

# 鋼板両面に補強部材を連結する特殊ナットの開発

## DEVELOPMENT OF SPECIAL NUTS TO JOINT REINFORCEMENT PARTS TO BOTH SURFACES OF STEEL PLATE

吉岡 夏樹\* 橋 肇\*\* 高尾 智之\*\*\* 重田 光則\*  
 Natsuki Yoshioka Hajime Tachibana Tomoyuki Takao Mitsunori Shigeta

鋼橋の補修補強工事では、新設部材を既設部材の両面に取り付けることが想定され、効率的に補強部材を取り付ける工法が求められている。そこで新工法として既設部材に対して1つ目の補強部材を高力ボルトと新開発の特殊ナットで連結した後、2つ目の補強部材をナット側から汎用品の高力ボルト用ナット（以下、本ナット）で連結する方法を提案した。本報告では、提案する継手の性能評価を目的として実施したすべり試験結果、リラクセーション試験結果および FEM 解析の結果を報告する。

キーワード：補修・補強、高力ボルト摩擦接合継手、すべり係数、ナット、拡大座金、FEM 解析

### 1. はじめに

鋼橋の補修補強工事では、補強部材や連結板を既設部材の両面に取り付けるケースが想定され、効率よく部材を取り付ける工法が求められている。そこで大西らは、既設部材に対して1つ目の補強部材を高力ボルトと新開発の特殊ナットで連結した後、2つ目の補強部材をナット側から本ナットで連結する方法を提案した<sup>1)</sup>。本工法では、第一の部材取付時は特殊ナット、第二の部材取付時は本ナットにより締付ける。特殊ナットを締付けた状態で第二の部材を取付るため、拡大孔φ36を有する継手となること、通常の座金に加えて、それより大きな座金（以下、拡大座金）が必要となることが特徴である。本稿

では特殊ナットを使用した場合のすべり試験の結果とともに、拡大座金使用時の座金の変形および座金と連結板間の接触圧に着目し、その最適な寸法を決定することを目的に行った FEM 解析の結果を報告する。

### 2. 特殊ナットの概要

開発した特殊ナットの形状を図-1に、特殊ナットを用いた施工ステップを図-2に示す。特殊ナット、特殊座金および拡大座金が今回開発対象とした部材である。高力ボルト（トルシア形高力ボルトまたはピンテール付き高力六角ボルト）は汎用品のねじ切り長を延長したものであり、本ナットと座金は汎用品をそのまま使用している。

