

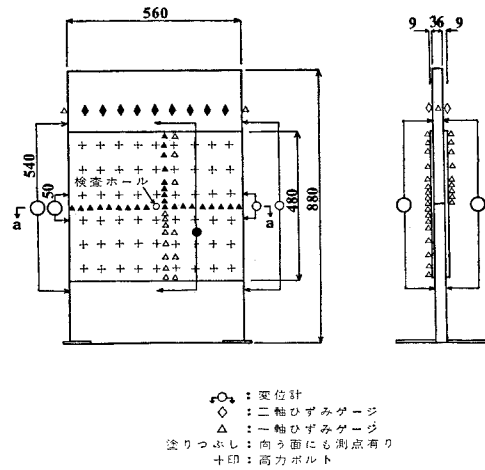


図-5 本実験の供試体と測点配置

表-3 本実験供試体の種類

供試体名	g_i (mm)	g_g (mm)	g_{max} (mm)	メタルタッチ率 (%)	表面粗さ (s)	試験数 (体)
G00	0.00	1.00	1.00	50	12	2
G04	0.04	0.16	0.20			2
G07	0.07	1.00	1.07			3
G11	0.11	1.00	1.11			3
G14	0.14	1.00	1.14			2

母材タッチ部寸法	
板幅	7@70=490
添接板厚	9mm
母材厚	36mm
ボルト間隔	70mm
ボルト径	20mm

むことにより確保した。これにより、先端すきまは板幅方向に関してほぼ一様となり、一つの供試体におけるすきまの偏差は 0.02mm 以下という高精度が得られた。ただし、G 00 は先端すきまを完全にゼロにすることはできず、0.02~0.03mm のすきまが存在するものと推定されたが、その厚さのスキマゲージがないため確認できなかった。

摩擦接合面の表面処理は、塗装基準⁹⁾によると素地調整だけの場合と、厚膜型無機ジンクリッチペイントの塗布や亜鉛溶射を行う場合がある。表面状態はすべり特性に影響を及ぼす。しかし、塗装処理した場合と素地調整だけの場合とで、摩擦係数に差がないことや、予備実験で得たようにすべりが挙動の支配的要素になっていないことから、素地調整だけとした。素地調整は、スチールグリット SG 50# および 70# の 1 対 1 混合でプラスト処理し、接合面の表面粗さ 50~70 μR_z を目標とした。

高力ボルトの軸力導入は、1 本当たり 19.1t (0.19 MN) を目標とし、下限値 17.8t (0.17 MN)、上限値 20.4t (0.2 MN) にて管理した。

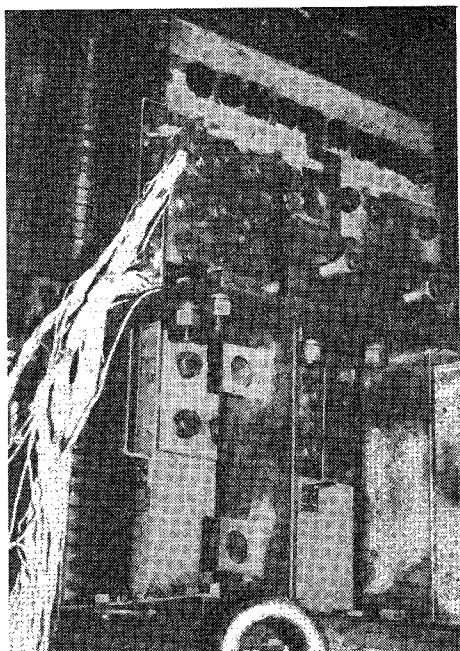


写真-1 実験状況

(4) 測定項目および実験方法

測定項目は以下のとおりとした。

① 供試体鋼板表面のひずみ 母材一般部分に二軸ひずみゲージ、添接板中央の板幅方向および軸方向に一軸ひずみゲージを配し、デジタルひずみ計で記録した。

② 母材の軸方向変形量 母材の軸方向 540 mm 区間(添接板長 480 mm+変位計取付けスペース 2×30 mm)およびタッチ部 50 mm 区間にパイ型変位計を配し、デジタルひずみ計と X-Y レコーダーで記録した。

図-5 に測点配置を示す。

載荷は能力 600 t (5.88 MN) の試験機を用い、継手供試体の設計荷重 $P_d=383\text{ t}$ (3.75 MN)——母材断面積 A_B 、許容応力 σ_a とすると $P_d=A_B \cdot \sigma_a$ ——の約 10% 増しの 440 t (4.31 MN) までとし、一つの供試体について 2 回から 3 回繰り返した。写真-1 に実験状況を示す。

