

# 2種類のボルト軸部ひずみ測定法の妥当性について

黒田充紀\*・広橋 渉\*\*・増田陳紀\*\*\*

ひずみゲージを用いて高力ボルトの軸力を測定する場合、軸部に設置したひずみゲージより得られるひずみをその断面の平均ひずみであると仮定することがある。第一に、その仮定の妥当性について検討した。第二に、軸部に孔を開けてひずみゲージを埋め込む測定法を採用した場合、孔がボルトの引張挙動に及ぼす影響について調べた。軸長が比較的短いボルトの場合でも、軸部に貼付したひずみゲージからはほぼ平均ひずみを得られることを示した。

**Keywords:** high-strength bolt, bolt axial force, strain gage, measurement, finite element analysis

## 1. はじめに

ボルト軸力を測定する場合に、ひずみゲージによる方法がよく用いられる。ひずみゲージの設定位置は、ボルト頭部とボルト軸部とが考えられるが、一般には大きなひずみを得られる後の方が精度的に優れていると考えられる。

構造実験においては一般に後者が用いられるが、この場合、ひずみゲージの設置方法としては、(1) 軸部の表面に複数貼る、(2) 頭部から軸部に孔を開けゲージを接着剤で埋め込む(埋め込みゲージ法)<sup>1)</sup>、の2方法が考えられる。何れの方法でも、ひずみ値を測定してそれを軸力値に換算する場合、ゲージを貼ったボルトの引張試験を予め行っておき、軸部のひずみ値と軸力との関係をキャリブレーションしておく方法がまず考えられる。一方で、ゲージより得られる軸部のひずみ値(複数ゲージを貼付する場合には、その平均値)が、断面内の平均ひずみであると便宜的に仮定する方法が考えられる。しかし、高力ボルトの断面形状は、頭部から軸部、および軸部からねじ部へと鋭く変化するので、必ずしも測定位置で平均ひずみを得られるという保証はない。

本報告では、第一に、ボルトの軸部に設置したゲージより得られるひずみが断面内の平均ひずみであるという上記の仮定の妥当性を検討する。この仮定が妥当であれば、キャリブレーションの必要はなくなる。

第二に、埋め込みゲージを用いる場合、孔がボルトの引張挙動に及ぼす影響を検討する。

軸部表面にゲージを貼る方法、埋め込みゲージを用いる方法の何れの場合でも、軸長が相対的に短くなると軸

部からねじ部への断面変化部でのひずみ集中の影響が測定値に混入してくる可能性が大きい。したがって、比較的軸部長さが短いボルトも検討対象としている。検討は、実験および大変形を考慮した弾塑性有限要素解析によった。

従来、ひずみゲージによるボルト軸力測定に関するデータは、軸部表面に貼付する方法については橋本らによるもの<sup>2)</sup>、埋め込みゲージ法については西村らによるもの<sup>1)</sup>が発表されているが、軸部内部のひずみ・応力状態、あるいはそれとねじ部の塑性挙動との関連にまでは言及していない。本報告では、これらに対する検討は、数値計算によって行っている。

なお、埋め込みゲージ法は、軸部の表面に貼る方法に比べて、実験準備中および実験中にひずみゲージを破壊する恐れが少ない点が特に有利である。

## 2. ボルト軸力の測定方法

### (1) 軸部表面にゲージを貼る方法

軸部中央部にひずみゲージを2枚以上貼付し、それぞれのゲージから得られたひずみの平均値よりボルト軸力を求める方法である(図-1(a))。この方法では、軸部表面に複数のゲージを貼付するため、ボルトの曲げの影響をも調べることが可能となるが、孔壁とボルトの接触によりゲージを痛める可能性がある。また、1本のボルトに複数のゲージを貼付するため、配線・結線などにはその分手間がかかる。