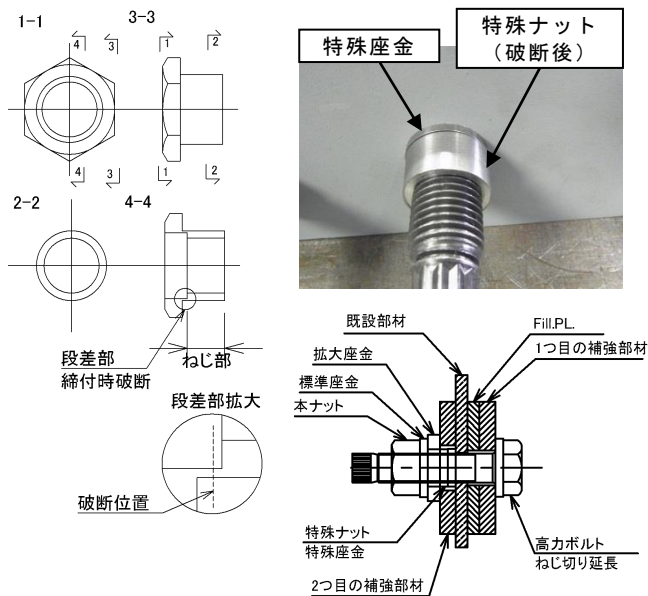


図-1 特殊ナットの形状および本ナット締付け後の断面図

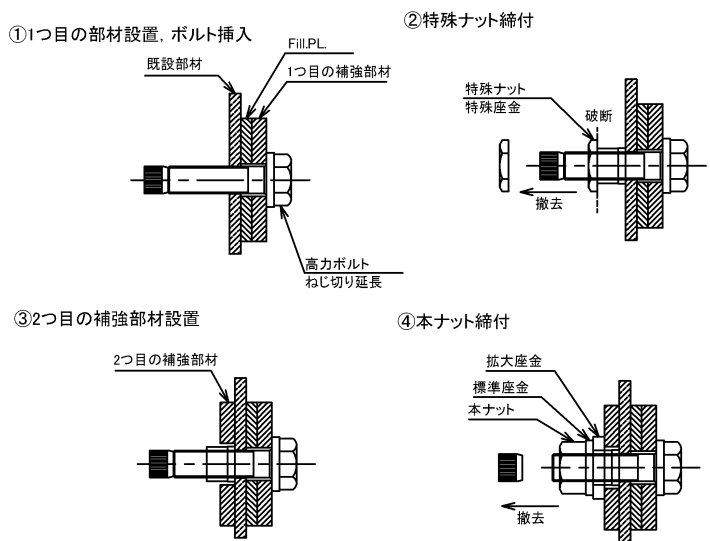


図-2 特殊ナットを用いた施工ステップ

\* 技術本部 橋梁設計部 東京設計課 \*\* 橋梁営業本部 橋梁技術研究室  
 \*\*\* 工事本部 橋梁工事部 計画1課

表-1 供試体の構造諸元とパラメータ

供試体名	構造諸元				パラメータ									
	母板降伏耐力 $P_{YM}$ (kN)	連結板降伏耐力 $P_{YS}$ (kN)	すべり耐力 $P_{sl}$ (kN)	すべり/降伏耐力比	供試体数(体)	母板の接合面処理	特殊ナットの取外し	母板と連結板の孔ずれ						
1面摩擦	SZ	401	276	98	0.36	5	ジンク	無し	無し					
	SK					5	ケレン							
2面摩擦	DZ-1	401	517	279	0.70	3	ジンク	有り	無し					
	DZ-2					3		無し						
	DK-1					5	ケレン	有り						
	DK-2							5		無し				
	DZ-1e					5	ジンク	有り		有り				
	DK-1e					5	ケレン							
	NZ					390	568	328		0.84	5	ジンク	-	-
	NK										5	ケレン	-	-

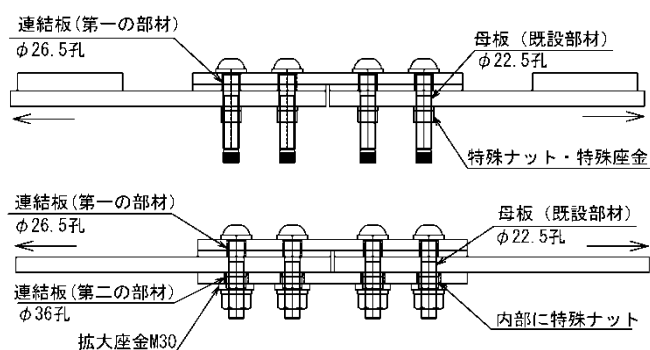


図-3 供試体形状

特殊ナットは、導入軸力の安定と破断位置を固定するために、段差部の板厚を薄くしている。

施工ステップは①既設部材に孔明け後、既設部材の片側から補強部材を取付け、高力ボルトを挿入する。②特殊ナットを締付けて破断させ、一定の軸力で1つ目の補強部材を固定する。③特殊ナット側から2つ目の補強部材を取付ける。この際、特殊ナットの軸部はボルトに締付けられた状態で残っている。④2つ目の補強部材の外側から拡大座金、汎用品の座金および本ナットを取付け、ピンテールが破断するまで締付ける。

特殊ナットを使用することにより、片側からの締付け作業で両側に補強部材を取り付けることができる。また、1つ目の補強部材を取り付けた際に、一時的に応力伝達することが可能である。

### 3. 各施工段階での性能確認試験<sup>2)</sup>

#### 3.1 実験概要

本試験は各施工段階の性能評価を目的とし、母板の接合面処理、施工段階を想定した特殊ナットの取外しの影響および母板と連結板の孔ずれをパラメータとし、施工



a) 孔ずれなし



b) 孔ずれあり

図-4 母板と連結板の孔ずれ

期間を考慮したリラクセーション試験およびすべり試験を実施した。

図-3に供試体諸元、表-1に構造諸元と実験パラメータをそれぞれ示す。1面摩擦供試体(SZ, SK)は、特殊ナットによる締付け、2面摩擦供試体(DZ, DK)は特殊ナットによる締付け後、本ナットを締付けた。目標導入軸力は特殊ナット123kN、本ナット226kNとし、リラクセーション期間はそれぞれのナット締付から約1ヶ月とした。なお、すべり耐力はすべり係数を0.4、ボルト軸力を設計軸力(205kN)とした。降伏耐力はSS400材の公称値を用いた。また、拡大孔の低減係数:0.85を考慮している。

図-4に孔ずれの状況を示す。ボルト孔芯のずれ量は

4.25mmである。なお、供試体の拡大座金の寸法は、FEM解析により連結板の接触圧等を検討した上で摩擦接合用座金 M30(5章参照)に決定した。連結板およびフィラープレートの接触面は無機ジンクリッチペイント 75 $\mu$ m(以下、ジンクとする)、母板は粗さ Ra=5以上となるようにケレンを行った供試体、ジンクを塗装した供試体の2種類とした。

比較検討のため、通常の高力ボルト摩擦接合供試体(NZ, NK)の試験を同様に実施した。

3.2 試験結果

表-2に試験結果のまとめ、図-5および6に試験後における接触面の状況を示す。図左側がボルト頭部側連結板とフィラーの接触面、母板とナット側連結板の接触面を示し、図右側はフィラーと母板の接触面を示す。

なお本文では、すべり荷重を内側ボルト部における母板と連結板間の相対変位が0.2mmに至った荷重と1回目の荷重低下の発生時での荷重の小さい方とした。

(1) 接触面処理：(SZとSK, DZとDK)