4. 実験結果と考察

(1) 継手軸方向中央部における添接板のひずみ

図-6 は、継手軸方向中央部(図-5 の a-a 断面)における添接板圧縮ひずみ(2 枚の平均)の板幅方向分布の一例を示す。分布は、ボルト線上や母材がタッチする測点においてひずみが比較的小さく、ボルト線上以外や

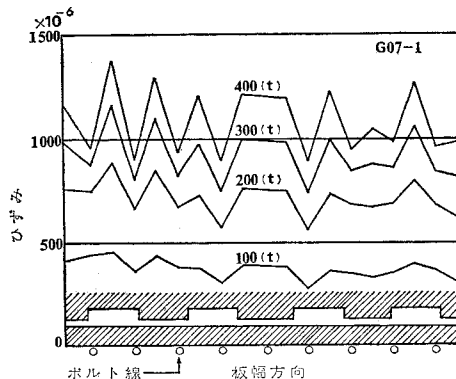


図-6 添接板ひずみの板幅方向分布

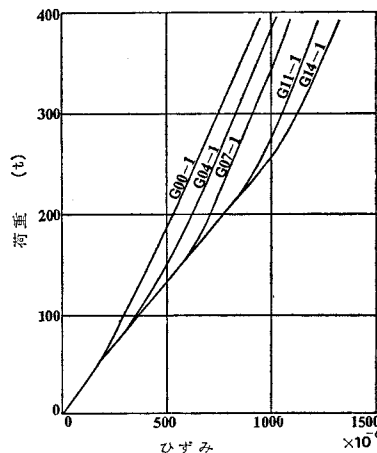


図-7 添接板の荷重-ひずみ曲線

ノータッチ部においてやや大きい。これは、ボルトの存在による応力状態の乱れのほかに、母材ノータッチ部における添接板の荷重負担が、タッチ部に比べて大きいためと考えられる。

図-7 は、板幅方向に不均一分布するひずみを平均して求めた添接板の荷重-ひずみ曲線である。単位荷重当たりのひずみ増加は、低荷重域において大きい。ある荷重を越えると抑制される。ある荷重とは、先端すきま g_i が閉じるタッチ荷重を意味し、 g_i が大きいほどタッチ荷重も大きい。このことは、タッチすることにより母材が力伝達に直接寄与し、添接板の荷重負担が軽減されるプロセスを示している。タッチ荷重付近での挙動が非線形なのは、たとえ g_i がゼロになっても完全な面タッチではなく、微細な凹凸が存在したり片当り状態になっているため、タッチが徐々に進行するためと考えられる。

