実機稼働時におけるねじのゆるみ
および強度評価に関する研究*
(第1報, ゆるみの絶対的評価法について)

晴山 蒼一^{*1}, 浜田 秀樹^{*1}, 石丸 源一郎^{*2}

Self Loosening and Strength Estimation of
Bolted Joint under Machine Operation
(1st Report, Absolute Estimation on the Self Loosening)

Soichi HAREYAMA, Hideki HAMADA, and Genichiro ISHIMARU

Many papers have been published on the self loosening of bolted joints, making estimations of the lock effect from laboratory tests using a loosening test machine. However this kind of test method is only effective for the comparison of locking devices. In this paper we propose a method for estimating the absolute lock effect during actual machine operation. The authors found that there is a linear relation between axial tension and the time after the tightening on a log-log scale, in both static and dynamic loosening. Based on this relation, the authors propose a method for estimating the decrease of axial tension accurately after long hours of tightening by measuring the initial behavior.

Key Words : Fixing Element, Bolted Joint, Self Loosening, Absolute Estimation, Lock Effect, Machine Operation

1. 緒言

機械構造物などに使用されているねじの適正締付け状態とは、外力が加わっても破損しない程度に十分に高い軸力で締付けられた状態で、稼働中に破損あるいはゆるみ等を起こさないこととされている。筆者らは先に、トルク法によるねじ締付けにおける軸力分布状態を数学的・確率統計的な数値として示す方法を開き出すとともに、信頼限界だ円を用いてより合理的に締付けトルクを決めることができることを示した。更に、この方法を利用すれば従来より高い初期締付け軸力を得ることを示した⁽¹⁾。

さて、一方ねじトラブルについては、ユニカーのジョイントルートマップに見るように⁽²⁾、その形態は疲労破壊と自己弛緩(ゆるみ)であり、その原因は設計ミスあるいは締付け不足とされている。有吉らのねじトラブルの形態別整理でも、ゆるみ60%・折損28%・その他12%となっており⁽³⁾、ねじ締結体の実稼働下における信頼性評価は、おもに疲労強度面およびゆ

るみに関して検討することが肝要と考えられる。そこで、本報告ではまずねじのゆるみについて検討し、特に実機でのねじのゆるみの絶対的評価方法を提案し、産業機械・建設機械での静的ゆるみ・動的ゆるみへの適用例を通してその有用性を評価する。

2. ねじのゆるみおよびその絶対的評価について

ねじのゆるみについては、多くの解説あるいは展望があり、ゆるみ機構の解明などが試みられている⁽⁴⁾。それを北郷⁽⁵⁾は、a) ボルトとナットが相対的に回転して生じるゆるみ、b) ボルトとナットが相対的に回転せずに生じるゆるみ、の2種類の機構に大別して整理している。

また、ゆるみの評価については、各種ゆるみ止め装置の評価としてゆるみ試験機を用いた評価結果などが報告されている^{(6)~(8)}。しかしながら、これらの評価法は各種ゆるみ止め装置の実験室的な性能の評価であり、定性的な評価に加え定量的に各種ゆるみ止め装置のゆるみ防止性能を相対比較までできるようになってきてはいるが、実機においてねじがゆるまずに所期の機能をはたすか、あるいはある期間経過後初期の機

* 昭和63年3月31日 第65期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和62年8月24日。

^{*1} 正員、東洋運搬機(株)技術研究所(〒301 竜ヶ崎市長市3)。

^{*2} 准員、東洋運搬機(株)技術研究所。

能をどの程度保持しているか、というような絶対的な評価を行ない得るものではなかった。実機稼働時におけるねじのゆるみの評価は、この絶対的な評価が不可欠である。

図1は、建設機械のディスクホイールを取付けるためのハブボルトについて、走行を主体とする荷役作業の社内試験パターン下でのボルトの締結軸力の低下傾向をボルト軸部にはったひずみゲージにより調査した結果である。図には2種類のディスクホイールについて軸力変化を示してある。横軸は作業パターンの繰返し数をとっている。この例にみるように、一般にねじのゆるみは曲線的であり、締付け初期あるいは稼働初期には大きくゆるむがしだいにその程度は小さくなる傾向にあると思われる。