表-2に示すように軸力低下率が1面摩擦で約12%、2面摩擦で約9~10%となった。締付部材厚に占めるジンクの膜厚が増えたため、1面および2面摩擦ともに母板

表-2 試験結果のまとめ

供試体名	ナット形式	試験前軸力(kN)	すべり荷重(kN)	すべり係数( $\mu$ )	変動係数	1ヶ月後軸力低下率(%)
SZ	特殊ナット	108.5	151.5	0.69	0.017	12.4
SK	特殊ナット	106.5	126.8	0.60	0.031	11.5
DZ-1	特殊ナット撤去後本ナット	208.3	473.8	0.57	0.022	10.2
DZ-2	特殊ナット & 本ナット	191.8	469.9	0.61	0.014	10.9
DK-1	特殊ナット撤去後本ナット	196.8	356.5	0.45	0.041	9.3
DK-2	特殊ナット & 本ナット	221.5	390.5	0.44	0.028	10.3
DZ-1e	特殊ナット撤去後本ナット	198.1	462.0	0.58	0.054	10.2
DK-1e	特殊ナット撤去後本ナット	197.5	341.6	0.43	0.062	9.3
NZ	本ナット	216.1	478.6	0.52	0.068	11.9
NK	本ナット	222.4	377.9	0.43	0.060	9.8

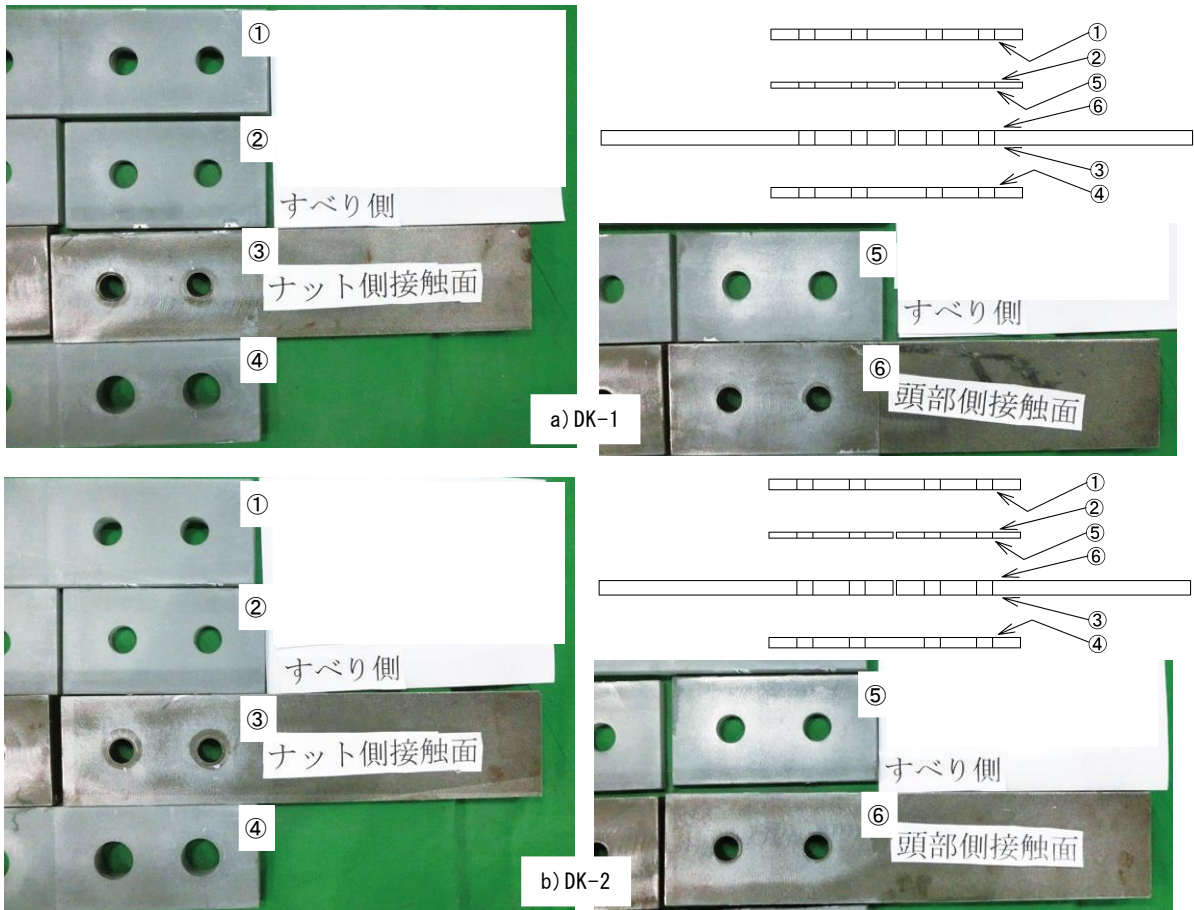


図-5 接触面の状況 (特殊ナットの有無)