### (2) 埋め込みゲージ法

ボルトの中心部に小径の孔を開けて、ゲージを接着剤によって孔内に埋め込む方法である(図-1(b))。この方法では、ボルトに作用する曲げの影響を調べることはできないが、実験中あるいは作業中にゲージを痛める可能性は(1)の方法に比べて低い。また、ボルト1本に対してゲージ1枚であるので配線などの作業は低減さ

\* 学生会員 工修 武蔵工業大学大学院博士後期課程  
(〒158 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

\*\* 学生会員 武蔵工業大学大学院修士課程

\*\*\* 正会員 工博 武蔵工業大学助教授 工学部土木工学科

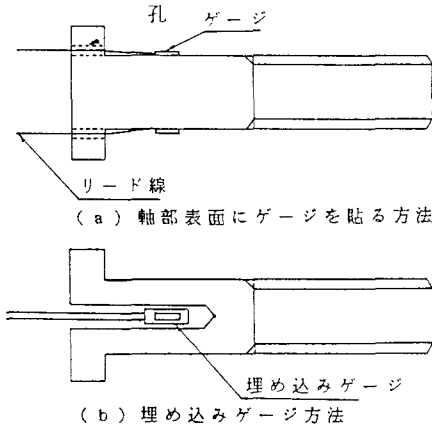


図-1 ひずみゲージによるボルト軸力の測定方法

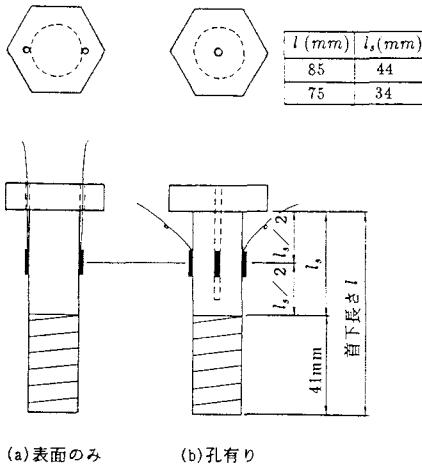


図-2 ひずみゲージの位置

れるが、ゲージの固定には、一般的に(1)の方法に比べて手間がかかる。

### 3. 引張試験概要

#### (1) ボルト供試体とひずみゲージの位置

本報告で用いたボルトはJIS B 1186に規定されるF 10 T, M 16の高力ボルトで、首下長さは、75 mmと85 mmのものである。ひずみゲージの位置は、表面のみに貼る場合(孔無しボルト)は図-2(a)の通りであり、埋め込みゲージを用いる場合(孔有りボルト)は、(b)のように孔の内部および表面である。

土木分野ではM 16は一般的ではないが、より径の大きいボルト(M 20～M 24)を用いる場合でも孔およびゲージ寸法は同じであるため、M 16を用いることは、孔の影響を厳しく評価することになる。

ゲージ長さの中心が軸部中心に一致するようにゲージ

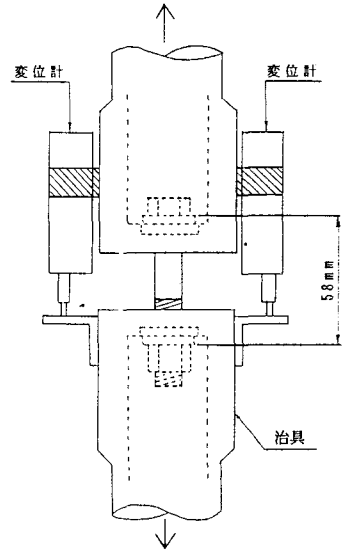


図-3 引張試験

を設置した。これはボルト頭部やねじ部などの断面変化位置からゲージが最も遠くなるように配慮したためである。

表面に貼付する場合は、軸部の表面をサンドペーパーで磨いた後に、ゲージ(ゲージ長2 mm)を貼付した。

埋め込み孔の深さは、上記の位置にゲージが設置された場合、ゲージベース端より先に3 mm(ゲージ中心より8 mm, ゲージ長6 mm)の余裕が残るように決めた。これは、孔による応力集中が測定値に影響しないことを期待するためである。埋め込み孔の直径は2 mmで、埋め込みにはエポキシ系の接着剤を用いた。

