

締め付け厚の大きい高力ボルト継手の 耐力特性調査と長期挙動予測

EXPERIMENTS AND PREDICTION OF LONG TERM BEHAVIOR OF FRICTION TYPE BOLTED JOINT
WITH LONG GRIP

谷平 勉* 石原靖弘** 指吸政男***

By Tsutomu TANIHIRA, Yasuhiro ISHIHARA, Masao YUBISUI

The girder sections of plate girder bridge consisting of 2-main-girders with long span have large bending moment. Then, lower flanges of high-strength bolts connections are often assembled with several cover plates. At the joint in this research, torque shear type bolts are used. Contact surfaces are applied by thick inorganic zinc-rich paint. And total thickness of connection flange is 250mm. Slip coefficient and decreasing bolts tension were surveyed during one year. Reliability indexes are analyzed by those data for the prediction of long-term behavior. In result we obtained enough small probability of slip generation on 100 years under same load conditions.

1. まえがき

大阪市が建設中の木津川新橋（仮称）左岸側アプローチ部は、支間長 107.5m と国内では最大規模の 4 径間連続鋼床版 2 主桁橋である。2 主桁橋は腹板の数が少ないため、一般に他の橋梁と比べて経済的であるとされているが、1 主桁当りの曲げモーメントが大きいため、その下フランジ断面は数枚のカバープレートを重ね合わせた形式とする場合が多い。本橋の下フランジ断面も幅 1200mm、板厚 25mm の鋼板をベースとして、数枚のカバープレートを一体化しており、その現場継手は太径 (M24) で、かつ締め付け厚の大きい高力ボルト摩擦接合である。継手部の断面図を図-1 に示す。

これに類似した継手の力学的性状は過去に調査されたものがあるが¹⁾、本橋の場合、以下の点が異なっている。すなわち、1) 施工性、美観上よりトルシア型高力ボルトを使用すること、2) 締め付け厚が過去の実績をこえていること、3) 架設までの防錆の必要性から添接面に厚膜型無機ジンクリッチペイントを塗布していること、等である。また、このような継手の経年耐力を調査した例も見あたらない。

一般に、接触面が多く、かつ塗装を施された継手ではボルト軸力の低下が通常の継手に比べて大きいと予測され、道路橋示方書²⁾（以下道示という）に規定されている施工時の増し締め相当分（10%）より低下

* 工博 近畿大学教授 理工学部土木工学科 (〒577 東大阪市小若江 3-4-1)

** 片山ストラテック（株）橋梁設計部 (〒551 大阪市大正区南恩加島 6-2-21)

*** 工修 大阪市建設局 土木建設事務所 (〒550 大阪市西区江戸堀 3-1-31)

し、設計軸力を下回る恐れがある。従って、このような継手の経年的な耐力特性を調査するとともに、将来的な挙動を予測することを試みた。

そこで、高力ボルト摩擦接合の耐力を決定付ける2大要素であるすべり係数とボルト軸力を経時的に調査するとともに、将来予測の一手法として、これらのデータを用いた信頼性解析を行い安全性の検討を行った。ここでは、ボルト軸力の低下を抑制する締め付け方法も種々検討したので、併せて報告する。

2. すべり試験

2. 1 すべり試験の目的

本橋は部材製作後、架設までの期間がかなりあることから継手部の防錆を考慮して、無機ジンクリッチペイント（目標膜厚70μ）を塗布している。無機ジンクを塗布した場合のすべり係数については本四公団を中心に調査されているが、本橋の場合、添接板が上下とも2枚に分かれており添接面が通常の継手より多くなることや、締め付け厚が大きいことも問題であった。そこで、供試体（3体）を用いて引張試験を行い、すべり係数を確認した。