図2は、同じデータを両対数紙にプロットしたものであり、データが直線的な漸減傾向として示されることが分かる。図3は、日本ねじ研究協会が行なった軸直角振動ゆるみ試験の結果を⁽¹⁾前例と同様に両対数紙にプロットしたものであり、やはり直線的な漸減傾向を示すことが分かる。これらの図から測定したボルトの軸力の変化は、式(1)あるいは式(2)で近似することができるようである。

$$\log R = A' + B' \log N \quad \text{-----(1)}$$

$$\log R = A + B \log H \quad \text{-----(2)}$$

ここで N:作業パターン繰返し数 (cycle)

R:(測定時の軸力)/(初期軸力)

A, B, A', B':定数

H:稼働時間(hour)

本報告で提案するねじのゆるみの絶対的評価法は、締付け後あるいは稼働後のねじ軸力が式(1)のように線形な関係を示す特性を利用するもので、たとえば実機開発の初期に比較的短期間の軸力測定の結果から、長期稼働後のゆるみの程度を評価しようとするものである。なお、ゆるみの程度の評価基準は、ねじを強度部材として使用する場合には、おもに使用期間中の負荷・ねじ自身の疲れ強さを考慮し、また気密性などが要求される場合は、被締結部材間の最低面圧などを考慮して、耐用時間経過後の必要軸力を求めるなどして、対象とするねじの機能に応じた判定基準が必要である。

上述の方法は、あくまでも経験則的なものであり、ねじのゆるみ機構などのゆるみのメカニズムの本質に迫ったものではないが、いまだねじのゆるみの絶対的評価法がない状況においては、特に工業的にはきわめて有効な方法と考え、その有用性・特性などについて、初期ゆるみなどの静的ゆるみと実機稼働時の動的ゆるみの両面から検討を加えることにした。

3. 静的ゆるみの評価

本章では産業機械のディスクホイール取付けに用いられるハブボルトゆるみ評価の一環として行なった締付け直後の静的なへたり・かんばつなどによるゆるみ測定を例に、本報告の考え方の有用性を静的ゆるみ問題について検討する。

図1 実車における軸力の変化 (真数表示)

図2 実車における軸力の変化 (両対数表示)

図3 軸直角振動ゆるみ試験 (両対数表示)

3・1 供試品 供試ボルトは、産業機械用の合わせリム形式のディスクホイール取付用ハブボルト（以下単にハブボルトと呼ぶ）で、その取付関係を図4に示す。

3・2 実験方法 実験は、図5に示すようにハブボルト軸部にはったひずみゲージによる軸力測定によった。ディスクホイールは台上に固定したハブに8本のハブボルトを用いて固定した。ハブボルト8本のうち2本のハブボルトで軸力測定を行なった。ひずみ測定は万能デジタル測定器〔UCAM-8BL, (株)共和電業製〕を用いて2ゲージ法により静的に行なった。各ハブボルトの軸力-ひずみ関係は、実験に先だち引張試験により求めた。ゆるみの測定は、規定締付けトルク（乾燥 $715 \text{ N} \cdot \text{m}$ ）で締付けた直後からの軸力の経時変化によった。

3・3 実験結果とその考察 図6は、締付け直後からの軸力の経時変化の測定結果である。図1の例と同じような軸力の低下傾向を示している。図7は、これらのデータから180分までのデータを面対数紙にプロットしたもので、図2あるいは図3と同様により線形関係を示している。