(2) 継手全体の変形挙動

変形量を測定した添接板をはさむ母材の、軸方向 540

mm 区間の荷重-変形曲線は非線形で、しかもやや異なる2つのパターンを示す。すなわち、先端すきま g_i

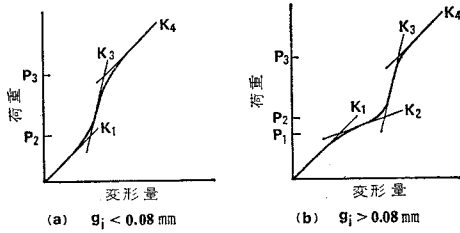


図-8 荷重-変形パターン

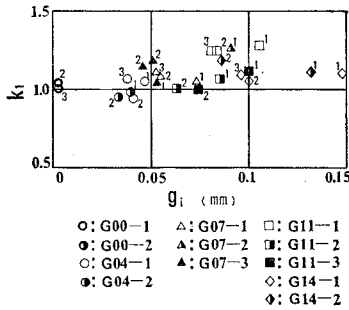


図-9 一次剛度比と先端すきまの関係

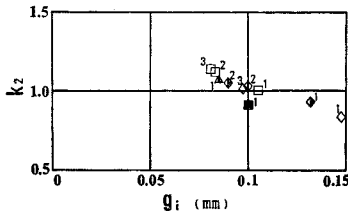


図-10 二次剛度比と先端すきまの関係

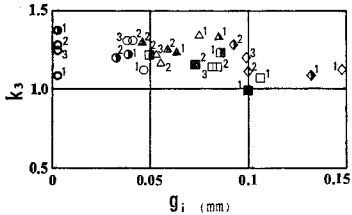


図-11 三次剛度比と先端すきまの関係

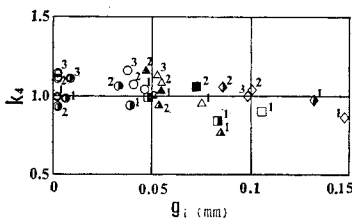


図-12 四次剛度比と先端すきまの関係

が 0.08 mm より小さい供試体は 図-8 (a), g_i がこれを越える供試体は (b) のパターンである (ただし、図はやや誇張して表現した)。

挙動を検討するために以下の記号を定義する。

K_i : i 次剛度. 荷重-変形曲線の勾配を示し、荷重 P における荷重増分を ΔP , 変形増分を $\Delta \delta$ としたとき、 $K_i = \Delta P / \Delta \delta$ で定義する。

K_0 : 母材単独の剛度. すなわち、母材単独における軸方向 540 mm 区間の荷重-変形曲線の勾配を示し、この実験の場合、 $K_0 = 784 \text{ t/mm}$ (7.68 GN/m) である。

k_i : i 次剛度の母材単独剛度に対する比を示し、 $k_i = K_i / K_0$ で定義する。

P_1 : K_1 と K_2 の交点を示す荷重。

P_2 : K_1 と K_3 , または K_2 と K_3 の交点を示す荷重。

P_3 : K_3 と K_4 の交点を示す荷重。

図-9 から 図-12 は、各供試体の荷重-変形曲線から K_i を読み取り、 k_i を求め g_i との関係プロットしたものである。図-13 から 図-15 は P_i と g_i の関係をプロットしたものである。図中の各記号に付された添数字は、その供試体の載荷回数何回目であることを示す。

これらの図から、継手全体の变形挙動に関して以下のことがわかる。

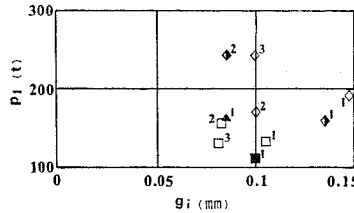


図-13 P_1 と先端すきまの関係

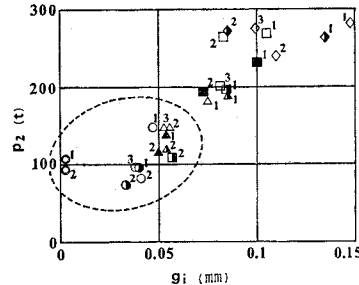


図-14 タッチ荷重と先端すきまの関係

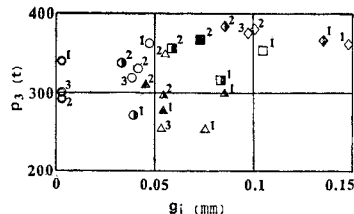


図-15 P_3 と先端すきまの関係

① K_1 は、母材がタッチする前の剛度を示す。母材はまだ圧縮力の伝達に直接寄与していないので、 K_1 は g_i の大小に依存しないはずである。図-9 から、 k_1 は 1.0~1.3 であり、母材による力伝達がなくても継手全体の圧縮変形剛度は母材単独の場合より大きくなる。図-13 から、 P_1 は g_i にあまり依存していないことがわかる。

② P_2 は、 g_i が閉じ母材がタッチした荷重を示す。図-14 から、 P_2 は g_i に比例して大きくなる。図-14 から、 P_2 付近の変形挙動は非線形 (図-8) であり、荷重-変形曲線からもタッチが徐々に進行するプロセスがわかる。

③ K_3 は、 g_i が閉じ母材が力伝達に直接寄与するようになったタッチ後の剛度を示し、 K_1 より大きい。図-11 から k_3 は 1.1~1.4 であり、母材がタッチすることにより、剛度は母材単独の場合より大きくなる。しかし、 g_i が大きくなると k_3 は小さくなる傾向