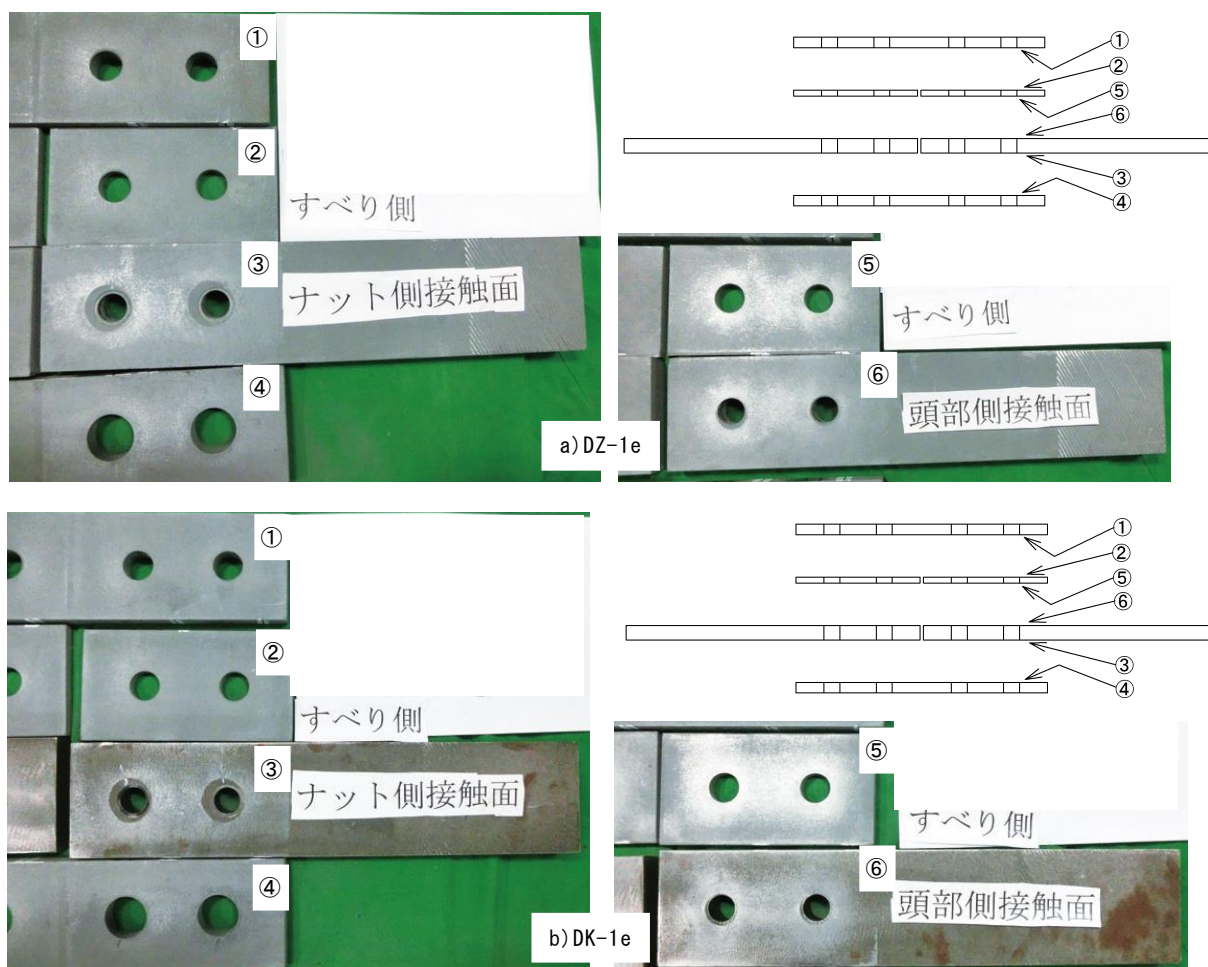


図-6 接触面の状況（孔ずれあり）

表-3 構造諸元

試験ケース	母材降伏耐力 $P_y$ (kN)	設計すべり耐力 $P_{sl}$ (kN)	すべり/降伏耐力比	接合面処理	供試体数
LK	401	279	0.70	母板：ケレン 連結板：無機ジंक75 $\mu$	5
NK	390	328	0.84		5

の接触面がジंकである供試体がケレンの供試体よりも若干大きい結果になったと考えられる。

すべり試験では、母板の接触面がジंकに比べ、ケレンでのすべり係数は1面摩擦で約87%、2面摩擦で約72~79%となった。しかし、すべり係数は0.40以上を満足した。通常の高力ボルト摩擦接合であるNZ、NKシリーズと比べて、同等であることが確認できた。

(2) 特殊ナットの有無：(DK-1とDK-2)

図-5よりいずれの供試体においても、すべり痕の位置と形状が、ボルト孔周りに同心円状の形状で類似しており、特殊ナットの取り外しの有無によるすべり係数への影響は少ないと考えられる。

(3) 孔ずれ：(DZ-1とDZ-1e, DK-1とDK-1e)

表-2より、孔ずれがない供試体に比べ、孔ずれがある

供試体ではすべり係数のばらつきが大きくなった。これは、図-6に示すように孔ずれがある一部の供試体ではすべり痕がめがねのような形状ではなく、不規則な形状になったことが関係していると考えられる。

4. 長期曝露を想定した状況でのすべり試験<sup>3)</sup>

4.1 実験概要

長期間曝露後での継手性能を評価することを目的として、特殊ナットを用いた一面摩擦接合の試験体を約5カ月間試験室内にて曝露後に、本ナットを用いて2面摩擦接合の試験体(LKシリーズ)とした。その間におけるリラクセーション結果および本ナット締付後に実施したすべり試験の結果を報告する。

表-3に構造諸元をそれぞれ示す。供試体形状、特殊ナ

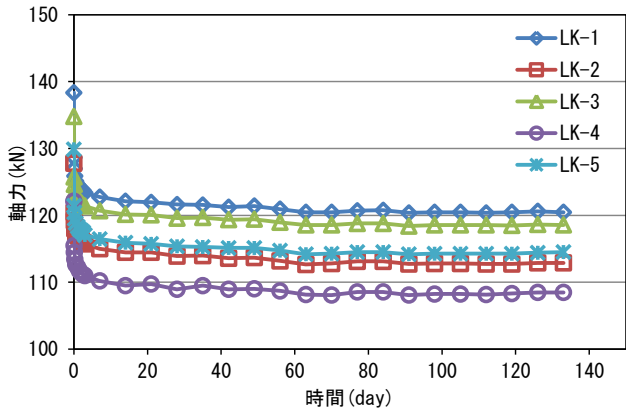
ットおよび本ナットの目標導入軸力および接触面処理は3章と同様としている。すべり耐力は表-1と同様に算出した。比較には接触面処理が同様のNKシリーズ(3章, 表-1 参照)を用いる。