表1は図7のデータから長時間経過後の軸力を回帰直線から推定したものである。表中のa欄は、締付け5分後から30分までの5分毎のデータを用いて式(2)による回帰直線を求め、約10時間後以降40時間までの10時間毎の軸力の推定値を求め、図6に示した実測値と比較したものである。b欄はa欄と同様5分後から60分までの5分毎のデータを、c欄は30分後から180分までの30分毎のデータを用いて比較したものである。いずれの推定値も高い精度で推定できることが分かる。特にa欄の30分までのデータで40時間経過後、すなわち測定時間の30倍先の推定

値でも3%以内の誤差であり、式(1)または式(2)を用いた面対数紙での回帰による長時間経過後のゆるみの評価、すなわち軸力低下レベル推定法がきわめて有用であることが分かった。

4. 動的ゆるみの評価

本章では、本報告で提案したねじゆるみの絶対的評価法を、建設車両のアクスル部材取付ボルトに適用し、実験稼働時の動的な環境下でのゆるみの評価における有用性を検討する。

図5 ハブボルト ゲージ接着位置

図6 軸力の経時変化（真数表示）

図7 軸力の経時変化（面対数表示）

図4 ディスクホイール部の構造

4・1 供試品 図8は、タイヤ式建設機械（ホイールローダ）のアクスル部で減速機・ブレーキ装置などをそなえた構造となっている。本報告では図中のハブボルト・アクスルフランジボルトおよびデフケースボルトについて実験を行った。

4・2 実験方法 ボルトのゆるみ測定は磁気軸力計〔（株）芝浦製作所製（MTM-2A）〕による軸力測定によった。実験は、開発段階の試作車を実験車として用い、耐久試験時にある時間間隔で軸力測定を行なって、軸力の低下傾向を測定した。なお、軸力測

表1 長時間経過後の軸力推定

	Measure- ment	BOLT A			Measure- ment	BOLT B		
		Estimate				Estimate		
		a	b	c		a	b	c
		5~30min every 5min	5~50min every 5min	50~180min every 30min		5~30min every 5min	5~50min every 5min	50~180min every 30min
r	—	-0.998	-0.997	-0.979	—	-0.997	-0.998	-0.996
A	—	2.0023	2.0024	2.0054	—	2.0035	2.0040	2.0072
B	—	-0.00575	-0.00577	-0.00753	—	-0.00950	-0.00999	-0.01200
R	11 hour	95.81%	95.86%	95.86%	94.10%	94.77%	94.59%	94.05%
	20	96.07	96.53	96.52	95.94	93.89	94.23	94.33
	30	95.35	96.30	96.30	95.65	93.22	93.38	93.85
	40	93.33	96.14	96.14	95.44	92.08	93.82	92.80
ERROR	11 hour	—	1.10%	1.10%	0.80%	—	0.71%	0.52%
	20	—	0.48	0.47	-0.14	—	0.36	0.15
	30	—	1.00	1.00	0.32	—	0.71	0.48
	40	—	2.41	2.41	1.58	—	1.70	1.43

r: Correlation Coefficient

R: (Axial Tension) / (Initial Axial Tension)

図8 タイヤ式建設機械のアクスル部

図10 実機稼働時のゆるみ測定（対数表示）

図9 ショベルダンプ作業時のアクスル部負荷波形

定は、車両停止から十分な時間経過後に、測定部位が常温となった状態で行なった。

4・3 実験結果とその考察 実験は、ホイールロードの代表的作業であるショベルダンプ作業で行なった。図9は、作業時にタイヤなどに加わる負荷波形を作業1サイクルについて測定したもので、耐久試験はこのような作業の繰返しで行なった。図10は、実機稼働時のゆるみ測定結果を、A機種とB機種について面対数紙にプロットしたものである。図2あるいは静的ゆるみと同様に軸力は直線的な漸減傾向を示している。実験が実機であり静的ゆるみのようなきめ細かい実験ができず、静的ゆるみのような考察はできなかったが、要はねじに加わる負荷あるいはゆるみの現象が静的であれ動的であれ、軸力の低下傾向が面対数紙上で線形関係にあることさえ分かれば、締付け初期の軸力変化の測定から長時間経過後の軸力値を推定できるものと考ええる。