にあり、ばらついたデータを直線近似すると、 k_3 と g_i (mm) の関係として次の実験式を得る。

$$k_3 = 1.3 - 1.6 g_i \dots \dots \dots (1)$$

ただし、式 (1) 以降の実験式を求めるとき、G00 データは 3. に述べた理由から g_i の信頼性が低いので除外した。

④ K_2 は、母材がタッチする直前の剛度を示し、 K_1 より小さい。しかも図-10 から明らかなように、 K_2 は g_i が 0.08 mm より大きい供試体にだけみられる。これはタッチ荷重 P_2 と、 K_2 が開始する荷重 P_1 に関係がある。図-13 をみると P_1 は、 g_i が 0.08 mm より大きい供試体にだけみられ、その大きさは 100~150 t (0.98~1.47 MN) 以上である。一方、 g_i が 0.08 mm より小さい供試体のタッチ荷重 P_2 を図-14 でみると (g_i が 0.08 mm より小さい供試体を破線で囲んだ)、約 150 t (1.47 MN) 以下であることがわかる。つまり、 g_i が 0.08 mm より小さい供試体は K_2 が開始する前に母材がタッチし、 K_3 になったものと考えられる。 g_i が大きいほど k_2 は小さくなる傾向にあり、直線近似すると次の実験式を得る。

$$k_2 = 1.3 - 3.1 g_i \dots \dots \dots (2)$$

⑤ K_4 は、設計荷重またはこれを越える荷重領域における剛度で、 K_3 より小さい。図-12 から、 k_4 は 0.9~1.1 であり、母材単独の場合とほぼ等しい剛度である。

⑥ K_4 が開始する荷重 P_3 は、図-15 に示すように 200~400 t (1.96~3.92 MN) にばらついており、 g_i との相関は不明確である。

(3) 添接板の応力と先端すきまの関係

図-16 は、設計荷重が作用したときの継手軸方向中央部の添接板応力度 σ_s と先端すきま g_i の関係を示す。 g_i が現行の精度基準に示す 0.04 mm 程度の場合、材質 SM 50 の示方書⁵⁾に定める圧縮許容応力度 1900 kg/cm² (186.2 MPa) またはそれをやや越える応力度となる。 g_i が大きくなるに従って σ_s は増大するが、 g_i が 0.15 mm より小さければ規格で示す降伏応力度 3200 kg/cm²

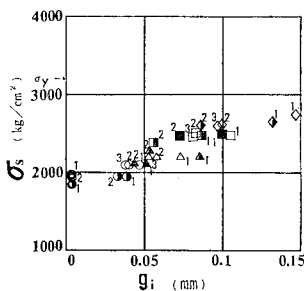


図-16 添接板応力と先端すきまの関係

(313.6 MPa) には達しない。

(4) 継手全体の変形と先端すきまの関係

図-17 は、設計荷重が作用したときの継手全体の変形量 δ と先端すきま g_i の関係を示す。ばらついたデータであるが g_i が大きいほど δ も増大する傾向にあり、直線近似すると次の実験式を得る。

$$\delta = \delta_0 + \alpha g_i \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $\delta_0 = 0.38$ (mm)

$$\alpha = 0.73$$

式 (3) の δ_0 は、母材先端にすきまがない場合の変形量を意味するが、母材単独の変形量 $\delta_B = 0.488$ mm より小さい。したがって、差 $\delta_s = \delta_B - \delta_0$ は添接板が母材と共同で荷重を伝えたことによる変形量の減少分を示すといえる。

このことから、添接板は母材の変形を抑制する補強材としての効果を有することがわかる。一方、 α が 1.0 より小さいことは、 g_i がそのまま変形量の増加に結び付いていないことを示している。実験式の勾配 α は、 g_i による継手変形の増加度合いを示すものであるという物理的意味に留意すべきである。

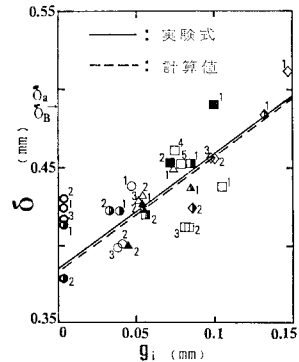


図-17 継手全体変形量と先端すきまの関係

δ_B , δ_s を用いて式 (3) を書き直すと次式を得る。

$$\delta = \delta_B - \delta_s + \alpha g_i \dots \dots \dots (4)$$

δ_s や α は高力ボルト摩擦継手としての力学・構造特性を反映する量であるから、必ずしも単純に定式化できるものではないが、式 (3), (4) は継手全体の圧縮変形量が、 g_i をパラメーターとして線形的に表現できることを示しており、タッチ判定すきまを検討するうえでの定量的資料を与えるものとする。