#### (2) 引張試験

引張試験には、武蔵工業大学の50 ton能力の試験機を用いた。図-3に示す引張治具を用いて単純引張荷重を静的に破断まで载荷した。伸びの測定は、治具両側に取り付けられた変位計(感度:1/500 mm)により測定した。ボルト頭部とナットの距離は58 mmとした。

### 4. 数値解析概要

数値解析には、大変形を考慮した有限要素弾塑性解析プログラム<sup>3)</sup>を用いた。本プログラムは増分形で定式化されており、構成式には、弾塑性理論としてJ 2流れ則を、客観応力増分としてJaumann増分を用いている。

要素分割および境界条件を図-4に示す。定ひずみ軸対称リング要素をいわゆるクロストライアングル(CT)形式で用いている。

硬化則には、n乗硬化則を用いた。

$$\sigma = C(a + \epsilon^p)^n \dots \dots \dots (1)$$

$\sigma$ は相当応力を、 $\epsilon^p$ は相当塑性ひずみを表わす。硬化パ

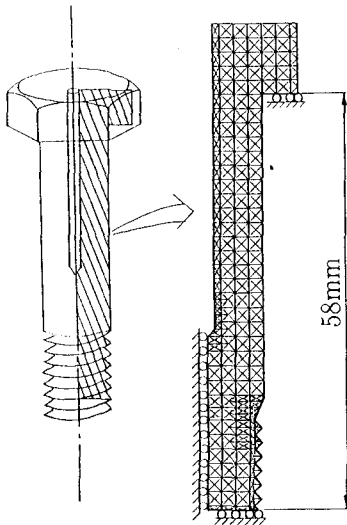


図-4 要素分割および境界条件

ラメータは、実験で用いたボルトの素材試験から、

$$C=1.13 \text{ GPa,}$$

$$a=0.001,$$

$$n=0.0280$$

とした。初期降伏応力  $\sigma_{y0}=Ca^n=931 \text{ MPa}$ 、またヤング率  $E=215 \text{ GPa}$ 、ポアソン比  $\nu=0.3$  である。

解析対象は引張試験結果を説明するための首下長さ 85mm のものに加えて、さらに軸部長さが短くなった場合、孔が挙動に影響するかを知るための首下長さ 60mm のものである。

## 5. 結果と考察

### (1) ボルト軸力および伸び量

孔有りボルトと孔無しボルトの軸力（ロードセルより測定された引張荷重値）と伸び量の関係を図-5に示す。首下長さが 85mm の場合について実験結果と解析結果を比較して示した。

図-3に示した変位計によって得られるボルトの伸び量にはボルト頭部とナットとの間の伸びに加えて、ナットとかみ合うねじ部の山と谷の複雑な接触による変形さらに座金の変形の影響も含まれている。数値解析によるこのような挙動の再現は、不可能ではないにしても容易ではない。そこで、ここでは数値解析結果と実験結果を比較するために、実験結果から上に述べたねじ部の接触挙動による変形量の除去を行っている（詳細は「付録」に示した）。したがって、図-5に示したボルトの伸び量（実験結果）は、ナット内に隠れたねじ部および座金の影響を含まないボルトの伸び量と考えてよい。補正を施さない場合は図中の破線のとおりであり、如何にねじのかみ合い部の影響が大きいかかわかる。

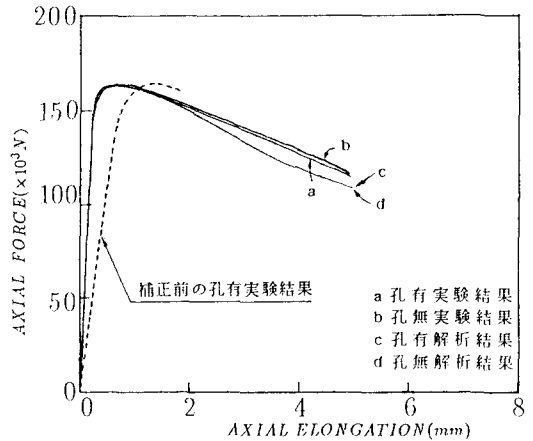


図-5 荷重-伸び量関係  
(実験および解析結果)