4.2 試験結果

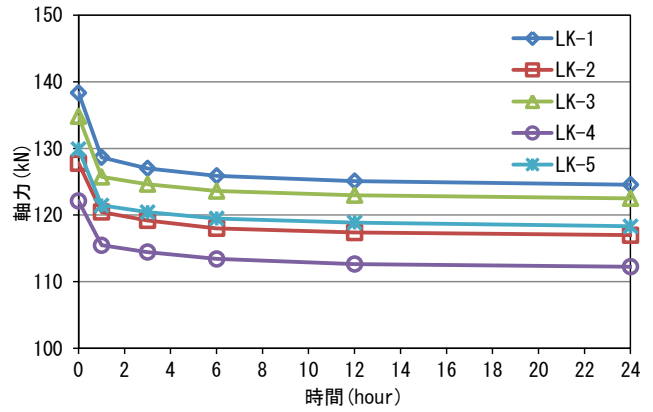
図-7にLKシリーズの特殊ナット締付時のリラクセーション結果, 表-4に試験結果のまとめを示す。図-7b)より軸力は締付直後に大幅に低下するが, 図-7a)に示すように締め付け1週間後には軸力低下率は約10~13%で安定している。表-4より, LKシリーズの本ナットの導入軸力はNKシリーズとほぼ同等となった。また, 本ナット締付時の軸力低下率が低い原因は, 特殊ナット締付によるものと考えられる。

図-8にすべり試験における荷重-相対変位の関係の一例をそれぞれ示す。なお, すべり荷重を3-2と同様に内側ボルト部の母板と連結板間の相対変位が0.2mmに至った荷重と1回目の荷重低下の発生時での荷重の小さい方とした。

両シリーズとも継手の挙動としてすべりが母板の降伏より先行して発生していると推定される。LKシリーズでは, 連結板内部の特殊ボルトの影響により, 内側と外側の相対変位量に差が生じたと考えられる。またNKシリーズに比べ, 同等以上のすべり係数が得られた。すべり係数が若干増加した原因としては, 曝露期間中に接触面の粗さが変化したためと考えられる。

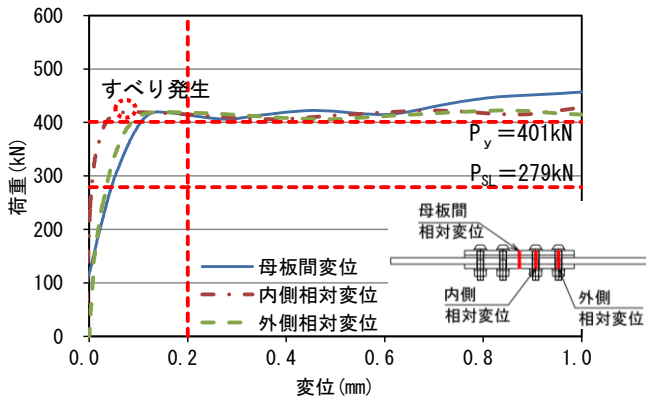


a) 全期間

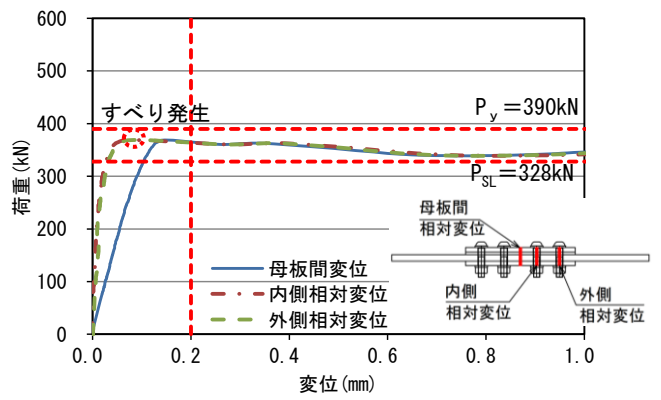


b) 締付けから24時間

図-7 リラクゼーション試験結果(LKシリーズ内側ボルト)



a) LKシリーズ



b) NKシリーズ

図-8 すべり試験結果

表-4 試験結果まとめ

試験ケース	特殊ナット(2本平均)		本ナット(2本平均)			すべり荷重(kN)	すべり係数μ	
	導入軸力(kN)	軸力低下率(%) (5カ月後)	導入軸力(kN)	試験前軸力(kN)	軸力低下率(%) (1週間後)		導入軸力から算出	試験前軸力から算出
LK平均	127.1	11.7	225.7	219.2	2.9	405.1	0.449	0.462
		(5カ月後)			(1週間後)			
NK平均			229.7	207.6	9.6	377.5	0.411	0.455
					(1カ月後)			