2. 2 供試体の形状および測定項目

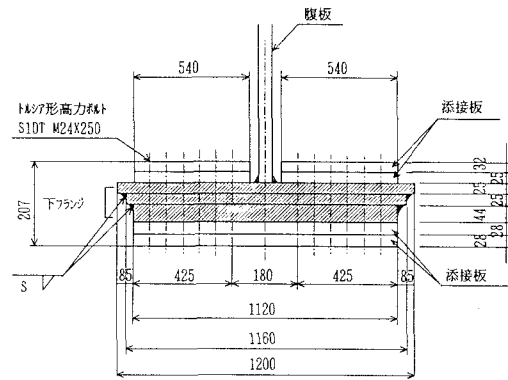
図-2に供試体の形状寸法を示す。供試体は実際の構造とは若干異なるが、すべり係数に影響を与える要因として添接面数および締め付け厚を合わせたもので、実部材と同様ジンクリッチペイントを塗布した。

また、ボルト締め付け後1年間放置した同一形状の供試体を用いて引張試験を行い、すべり係数の経時的な変化を調査した。

測定項目としては、すべり荷重、ボルト軸力その他、塗膜厚、摩擦面の接触状態（感圧紙使用）等である。

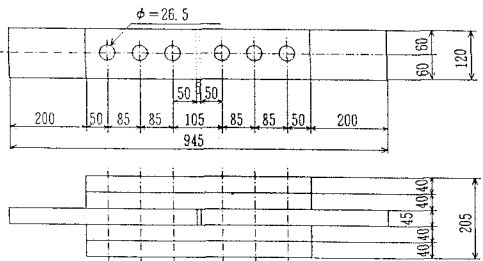
2. 2 試験結果

試験結果を表-1に示す。同表から、すべり荷重を初期導入軸力で除したすべり係数 μ_1 は、ボルト軸力導入1日後と1年経過後で0.632から0.589へと変化しているが、すべり荷重をすべり発生時の軸力で除したすべり係数 μ_2 （本来の摩擦係数に近い）は、1年経過後も約0.69とほとんど変化していない。むしろ、3体の値のばらつきが無く安定するようである。なお、これらの値は道示の規定値0.4を大きく上回っている。



(単位：mm)

図-1 実橋下フランジ継手の断面形状



(単位：mm)

図-2 すべり試験用供試体の形状・寸法

表-1 すべり試験結果

ボルト締め付け後の経過時間	供試体記号	ボルト等級サイズ	導入軸力 (tonf)		摩擦面数	ボルト本数	すべり荷重 (tf)	すべり係数値			
			締付直後 (N1)	試験前 (N2)				μ_1	μ_1	μ_2	μ_2
1 日後	NO.1	F10T M24x250	27.9	26.2	2	3	115.2	0.688	0.632	0.733	0.691
	NO.2		27.9	25.3			96.8	0.578		0.638	
	NO.3		26.4	23.7			99.8	0.630		0.702	
1 年後	NO.A	F10T M24x250	26.0	22.3	2	3	92.4	0.592	0.589	0.691	0.695
	NO.B		26.5	22.4			94.0	0.591		0.699	
	NO.C		25.1	21.1			87.8	0.583		0.694	

3. 軸力低下抑制効果実験

3. 1 実験の目的

前述のように、本橋下フランジ継手は一般のプレートガーダーと比べて特殊な断面形状をしている。特に断面的に見てカバープレート側面をすみ肉溶接で一体化した重ね合わせフランジ構造は拘束度が大きく、鋼板間のなじみの問題からボルト軸力の経時的な減少が懸念される。また、無機ジンクリッチペイントを塗布した場合、塗膜のクリープも軸力低下の要因となる。

通常、ボルト軸力の経時的な減少は数パーセントと言われており、道示ではこのようなことも考慮して設計軸力の10%増しで締め付けるよう規定している。

本橋では10%以上の軸力低下が予測され、設計軸力を下回ることも考えられたので、軸力低下抑制効果の高いボルト締め付け方法を実験的に種々検討した。また、併せてボルト軸力の経時変化に関するデータも収集した。

3. 2 軸力低下抑制方法

通常の施工では仮ボルト（全ボルトの1/3程度）に普通ボルト（材質4T）を用い、予備締め1回で締め付けられる。今回、この仮ボルトに高力ボルトを用い、予め高軸力で締め付けることにより板のなじみや塗膜のクリープを促進させ、本ボルトの軸力低下を抑制する効果に着目した。