表-1 ボルトの引張試験結果

孔の有無	首下長さ (mm)	実験本数	最大荷重 (KN)	破断荷重 (KN)
無	75	2	166	97
	85	2	166	98
有	75	3	165	97
	85	3	165	98

実験結果の方が、最大荷重後の伸びが大きく出ている。この不一致の原因としては、解析における  $n$  乗硬化則のパラメータを決定するための素材試験において、このような大ひずみ領域まで正確に測定することが難しいこと、ねじ部のくびれによってモデルと実験との境界条件に徐々に差がでることなどが考えられる。この点を除けば補正後の実験結果と解析結果はよい対応を示している。

図-5で明らかのように、ボルト軸力-伸び量関係には孔の有無の影響は現われていない。ここには示していないが、軸部がより短い首下長さ 60mm のボルトの解析結果からも同様に、孔有りと孔無しの場合の軸力-伸び量曲線の有意な差は認められなかった。これは後述するように、ボルトの伸びの大部分がねじ部で生ずるためである。

表-1に引張試験によって得られた最大軸力、破断軸力をまとめて示す。

### (2) ひずみ

実験から得られたボルト軸力-ひずみ関係を図-6に示す。孔有りボルトの場合は、表面に貼ったひずみゲージ（2枚の平均値）と埋め込みゲージでは同じひずみ値を示しており、軸部表面と孔内部のひずみ値は等しい。

軸部に貼付したゲージおよび埋め込みゲージから得られたひずみは測定された荷重（軸力）に対してきわめて線形性がよい。

孔有りボルトと孔無しボルトの表面のひずみゲージによるボルト軸力-ひずみ関係の勾配を最小2乗法で求め

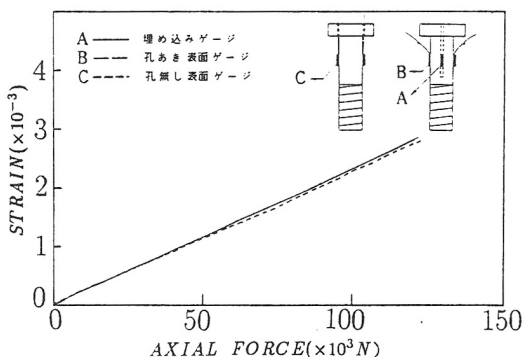
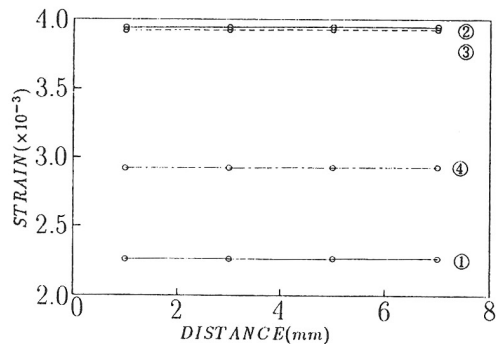
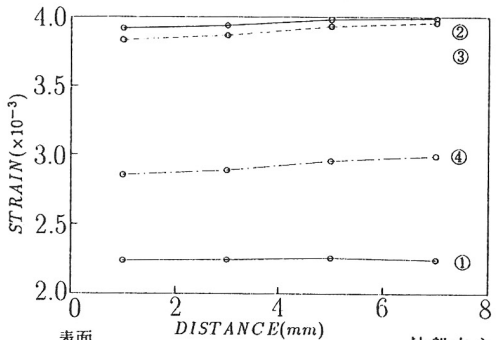


図-6 荷重(ボルト軸力)-ひずみ関係(実験結果)



(a) 首下長さ 85mm



(b) 首下長さ 60mm

図-7 ゲージ位置断面のひずみ状態(解析結果)  
(①~④はボルトの変形図の段階を示す)