### 5. 拡大座金の FEM 解析<sup>4)</sup>

#### 5.1 解析概要

本工法を採用した高力ボルト摩擦接合継手では、図-9に示すように第二の部材(ナット側連結板)に拡大孔φ36が存在し、拡大座金で拡大孔を覆った後、通常の座金を重ね、本ナットで締付ける必要がある。しかし、この拡大座金に関する規格は定められておらず、拡大座金が連結板との接触に及ぼす影響を確認するため、FEM解析を実施した。

図-10および11にモデル形状、要素分割および境界条件を、表-5および6に材料特性と解析ケースをそれぞれ示す。解析モデルは8節点および6節点ソリッド要素を用いて作成した。連結板の材質はSS400、降伏応力は235N/mm<sup>2</sup>、材料構成則はバイリニアとした。ボルトおよび座金の材質はそれぞれF10T、F35とし、材料構成則は弾性とした。なお、全ての部材でヤング率は200,000N/mm<sup>2</sup>、ポアソン比は0.3とした。図-10に示す連結板底面に対称条件を設け、ボルト軸部最下面に強制変位を与えた。摩擦係数はボルト頭部と通常座金の接触面を1.0とし、それ以外の接触面は0.4とした。解析ソルバーにはAbaqus/Standardを用いた。解析パラメータは、拡大座金の内径(29および31mm)、板厚(8および10mm)、第二の部材取り付け時の施工誤差を想定したボルト軸芯と連結板孔芯のずれ(ずれ量7mm)の有無とする。なお、比較のため、通常の高力ボルトセットのナット部を再現したケース(NW)も設定した。

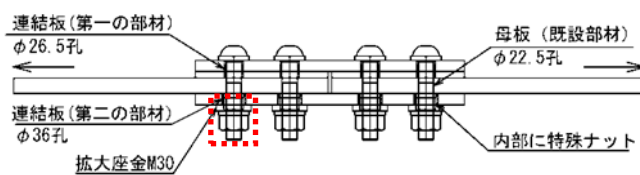
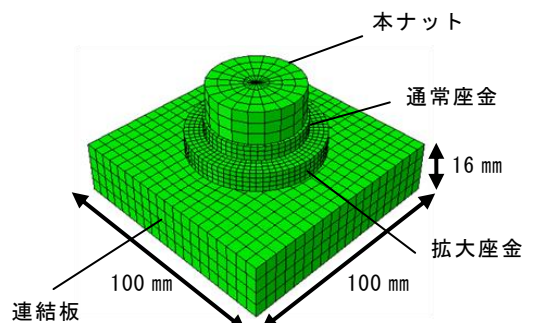
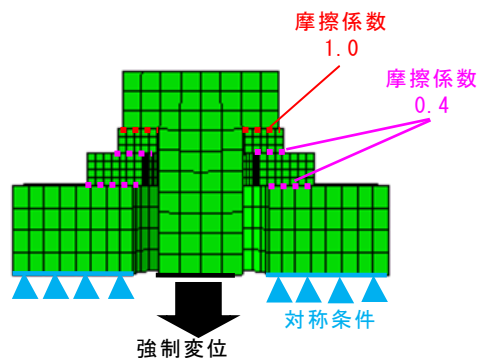


図-9 解析対象範囲



a) 全体図



b) 断面図

図-10 解析ケースの形状と要素分割及び境界条件

表-5 解析条件

部材	連結板	ボルト	座金
要素	8節点および6節点ソリッド要素		
材質	SS400	F10T	F35
ヤング率(N/mm <sup>2</sup> )	200,000		
ポアソン比	0.3		
降伏応力(N/mm <sup>2</sup> )	235	-	-
構成則	バイリニア	弾性	

表-6 解析ケース

解析ケース	連結板		拡大座金			ボルト軸部と連結板のずれ
	板厚(mm)	孔径(mm)	内径(mm)	外径(mm)	板厚(mm)	
NW	16	24.5	-			なし
DW-1		36	31	60	8	あり
DW-1e					10	なし
DW-2					29	
DW-3						8

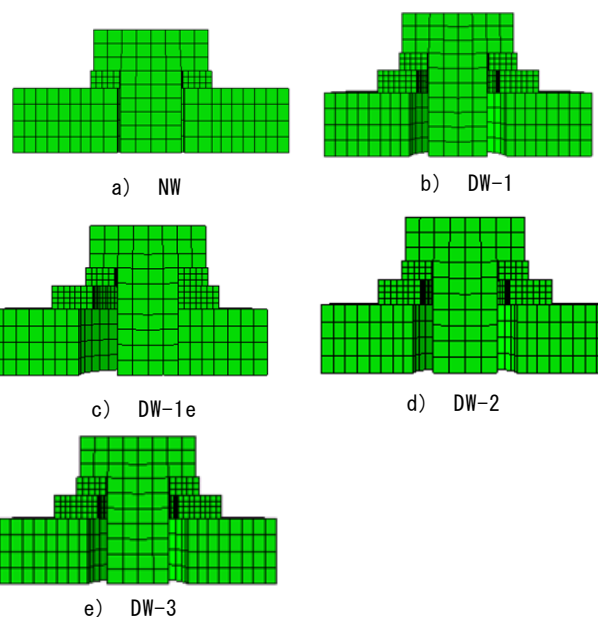


図-11 解析ケース断面図

5.2 解析結果

図-12 に M22F10T の標準ボルト軸力(226kN)を導入した際の連結板上面における接触圧のコンター図を示す。

図-12 より、いずれのケースについても、孔縁付近において接触圧が高くなり、ボルト軸芯から離れるにつれて低くなる。また、図-12d)に示す軸芯のずれがあるケース(DW-1e)を除いて同心円状に接触圧が分布している。