比較実験ケース一覧表を表-2に示す。ケース1は通常の施工方法であり、ケース2～5はいずれも仮ボルトに高力ボルトを用いている。比較項目として、ケース1～3は仮ボルトの導入軸力の相違、ケース4は仮ボルト本数の全体本数に対する比率の相違、ケース5は予備締め回数の相違を調べるためのものである。

3. 3 実験に用いた継手

実験は、製作後架設時まで保管中の実橋継手（図-1参照）を用いて行い、架設時期に合わせて半年から1年3カ月まで長期計測を行った。継手の平面的なボルト配置を図-3に示す。図中、①～⑫が軸力を測定したボルト、●が仮ボルトである。

軸力測定方法としては、ボルト幹部にひずみゲージを貼付し、測定したひずみから軸力を推定する方法を用いた。なお、今回の実験ではボルト軸力の他に、塗膜厚およびボルト締め付け前後の部材厚の変化も測定している。

3. 4 実験結果

ひずみゲージを貼付した12本のボルトの平均軸力の変化を各ケースについて図-4に示す。ボルト軸力は締め付け後、約1時間で急激に減少した後、時間の対数に比例して緩やかに減少を続ける。減少傾向は各

表-2 比較実験ケース一覧表

試験ケース	1	2	3	4	5
比率(%)	30%	30%	30%	40%	30%
ボルトの種類	普通六角ボルト 4T	高力六角ボルト F10T	高力六角ボルト F10T	高力六角ボルト F10T	高力六角ボルト F10T
締め付け方法	トルク法 60%	トルク法 80%	耐力点検出法 100%	耐力点検出法 100%	耐力点検出法 100%
本ボルトの種類	TCボルト F10T	TCボルト F10T	TCボルト F10T	TCボルト F10T	TCボルト F10T
予備締め回数	1回 80%	1回 80%	1回 80%	1回 80%	2回 60%, 80%
計測期間	1週間	1年3ヶ月	6ヶ月間	1年3ヶ月	6ヶ月間
備考	通常の施工方法	仮ボルトに高力ボルトを使用	仮ボルトを耐力点検出法で締め付け	仮ボルトの比率を40%にアップ	本ボルトの予備締めを2回に

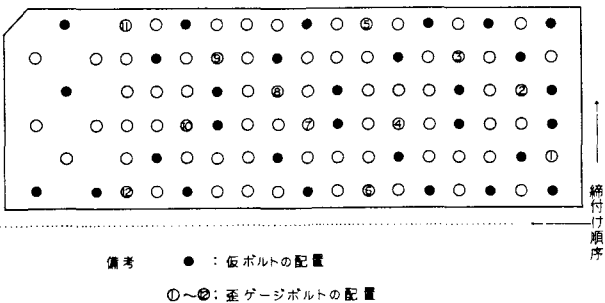


図-3 実橋継手のボルト配置

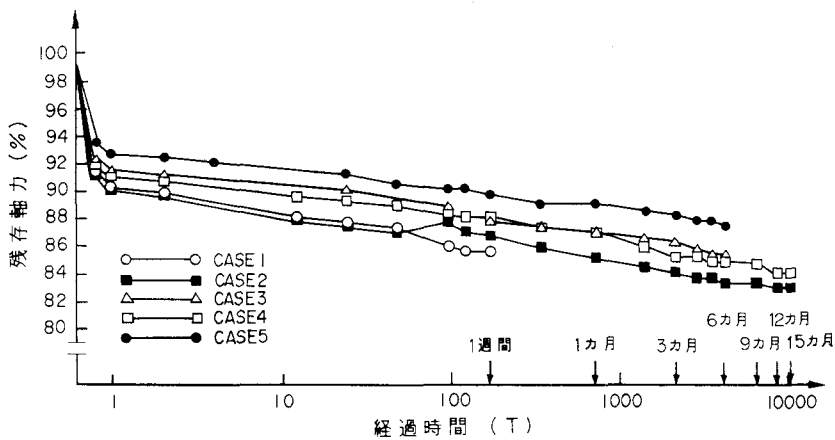


図-4 ボルト軸力の経時変化の比較

ケースともほぼ等しいことがわかる。これは、鋼板間のなじみに起因するボルト軸力減少の大部分が締め付け後短時間で収束し、それ以後は主として塗膜のクリープとボルト自体のリラクセーションが要因で軸力低下が進行するものと考えられる。