て比較(試験本数での平均値で比較)すると、1.8%程度孔有りボルトの方が大きかった。断面欠損によって生ずる理論上のひずみの増加は、ひずみの一様分布を仮定すれば、孔無しの場合の1.5%(孔無しの軸部断面積が201mm<sup>2</sup>、孔径が2mmだから孔有りの断面積は198mm<sup>2</sup>。ひずみの一様分布を仮定すればひずみの比は断面積比の逆数となり、201/198=1.015)である。

図-7(a),(b)に解析による孔有りボルトのひずみゲージ位置断面でのひずみの分布状態を示す。(a)図は首下長さ85mmの場合、(b)図は60mmの場合である。横軸は表面からの距離を示す。図中の①はねじ部が弾性

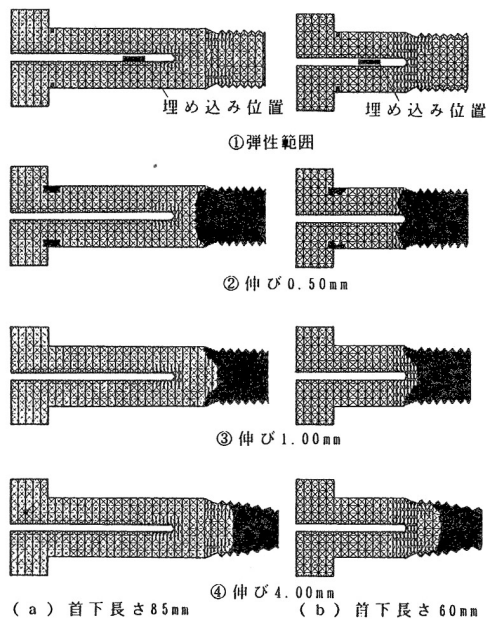


図-8 塑性域進展状況(解析結果)

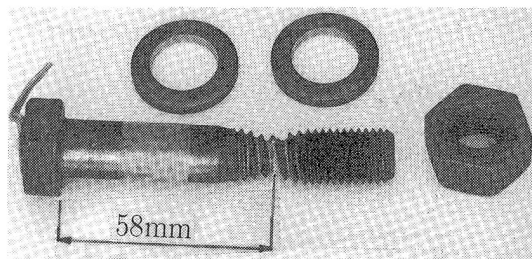


写真-1 ボルトの破断状況

範囲内の状態、②は最大荷重付近で伸びが0.5mmの時、③は伸びが1mmの時、④は伸びが4mmの時の状態である。首下長さ85mmのボルトのひずみゲージ位置断面の場合は、伸びの状態によらず一様な応力分布を示している。首下長さ60mmのボルトの場合は、ねじ部が孔に近く塑性化の影響を受け易いにも拘らず②に示す最大荷重付近で軸部中心の方が軸部表面より約2%ひずみが大きくなるにとどまった。孔無しボルトの場合も、ひずみ分布状況は、ここに示した孔有りボルトの場合とほぼ同じであった。

孔無しボルトの場合は、表面に貼付したゲージより得られたひずみの平均値が、軸部断面での平均ひずみを示していると仮定してよい。

埋め込みゲージを用いる場合には、埋め込みゲージより得られたひずみ値を孔の断面積を減じた軸部の断面内の平均ひずみと見なしてよい。

### (3) 塑性域と変形

図-8(a),(b)は、首下長さ85mmと60mmのボ

ルトを示し、それぞれ4段階に、塑性域進展状況と変形を示している。図中の記号①～④は、図-7の場合と同じである。黒く塗った部分は塑性域である。

首下長さ 85 mm のボルトは、塑性域が孔に達していないのに対し、首下長さ 60 mm のボルトは、孔の最深部が塑性域に達しているのがわかる。しかし、孔の底部とゲージ中心との間隔が 8 mm あるため、60 mm のボルトでもゲージから塑性ひずみを拾うことはない。ゲージ位置での応力分布は図-7 に示したとおりである。