図-13 に M22F10T の標準ボルト軸力(226kN)を導入した際の拡大座金下面における接触圧および鉛直変位分布曲線(ただし、NW は通常座金の下面)を示し、図-14 に座金および連結板の変形状態を示す。図-13b)より拡大座金を用いたケース(DW-1~3)の最大接触圧は NW と同等の値を示している。また、軸芯のずれがあるケース

(DW-1e)では接触圧がすべてのケースの中での最大値を示し、接触圧の分布に偏りが確認できた。図-13c)および14より、拡大座金が連結板を覆う範囲であるボルト軸芯から±30mmにおいて、拡大座金の下面に鉛直変位が発生した。また、その変位量はボルト軸芯に近づくにつれ大きくなった。このため、ボルト軸芯に近づくにつれ、拡

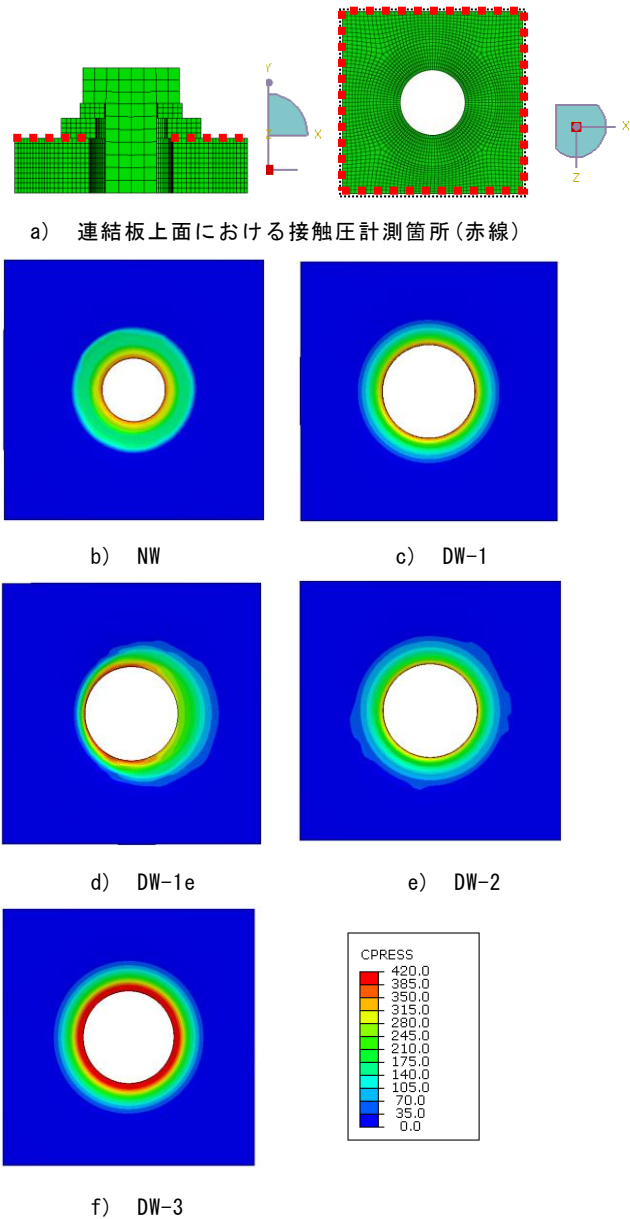
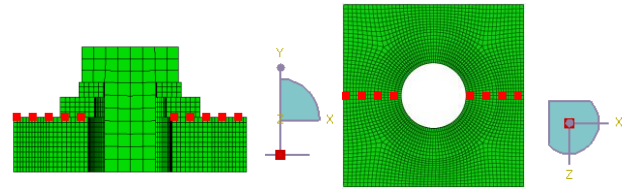
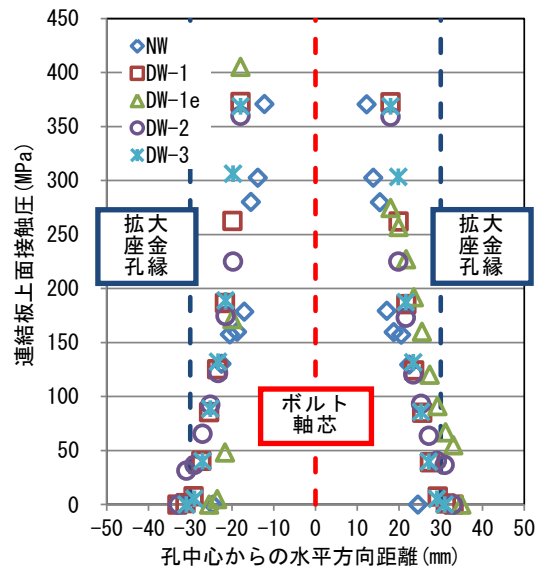