5. 数値解析

(1) 継手のモデル化と解析方法

高力ボルト摩擦継手の応力解析として、継手部を平板にモデル化した解析手法⁶⁾が示されている。しかしこの解析は引張荷重を前提にしたもので、圧縮荷重を受けて母材のメタルタッチによる力伝達を考慮したものではない。そこで、圧縮力の伝達機構と継手全体の変形特性を把握することに主眼を置いて、継手部を以下のようにモ

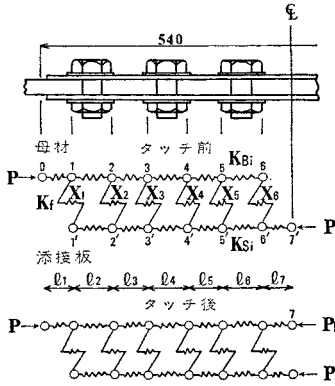


図-18 継手部の解析モデル

モデル化した。ボルト軸力による面圧は、厳密には二次元的な広がりをもって接合面全体に分布しているが、面圧強度は主としてボルト周辺に集中している。このため母材の力は、その大部分がボルト周辺で添接板に伝達される。この伝達面をボルト付近の数点で代表させ、そこに母材と添接板を結ぶ結合ばねを設けた。すなわち、図-18に示すように母材と添接板を圧縮変形に関して等価なばねに置換し、両者をつなぐ結合ばねにより圧縮力が伝達されたとしたのがこのモデルである。結合ばねは、摩擦抵抗のほかには接合部におけるせん断変形特性、母材や添接板の板厚方向せん断剛性などを代表するばねである。

解析には以下の仮定を設けた。① モデルは軸方向一次元とする。② 結合ばねの位置はボルトごとに2点に分布させ、計6点とする(図-18に節点番号を示す)。③ 結合ばね定数は各点で同一とする。④ ボルト孔やタッチ部の凹凸などの母材および添接板の断面欠損は考慮しない。⑤ タッチ前とタッチ後に分ける。

解析方法は、母材断面積 A_B 、添接板断面積 $2 \cdot A_s = A_B/2$ 、ヤング係数 E 、節点間距離 l_i から母材のばね定数 $K_{Bi} = E \cdot A_B / l_i$ 、添接板のばね定数 $K_{si} = 2 \cdot E \cdot A_s / l_i$ を求め、結合ばね定数 K_f をパラメーターとして各結合点の変形適合条件から伝達力 X_i を求めることによった。

(2) 解析結果

表-4 の諸数値を用い、以下の結果を得た。

a) 結合ばねの伝達力

図-19 は結合ばねの伝達力 X_i と荷重 P との比、すなわち添接板への荷重伝達率 $q_i = X_i/P$ と、結合ばね比 $S = K_f/K_B$ (ただし、 $K_B = E \cdot A_B / l_3$) との関係を示す。 S が大きいと母材と添接板の結合度合いが強固であり、小さいと接合面がせん断変形しやすいことを示す。

タッチ前の場合、 S がゼロに近いと各結合点での q_i は等しく、それぞれ $1/6$ の荷重を伝達するが、 S が大き

表-4 計算に用いた数値

A_B	20 160 mm ²
A_s	5 040 mm ²
E	21 t/mm ² (2.1 MPa)
l_1	55 mm
l_2, l_4, l_6	30 mm
l_3, l_5	50 mm
l_7	25 mm
K_f	0~∞ t/mm (9.8 MN/m)

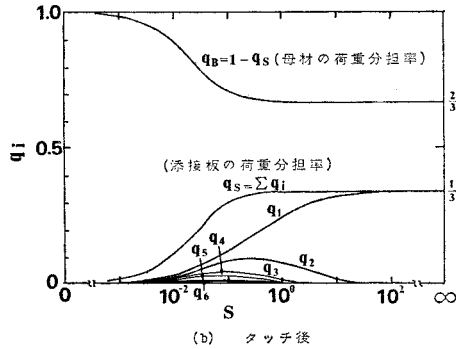
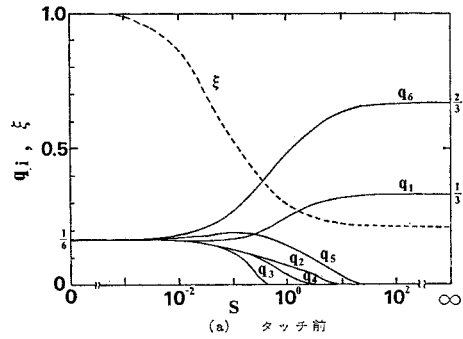