一方、ゆるみの評価については本報告では言及しないが、たとえば佐々木らは軸力変化を4種類の代表的傾向に分類して⁽²⁰⁾ゆるみ試験の結果を評点法によって整理している。この種の試みはゆるみの判断基準作りによる示唆を与えるものと考えている。

5. 結 言

実機稼働時におけるねじのゆるみおよび強度評価に関する研究の一環として、本報告では実機稼働下のねじゆるみの絶対的評価法について検討した。その結果、軸力の低下率と経過時間のデータを面対数紙上にプロットすると、静的ゆるみおよび動的ゆるみともよい線形関係にあることが分かった。また、この線形関係を用いて長時間経過後の軸力低下率を精度よく推定できることを静的ゆるみの実験結果を用いて明らかにした。

本報告では、ゆるみ評価基準については触れなかったが、筆者らはそれを経験的に設定し、本方法を実機開発段階のねじゆるみ評価法として実用化している。

最後に、本研究にあたりご指導・ご助言をいただいた東京都立大学・児玉昭太郎教授に深く感謝する。

文 献

- (1) 晴山, トルク法によるねじ締付けにおける軸力管理に関する研究 (第1報, ねじ軸力分布の信頼限界について)

- , 機論C, 53-495 (昭62), 2373.
 (2) G.H.エンカー, 欧米における最新ファスナー技術の現状 (4, 振動下におけるファスナーの自己のゆるみ), (1970), 34, 金属産業新聞社.
 (3) 有吉・山田, ボルトはなぜゆるむのか, プラントエンジニア, 17-6 (1985), 8.
 (4) 北郷, ボルト・ナットのゆるみについて, 機論, 30-215, 第1部 (昭39), 934.
 (5) 山本, 締結工学概論, 機誌, 78-651 (昭48), 33.
 (6) 北郷, ねじに関する研究の展望, 日本ねじ研究協会誌, 10-11 (1979), 388.
 (7) 石渡, ねじ締付けについての最近の展望, 機械の研究, 14-1 (1962), 226.
 (8) 北郷, ボルト・ナットのゆるみとゆるみ止め, 機械の研究, 14-1 (1962), 231.
 (9) 江藤・清水, 座面陥没について, 締結と接合, 27 (1980), 10.
 (10) 山本, ねじのゆるみと各種ゆるみ止め装置の評価(1), ねじと技術, 10-5 (1969), 5.
 (11) 平松・菊地, ねじ締結部のゆるみ, 締結と接合, 2 (1972), 6.
 (12) 光永, ねじの締付けとゆるみ, 精密機械, 40-6 (1974), 468.
 (13) 賀勢, ねじのゆるみとその防止, 機械の研究, 37-8 (1985), 917.
 (14) 山本, ねじのゆるみと各種ゆるみ止め装置の評価(2), ねじと技術, 10-6 (1969), 23.
 (15) 中西・植田, ボルトのゆるみ防止に関する研究, 小松技報, 21-2 (1975), 1.
 (16) 酒井, ボルトのゆるみ (第1報, 軸直角荷重を受ける場合), 機論, 44-377, C(昭53), 279.
 (17) 酒井, ボルトのゆるみ (第2報, 回転荷重を受けるボルトの場合), 機論, 44-377, C(昭53), 288.
 (18) 南谷・米野, ねじ締付けにおける嫌気性接着剤の効果について, 精機学会 昭和50年度生産加工技術に関する国際会議前刷集 (PART1), (昭50), 136.
 (19) 日本ねじ研究協会, 高強度ボルトの締結性能に関する標準化のための調査研究報告書 (第Ⅲ報), (昭55), 56, 日本ねじ研究協会.
 (20) 佐々木・石橋, ボルト・ナットのゆるみ, 東京都立工業技術センター研究報告, 11 (1982), 13.