軸力抑制効果を6カ月経過時で比較すると、仮ボルトに普通ボルトを用いたケース1と高力ボルト（トルク法）を用いたケース2とはほとんど変わらなかったが、高力ボルト（耐力点検法）を用いたケース3ではこれらに比べ軸力低下率が約2%少ない。また、本ボルトの予備締めを2回行うケース5では、さらに約2%少ない。なお、仮ボルト本数の比率を増加させたケース4は、ケース3とほとんど変わらず、効果的ではなかった。

以上より、本橋の架設では、軸力低下率の最も少ないケース5の締め付け方法を採用した。

4. 信頼性解析

4. 1 概要

実験の結果、本橋継手のボルト軸力低下量は通常の継手より大きく、10%を超えることがわかった。すべり係数が大きい継手耐力としては問題ないと考えられるが、その将来に亘る長期挙動を予測するとともに、安全性を確認しておくことが必要であると考えられた。そこで、実験データを基に経年劣化モデルを作成し、信頼性解析を行った。

4. 2 解析条件

4. 2. 1 すべり係数

図-2に示すような供試体を作成し、ボルト締め付け直後のすべり係数を確認するとともに、締め付け後1年間経過した時点のすべり係数も調査した。試験結果は表-1に示した通りである。

すべり荷重をすべり発生時のボルト軸力で除したすべり係数 μ_2 は、締め付け直後および1年経過後も約0.69とほとんど変化しなかった。一般に、プラストを施しただけの継手では経年的にすべり係数が増大すると言われているが、無機ジンクリッチペイントを塗布した継手ではすべり係数の増加は期待できないと考えられる。

文献3)によれば、ジンクリッチペイントを塗布した継手のすべり係数は暴露期間に関係なく平均値0.47、変動係数10%となっているので、今回のデータは若干高めである。

すべり係数については施工条件によっても異なり、またその経年的な変化も明確にはされていないので、

表－3 ボルト軸力測定結果（ケース5）

ボルト番号	締付直後	1時間後	1日後	1週間後	1カ月後	3カ月後	6カ月後
1	27.1	26.0	25.7	25.6	25.4	25.2	25.0
2	25.9	24.0	23.7	23.4	23.2	23.0	22.8
3	26.0	24.4	24.0	23.6	23.4	23.2	23.1
4	24.7	22.0	21.6	21.1	21.1	20.9	20.7
5	26.7	25.6	25.2	24.8	24.6	24.4	24.1
6	28.0	25.2	24.7	24.2	24.0	24.0	23.9
7	28.9	26.5	26.1	25.6	25.4	25.1	24.9
8	25.1	23.0	22.7	22.2	22.0	21.9	21.8
9	26.3	24.3	23.9	23.6	23.3	23.0	22.7
10	25.7	23.3	22.8	22.4	22.3	22.1	21.9
11	27.2	24.8	24.4	23.8	23.6	23.4	23.2
12	26.7	25.8	25.5	25.2	25.0	24.7	24.6
合計	318.3	294.9	290.3	285.5	283.3	280.9	278.7
平均	26.53	24.58	24.19	23.79	23.61	23.41	23.23
分散	1.285	1.659	1.682	1.804	1.699	1.644	1.642
標準偏差	1.134	1.288	1.297	1.343	1.303	1.282	1.281
変動係数	4.3	5.2	5.4	5.6	5.5	5.5	5.5
軸力低下率	0	7.4	8.8	10.3	11.0	11.7	12.4