図-19 結合ばねの荷重伝達率と結合ばね比の関係

くなるにつれて q_i に差が生ずる。 $S = \infty$ では $q_6 = 2/3$, $q_1 = 1/3$ となり、荷重のほとんどが継手の端部と中央で伝達される。したがって、タッチ前における X_i は図-20(a)の分布となり、引張載荷の場合と類似する。

タッチ後の場合、 S がゼロに近いと当然のことながら $q_i = 0$ となり添接板への力伝達はない。 S が大きくなると添接板にも力が伝達されるようになり、その分だけ母材の荷重分担は軽減される。 $S = \infty$ のとき継手中央部の荷重分担は、母材 $2/3$ 、添接板 $1/3$ となり、母材と添接板の

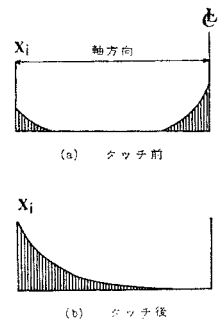


図-20 結合ばねの伝達力の軸方向分布

断面積比に等しい。しかも添接板への力伝達は、そのほとんどが継手端部でなされ、 X_i の分布(図-20(b))は引張載荷の場合と大きく異なったものとなる。

b) 継手全体の圧縮変形剛度

図-21は、4. で定義した剛度比 k と S の関係を示す。タッチ前の場合、 $S = \infty$ のとき k は最大となり $k = 1.17$ である。 S が小さくなるに従って k も小さくなり、継手全体の変形が増大する。タッチ後の k はタッチ前より大きく、 $S = \infty$ で $k = 1.36$ である。 S が小さくなると k も小さくなり、 $S = 0$ のとき $k = 1.0$ 、すなわち母材単独剛度と等しくなる。 k_1 および k_3 の実験値から S の値を求めると、それぞれ図の斜線に示す範囲となる。

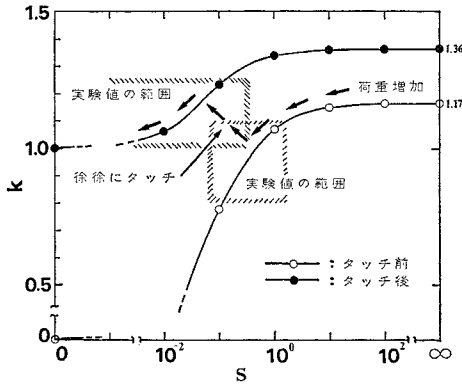


図-21 剛度比と結合ばね比の関係

(3) 実験で得た変形挙動の考察

まず、タッチ前の k_2 (図-10) で示される剛度低下は以下のように説明される。荷重が大きくなると継手端部と中央部の伝達力(図-20(a))も比例して増大するが、結合ばねは接合面のすべり耐力を越える力を伝達できない。これは接合面に局部的なすべりが生ずることを意味し、解析における S の低下に相当する。 S の低下は母材と添接板の荷重分担率の軸方向分布(図-22(a))を変える。添接板が単独で荷重を負担する区間長(節点6~7)が拡大し、母材と添接板が共同で荷重に耐える区間長(節点1~6)が縮小するので剛度が低下する。また g_i が大きいほどタッチ荷重が大きいので、それだけ結合ばねの負担が増大し、 S の低下を促進する。

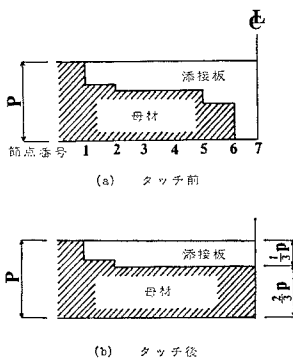


図-22 荷重分担率の軸方向分布

次にタッチすると(図-22(b))、添接板の2倍の断面積を有する母材が直接、力伝達に寄与するので剛度が増大し(図-11の k_3)、変形が抑制される。しかし、添接板への力伝達は継手端部に集中(図-20(b))するようになるので、局部的すべりがさらに進行し S が低下する。 k_4 (図-12) にみられる剛度低下はこれによるものと考えられる。