写真-1 に、ボルトの破断状況の一例を示した。

### 6. おわりに

比較的首下長さが短いボルトの場合でも、表面にゲージを貼る方法、埋め込みゲージを用いる方法のいずれを用いても、得られるひずみ値を軸部の平均ひずみであると見なすことができることを示した。上記の方法は、すでに広く用いられていると思われるが、その妥当性を十分に説明するような研究は行われていなかったため、ここに検討の結果を報告した。

さらに、図-5 および付録に示したように、ナット内に隠れたねじ部および座金の変形は、ボルトセット全体の伸び挙動に大きく影響することも、ボルトの伸び剛性を評価する上で重要である。

**謝 辞：**有益なご助言を頂いた武蔵工業大学 西脇威夫教授ならびに皆川勝講師に謝意を表します。また、伊東高士君（平成3年卒、現・三菱建設勤務）に、実験と解析の実施に対して協力を得た。謝意を表します。

### 付 録

図-3 の変位計によって測定されたボルトの伸び量の中には、ナット内に隠れたねじ部の山と谷の複雑な接触による変形と座金の変形の影響も含まれている。そこで、高力ボルト（JIS規格 F10T, M16）のねじ部に相当するねじを全長にわたって切った全ねじ棒の引張試験を行い、ナット内部のねじ部の変形が、ボルトの引張挙動に及ぼす影響を調べた。全ねじ棒を図-1 に示すような直列ばね系にモデル化し、ナット内に隠れたねじ部の変形・接触および座金の変形による見かけの剛性  $k_e$  を評価した。

図-1 に示す引張治具を用いて単純引張荷重を加し、最大荷重を越えるところまで加力した後破断させずに除荷した。伸びの測定は、治具両端に取り付けた変位計（1/500 mm）で行った。

図-1 のモデルによると、

$$K_l = \frac{k_r \cdot k_e / 2}{k_r + k_e / 2} \tag{A1}$$

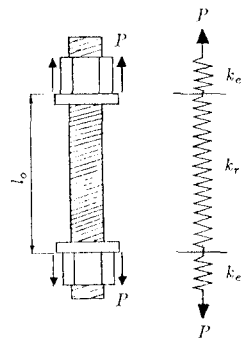


図-A・1 ねじ棒の直列ばねモデル

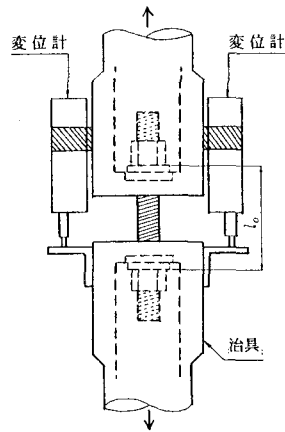


図-A・2 引張試験

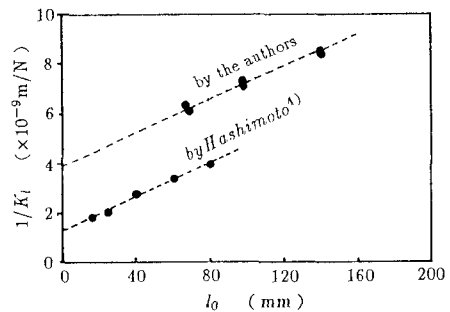


図-A・3  $1/K_e-l_0$  関係

$$k_r = \frac{EA}{l_0} \tag{A2}$$

式 (A1), (A2) より

$$\frac{1}{K_l} = \frac{1}{EA} \cdot l_0 + \frac{2}{k_e} \tag{A3}$$

ここに、 $K_l$  は実験結果より得られる（変位計によって直接得られる）剛性、 $l_0$  はナット間の距離（図-1）、 $k_r$  は長さ  $l_0$  のねじ棒の純粋な剛性、 $EA$  は単位長さのねじ棒の伸び剛性、 $k_e$  はナット内に隠れたねじ部の変形・接触および座金の変形による見かけの剛性を示す。