注：変動係数，軸力低下率の単位は（％）

今回の解析では、すべり係数をパラメーターとして考え、0.4，0.5，0.6の3ケースとした。

4.2.2 ボルト軸力

(1) 測定結果

本橋ではボルト軸力低下を抑制する締め付け方法を種々検討し、その結果仮ボルトを高力ボルトとして耐力点検法で締め付け、さらに本ボルトは予備締め2回を行う方法（ケース5）を採用している。ケース5のボルト軸力測定結果を表－3に示す。同表および図－4から、ボルト軸力は締め付け後約1時間で急激に低下し、その後は対数グラフ上で時間の経過とともに直線的に、また緩やかに低下していく。そして、6カ月経過後の軸力低下率は12.4％であった。一方、変動係数は経年後もあまり変化せず5～6％とほぼ一定であった。

(2) 軸力低下モデル

以上の結果より、ボルト締め付け後1時間程度以上経過した後のボルト軸力は、時間の対数に比例して直線的に低下すると仮定し、軸力低下モデルを作成する。時間軸を対数目盛上にとり、軸力との関係を最小二乗法により求めると、式（1）が得られる。このとき、相関係数 r は0.996であった。

$$N_T = N_0 (1 - \phi / 100)$$

$$\phi = 7.16 + 1.40 \log (T)$$

ここに、 N_T ：T時間経過後のボルト軸力（tf）

N_0 ：初期ボルト導入軸力（tf）

ϕ ：軸力低下率（％）

T：経過時間（hour）

軸力低下率 ϕ と経過時間Tの関係を図化したものが図－5である。

4.3 信頼性評価

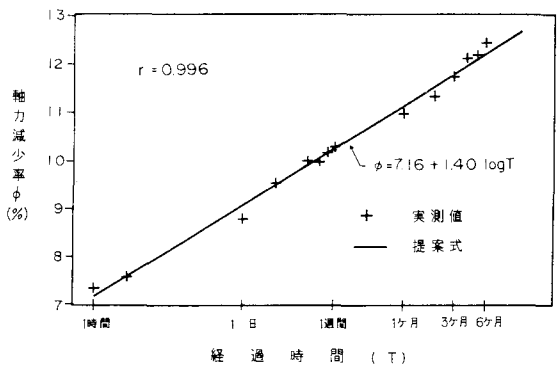
4.3.1 評価式

測定データを用いて、本橋下フランジ継手のすべり発生に対する信頼性を検討する。

T時間経過後の高力ボルト摩擦接合のすべり耐力は、すべり係数 μ とボルト軸力 N_T によって次式で表される。

$$P_s = f n \mu N_T$$

$$\phi = 7.16 + 1.40 \log T \quad (1)$$



図－5 ボルト軸力低下モデル

$$\quad \quad \quad (2)$$

ここに、 f ：摩擦面数

n ：ボルト本数

この式により、すべり発生に対する信頼性を検討するに当り以下の仮定を設ける。

①ボルト軸力は継手内で一様に分布し、各々のボルトは互いに独立である。

②初期ボルト導入軸力 N_0 および T 時間経過後の残存軸力 N_T の統計的性質は、それぞれ下式で表される正規分布に従う。

$$N_0 : N(m_{N_0}; \sigma_{N_0}^2) \quad \text{----- (3)}$$

$$N_T : N(m_{N_T}; \sigma_{N_T}^2) \quad \text{----- (4)}$$

また、締め付け後 T 時間経過後の残存軸力の平均値 m_{N_T} は、導入直後の軸力の平均値 m_{N_0} から、下式により表されるものとする。

$$m_{N_T} = m_{N_0} (1 - (7.16 + 1.40 \log T) / 100) \quad \text{----- (5)}$$

なお、ボルト軸力のばらつきは経年的に不変とすれば、 T 時間経過後のボルト軸力は次の正規分布に従う。

$$N_T : N(m_{N_T}; \sigma_{N_0}^2) \quad \text{----- (6)}$$

③すべり係数の分布は正規分布に従うものとし、経年的な変化は無いものとするがパラメータとして、

$m_\mu = 0.4, 0.5, 0.6$ の3ケースを考える。

なお、すべり係数の変動係数は10%とする。

④継手の主すべりは式(7)によって得られる P_s を超える荷重が作用したときに発生する。

以上の仮定からすべり耐力も正規分布に従い、以下のように表される。

$$P_s : N(m_{P_s}; \sigma_{P_s}^2) \quad \text{----- (7)}$$

ここに、 $m_{P_s} = f n m_\mu m_{N_T}$

$$\sigma_{P_s}^2 = f^2 n (m_\mu^2 \sigma_{N_T}^2 + n m_{N_T} \sigma_\mu^2 + \sigma_\mu^2 \sigma_{N_T}^2)$$