すなわち、荷重の増加によって 図-21 の矢印に沿って剛度が増え、これに対応した変形をするので、継手全体の変形挙動が非線形になるものと考えられる。

解析結果を用いて継手の変形量を推定するには、以下の要領に従えばよい。図-19(a)の破線は、タッチ前の母材先端の変形量 δ_6 (節点6の変形量)と継手全体の変形量 δ (節点0の変形量)の比、 $\xi = \delta_6/\delta$ を示しており、タッチ荷重 P_2 は式(5)で計算される。

$$P_2 = g_i \cdot k_1 \cdot K_0 / \xi \dots\dots\dots (5)$$

設計荷重が作用したときの δ は、各剛度領域における荷重増分 ΔP_i による変形量の和として、次式で計算される。

$$\delta = \sum_i \{ \Delta P_i / (k_i \cdot K_0) \} \dots\dots\dots (6)$$

k_i は S を設定することにより得られるが、ここでは実験結果から、 $k_1 = 1.1$ および式(1)、(2)を用い、 g_i をパラメーターとして δ を計算すると 図-17 の破線に示すとおりであり、実験式とよく一致する。

このように、結合ばねを用いて継手部をモデル化すると、圧縮力の伝達や変形特性をよく表現でき、継手全体の変形量を推定するうえで有効であることから、モデル化の妥当性を確認した。

6. 許容すきまに関する一考察

(1) 許容すきまの判断基準

継手の設計の考え方における添接板と高力ボルトの力学的役割は、有効板厚が半分(タッチ率50%)であることによって低下する継手強度を補うことであり、しかも母材単独の場合より劣らないことを要求している。

実験結果から明らかなように、応力的に最も厳しいのは添接板の軸方向中央部であり、母材応力には十分な余裕がある。したがって、継手の性能・安全性を照査するうえで重要なもう一つの項目は、継手全体の圧縮変形量であり、これが許容すきまを検討するための判断基準になるものと考えられる。

図-23は、継手部に作用する荷重と継手部軸方向全体 l_s 区間の変形挙動の一例を示した。Aは母材単独における同一 l_s 区間の挙動を示し、設計荷重 P_d が作用したとき δ_a の変形量を生ずる。Bは継手母材の挙動を

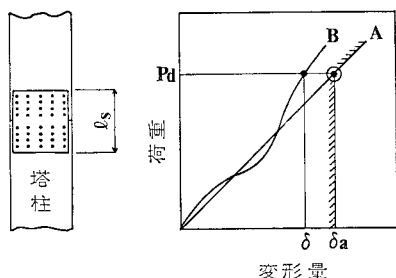


図-23 変形に関する判断基準

示しており、 P_d が作用したとき δ の変形量を生ずる。B は斜線領域内であればどのような挙動をしてもよく、 P_d が作用したとき式 (7) を満足することをもって変形量に関する判断基準とした。

$$\delta \leq \delta_a \quad (P=P_d \text{ のとき}) \dots \dots \dots (7)$$

すなわち、添接板の母材に対する補強材としての効果を期待し、タッチ部の母材や添接板の応力が局部的に増大したり降伏したとしても、継手強度に及ぼす影響は小さいという考えに立っている。

(2) タッチ判定すきま

供試体に設けた先端すきま g_i はタッチ判定すきま g_a に相当するが、 g_i が板幅方向に一様なすきまであるのに対し、実塔においてタッチと判定されたところは、すきまが g_a より小さい部分もあるので両者は同質ではないが、 g_i を g_a とみなす分には安全側であると考えられる。

図-17 において、現行の $g_a=0.04$ mm における変形量は $\delta_a=\delta_B$ に対して十分余裕があり、もっと大きな g_a が許容されることがわかる。判断基準式 (7) に式 (4) を代入すると $g_a \leq 0.15$ mm を得、現行の精度基準の約 4 倍のすきまが許容される。しかし、この値は実験精度の制約や測定データにばらつきをもった実験結果に基づくものであるから、そのまま精度基準にすることはできないが、変形挙動のパターンを若干異にする境界の g_i (図-8) を参考にして、タッチ判定すきまとして 0.08~0.1 mm 程度は許容できることを提案する。この提案値は、1 枚板の実験結果に根拠をおくものであるが、箱断面に対しては荷重が均等に作用し、タッチ部・ノータッチ部が辺長方向に均一に分布していれば、実塔にも十分適用できるものとする。

(3) 最大すきま

本実験供試体に設けた最大すきまは 1 mm である。現行基準に比べてこのように大きなすきまであっても、継手部の応力・変形挙動はほとんど影響されないことは実験結果から明らかなことである。したがって、作用荷重