式(A3)は、 $1/EA$ 、 $2/k_e$ を定数とする1次式である。 $l_0$ を変化させた実験データを用いて最小二乗法によりこれらの定数を求めた。縦軸に $1/K_1$ を横軸に $l_0$ をとったグラフを図-A・3に示す。グラフの切片が $2/k_e$ である。橋本の実験結果<sup>4)</sup>から得られた $k_e$ を $k_e'$ として、本実験による $k_e$ と併せて示す。

本報告の実験による $k_e=0.51$  (GN/m)

橋本の実験による $k_e'=1.57$  (GN/m)

本実験の $k_e$ と橋本の実験による $k_e'$ とを比較すると、後者の方が大きくなっている。橋本の実験では、ねじ切りを行った治具が両端に用いられ、ねじ棒は直接治具にねじ込まれており、規格のナットは用いていない。したがって、上記の $k_e'$ は、治具内に隠れたねじ部の変形・接触による見かけの剛性を示している。それに対し、本実験の場合は、座金とナットを用いているため、 $k_e$ には、座金の変形の影響も含まれている。

したがって、両者の差は、主として座金の影響と考えられるが、さらに母材のボルト孔(治具のボルトを通す孔)の大きさによっても座金の変形特性が変化するので、これによっても $k_e$ の値は変化すると思われる。

ここで、規格のナットのみによる見かけの剛性と、橋本の治具による見かけの剛性とが近似的に等しいと仮定すれば、座金のみで見かけの剛性 $k_{washer}$ は、

$$k_{washer} = \frac{k_e \cdot k_e'}{k_e' - k_e} \quad (A4)$$

本報告のボルトの引張試験の場合は、ボルト頭側にナット側と同じ座金を用いているので、ナット一つと、座金二つ分の剛性を考慮して補正を行えばよい。図-5の伸び量の補正は、次式に示す $k_c$ を用いて行っている。

$$k_c = \frac{k_e \cdot k_{washer}}{k_e + k_{washer}} \quad (A5)$$

ここで、 $u$ を変位計によるボルトの伸び量、 $P$ を作用荷重とすると、補正後のボルトの伸び量 $u_r$ は、

$$u_r = u - P/k_c \quad (A6)$$

#### 参 考 文 献

- 1) 西村昭・田井戸米好・穂積重臣・三谷哲夫：高力ボルト締付け力の測定方法について、土木学会第22回年次学術講演会概要集I, pp.183-1~183-2, 1967.
- 2) 橋本篤秀・松下一郎・守谷一彦：ナット回転法に関する実験的研究(その10) F10T高力ボルト円筒部の荷重-歪関係、日本建築学会大会学術講演概要集(北海道), pp.1233~1234, 1978.9.
- 3) 黒田充紀・増田陳紀・坂元 剛・西畑進二：局所的ひずみ集中をともなう大変形問題解析における要素分割の影響についての一考察、第15回構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, pp.175~180, 1991.7.
- 4) 橋本篤秀：ナット回転法に関する実験的研究(その11) F10T全ネジ棒の荷重-変位関係、日本建築学会大会学術講演概要集(北海道), pp.1235~1236, 1978.9. (1991.6.17 受付)

## ON VALIDITY OF TWO MEASUREMENT METHODS OF AXIAL STRAIN IN BOLT SHANK

Mitsutoshi KURODA, Wataru HIROHASHI and Nobutoshi MASUDA

It is assumed that the strain value obtained from wire strain gages is the average value in the section, when we measure the axial force in a high-strength bolt. In this paper, the validity of the assumption is confirmed by experiments associated with analyses. Then, investigated is the effectiveness of the measuring method which a strain gage is set and bonded at inside of a small deep hole drilled in the center of the shank from head. The effects of the hole on the mechanical behaviours of the bolt loaded in tension is examined. It is shown that the bolt axial force can be accurately measured even if the length of bolt shank is relatively short.