つぎに、作用荷重に関しては設計曲げモーメントと実荷重による作用曲げモーメントの比(k とする)によって与えるものとし、例えば文献4)によれば、 k は衝撃を無視すれば平均値0.5、変動係数30%の正規分布に従うことになる。すなわち、

$$L : N(m_L; \sigma_L^2) \quad \text{----- (8)}$$

ここに、 $m_L = k P_d = 0.5 P_d$

$$\sigma_L = 0.3 m_L$$

すべり発生に対する限界状態関数 Z は

$$Z = P_s - L$$

で表され、 Z も正規分布に従い

$$Z : N(m_Z; \sigma_Z^2) \quad \text{----- (9)}$$

ここに、 $m_Z = m_{P_s} - m_L$

$$\sigma_Z^2 = \sigma_{P_s}^2 + \sigma_L^2$$

となる。信頼性指標 β を

$$\beta = m_Z / \sigma_Z = (m_{P_s} - m_L) / \sqrt{\sigma_{P_s}^2 + \sigma_L^2} \quad \text{----- (10)}$$

とすれば、継手のすべり発生確率 P_f は、標準正規確率分布関数 Φ を用いて

$$P_f = \int_{-\infty}^0 \phi_Z(Z) dz = \Phi_Z(0) = \Phi(-\beta) \\ = 1 - \Phi(\beta) \quad \text{----- (11)}$$

によって求められる。

4. 3. 2 すべり発生に対する信頼性

以上のような手順ですべり発生に対する信頼性を検討する。本橋のボルトはS10T、M24であり、設計すべり耐力は2面摩擦でボルト n 本当たり $11.2 n (tf)$ となり、荷重 L については、その平均値およ

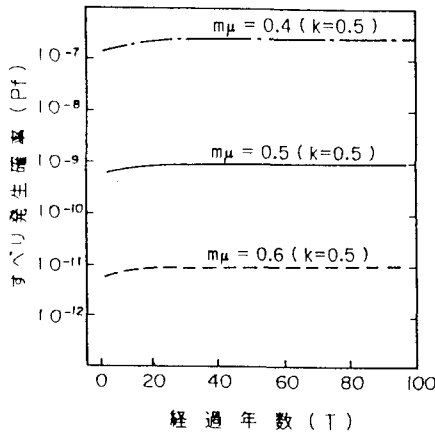


図-6 すべり発生確率の経年変化
(すべり係数 m_μ の変化に着目)

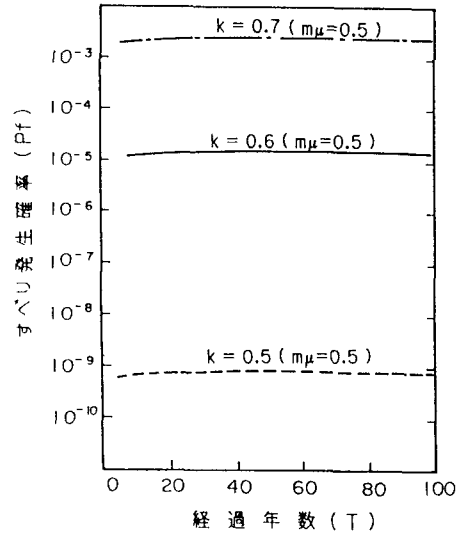


図-7 すべり発生確率の経年変化
(曲げモーメント比 k の変化に着目)

び標準偏差はそれぞれ、

$$m_L = 1.1, \quad 2nk = 1.1, \quad 2 \times 0.5n = 5.60n$$

$$\sigma_L = 0.3m_L = 1.68n$$

となる。ただし、荷重については将来的なことも考えると未知な部分が多いため、これもパラメーター的に考えて、 $k = 0.6$ および 0.7 のケースも検討する。