が設計荷重以下であれば相当大きな最大すきまを許容できるものと考えられる。

しかし、最大すきまが大き過ぎると終局荷重領域での変形量が增大することは予備実験結果が示しており、継手部だけでなく塔全体の耐荷力と密接な関係をもつと考えられるので、ある程度小さく抑えなければならない。しかもノータッチ部の分布とも関係が深く、ノータッチ部が本実験供試体のように細かく等分布していれば大きくとることができ、偏在していれば小さく抑える必要がある。また過大なすきまは、塗装などの現場作業に対しても悪影響を及ぼす原因にもなる。

したがって許容最大すきまは、終局荷重時における塔全体の安定性と、施工性の 2 つの条件から定めるべきものとする。

7. 結 論

タッチ率 50% で設計され、圧縮力の伝達を母材のメタルタッチに期待した、吊橋主塔現場水平継手の応力・変形挙動および精度基準に関し、SM 50 材を用いた実験および結合ばねの概念に基づく継手のモデル化による数値解析の結果から以下の結論を得た。

(1) 継手全体の圧縮変形挙動は非線形である。これは、荷重増加に伴う母材のタッチによる力の伝達機構の変化と、接合部におけるせん断変形の進行によるものと考えられる。

(2) すなわち、母材の先端すきま g_i が閉じる前の比較的低荷重域における荷重-変形剛度 K は、母材単独の場合の 1.0~1.3 倍である。 g_i が閉じると母材も力伝達に直接寄与し、徐々に K が増大して 1.1~1.4 倍となり、変形が抑制される。継手の設計荷重領域では K が低下し、母材単独と同等になる。タッチ以後の K は、 g_i が大きいほど小さい傾向にあり、 K と g_i の関係を実験式で示した。

(3) 荷重-変形挙動は、 g_i が約 0.08 mm を境にやや異なったパターンを示す。

(4) 設計荷重 P_d が作用したときの継手全体の圧縮変形量 δ は、 g_i が 0.1~0.15 mm 程度であれば母材単独の変形量より小さい。 δ と g_i の関係を実験式で示した。

(5) これらのことから、添接板は圧縮力を伝達するだけでなく、母材の変形を抑制する補強材としての効果があるものと考えられる。

(6) 継手軸方向中央部における添接板応力は、母材がタッチすると応力増加が抑制される。 P_d が作用したとき、 g_i が現行の精度基準に示す 0.04 mm 程度の場合、材質 SM 50 の圧縮許容応力度またはそれをやや越える

応力度となる。 g_i が大きくなると応力度も増大するが、 g_i が 0.15 mm 程度より小さければ規格で示す降伏応力度には達しない。

(7) 継手部の変形挙動は、結合ばねを用いて継手部をモデル化した数値解析により説明できる。実験式と計算値はよく一致し、モデル化の妥当性を確認した。

(8) タッチ判定すきまを検討するために、 P_d が作用したときの母材単独変形量 δ_B を許容限界として、 $\delta \leq \delta_B$ という判断基準を設定した。現行基準のタッチ判定すきま 0.04 mm は、判断基準に対し十分余裕があり、0.08~0.1 mm 程度は許容できることを提案する。

8. あとがき

本研究の内容は、いうまでもなく今回用いた供試体の実験から得たものである。したがって、結果のすべてが実塔に直接適用できるものとは限らず、その解釈にあたっては常に、供試体がつもつモデル化の制約に留意しなけ

ればならないが、挙動の基本性状は解明できたものと考ええる。

また、力学パラメーターである精度基準として、継手部の設計に関連したものだけを取り上げたが、このほかにも検討しなければならない項目は多い。特に、最大すきまや端面直角度が塔全体の変形や耐荷力に対しいかなる意味をもち影響を及ぼすかは、今後解明すべき研究課題であると思う。

参考文献

- 1) 本州四国連絡橋公団：鋼橋等製作基準，昭和 52 年 3 月。
- 2) 竹内覚夫・池田 博：因島大橋塔工事 施工報告，本四技報，Vol. 4, No. 14, pp. 8~14, 1980 年 10 月。
- 3) 植田幸男・永田 勉・小林弘美：吊橋主塔継手部の一考察，石川島播磨技報，第 21 卷，第 2 号，pp. 145~151, 昭和 56 年 3 月。
- 4) 本州四国連絡橋公団：鋼橋等塗装基準・同解説，昭和 55 年 3 月。
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，昭和 55 年 5 月。
- 6) 田島二郎：高力ボルト摩擦接合概説，pp. 90~97, 昭和 41 年 11 月。

(1982.3.29・受付)