摩擦面数 $f = 2$ 、ボルト本数 $n = 198$ として、すべり発生確率の経年変化を示したものが図-6 および図-7 である。

図-6 は、すべり係数の変化による影響を見るため、すべり係数を 0.4 から 0.6 まで変化させたものである。ただし、 $k = 0.5$ (一定) としている。同図より、すべり発生確率はすべり係数 $m_\mu = 0.6$ で $P_f = 10^{-11}$ 程度、 $m_\mu = 0.5$ で $P_f = 10^{-9}$ 程度と非常に小さい値となっている。また、 m_μ が道示に示された基準値である 0.4 としても、 P_f は 10^{-7} 程度であり問題となるような数値ではない。

図-7 は、すべり係数を一定 ($m_\mu = 0.5$) として、曲げモーメント比 k を 0.5 から 0.7 まで変化させたものである。同図から、 $k = 0.5$ ではすべり発生確率 P_f は 10^{-9} 程度で問題になるようなオーダーではないが、 $k = 0.7$ では P_f は 10^{-3} 程度とかなり大きくなり、 k 値がすべり発生確率 P_f に及ぼす影響が大きいことがわかる。文献5)によれば、一般のボルト継手のすべり発生確率は 10^{-5} 程度と言われており、現時点で $k = 0.7$ という数値は考え難いものの、今後交通事情の変化等で主桁の作用曲げモーメントが大きくなると、継手の安全性に問題が出てくることになる。

5. まとめ

締め付け厚の大きい2主桁橋の下フランジ継手の耐力特性を明らかにし、その安全性を検討するにあたり供試体を用いたすべり試験および実橋継手部を用いたボルト軸力の測定を長時間継続し、継手すべり耐力の統計的性質や経時変化に関するデータを得た。

また、これらのデータを解析条件として信頼性解析を行った。その結果をまとめると、以下ようになる
(1) すべり荷重をすべり発生時のボルト軸力で除したすべり係数は、経過時間に関係なく約 0.69 と一

定であった。

- (2) 軸力抑制効果が最も高いのは、仮ボルトを高力ボルト（耐力点検出法）とし、本ボルトの予備締めを2回行う工法であった。本橋の施工では、この工法を採用した。
- (3) ボルト軸力は、締め付け後約1時間で急激に低下し、その後は経過時間とともに時間の対数に比例して緩やかに減少して行く。
- (4) T時間経過後のボルト軸力 N_T は、初期ボルト導入軸力 N_0 と時間の関数で表される軸力減少率 ϕ を用いて定式化できる。
- (5) すべり係数 m_μ を0.4～0.6と変化させてすべり発生確率を求めたが、100年経過後でもすべり発生確率 $P_f = 10^{-11} \sim 10^{-7}$ 程度と十分安全なオーダーであった。特に、本橋のすべり試験では $m_\mu = 0.69$ という値を得ており、安全性に問題はない。
- (6) 設計曲げモーメントに対する実曲げモーメントの比 k を0.5～0.7と変化させて、すべり発生確率を求めたが、 $k = 0.7$ 、 $m_\mu = 0.5$ の場合、 $P_f = 10^{-3}$ 程度とすべり発生確率が高くなる。

現時点でこのような状態は考えにくいが、将来的には留意すべきであろう。

最後に、実験にあたり、本橋の施工会社である日本鋼管（株）、高田機工（株）、（株）栗本鉄工所、ならびにボルトメーカーの三星産業（株）の関係各位には大変お世話になった。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 近藤和夫・井上洋里・加藤隆夫・佐々木茂範：新十三大橋の工事，橋梁と基礎，2-3，PP.31-38，1968.3
- 2) （社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説，平成2年2月
- 3) 山本善行・久保操：接合面にジンクリッチペイントを塗装した摩擦接合継手の滑り試験，橋梁と基礎，78-3，PP.14-18，1978.3
- 4) 国広哲男：土木試験所資料，NO.701，1971
- 5) 西村昭：高力ボルト摩擦接合のすべり荷重の統計学的考察，土木学会論文報告集，NO.188，PP.17-22，1971.4

（1992年9月21日受付）