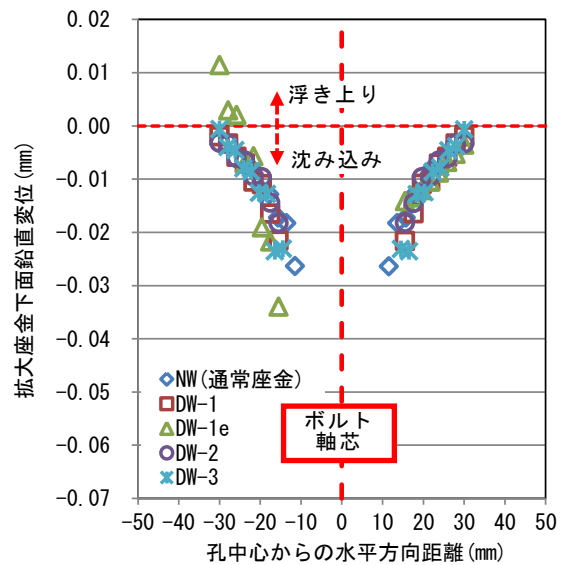
図-12 連結板上面における接触圧コンター図(単位: MPa)



a) 座金下面における計測箇所(赤線)



b) 接触圧分布曲線



c) 鉛直変位分布曲線

図-13 拡大座金下面における接触圧および鉛直変位分布



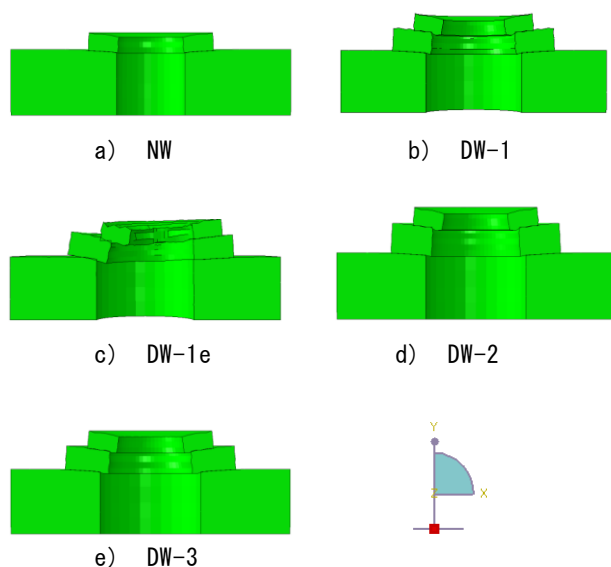


図-14 座金および連結板の変形図(変形倍率 50 倍)

大座金下面の食い込みが顕著になり、連結板を窪ませ、孔縁付近の接触圧が大きくなる。また、両者の食い込みによって、連結板の板厚は最大で約 0.022mm 減少するが、この減少量は元の板厚に比べ非常に小さく、継手全体の耐力にはほとんど影響がないと考えられる。軸芯のずれがあるケース(DW-1e)では、座金外縁の浮き上がりが認められるが、接触しない部分は一部である。このことから、拡大座金は完全に離間することなく接触域が確保され、接触圧を伝達できていることが確認できる。

## 6. まとめ

### 6.1 各施工段階での性能確認試験

- (1) リラクゼーション試験では、軸力低下率が全ての供試体平均で約 10% となった。
- (2) すべり試験では、母板の接触面処理が無機ジンクリッチペイント 75 $\mu$  及びケレンのどちらにおいてもすべり係数は 0.40 を満足した。
- (3) 特殊ナットの取外しの有無によるすべりへの影響は少なかった。また、母板と連結板の孔ずれによりすべり係数のばらつきが大きくなる傾向となった。

### 6.2 長期曝露を想定した状況でのすべり試験

- (1) リラクゼーション試験では、特殊ナット締付から約 5 か月後の平均軸力低下率が約 12% となった。
- (2) すべり試験の結果から、すべり係数が 0.46 となり、

0.40 を満足することを確認した。通常の高力ボルト摩擦接合試験体と比較しても同等の結果となった。

### 6.3 拡大座金の FEM 解析

- (1) 内径  $\phi$ 31mm のケース(DW-1)において、孔縁内径側の接触圧の最大値は通常ケース(NW)の値に比べ、約 5% の増加となった。
- (2) ずれがないケースでは座金外縁は浮き上がらず、接触圧を伝達している。しかしながら、本研究で対象とした拡大座金では、ずれがある場合(DW-1e)においても座金外縁の浮き上がりに留まり、座金としての十分な機能を有していると考えられる。
- (3) 解析結果より、汎用性にも優れている内径  $\phi$ 31mm、外径  $\phi$ 60mm、板厚 8mm の摩擦接合用 M30 座金を適用することとした。

## 7. 謝辞

本研究は、首都高速道路株式会社、株式会社 IHI インフラシステム、株式会社 IHI インフラ建設との共同研究として実施したものである。ここに厚く御礼を申し上げます。本研究を実施するに当たり、神鋼ボルト株式会社、大阪市立大学山口隆司教授にご指導いただき、また金城力氏はじめとする大阪市立大学橋梁工学研究室学生諸氏にご協力いただいた。合わせて、厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 大西、溝口、吉岡、齊藤、篠崎：鋼板両側に補強部材を連結する 2 段締めナットの開発，土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集，I-446，2014.9
- 2) 峯村、金城、山口、齊藤、吉岡、林：特殊ナットを用いた 2 段締め高力ボルト摩擦接合継手の性能確認試験，土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集，I-507，2015.9
- 3) 吉岡、峯村、金城、山口、齊藤、林：実施工を想定した状況での 2 段締めナット高力ボルト摩擦接合継手のすべり試験，土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集，I-506，2015.9
- 4) 金城、峯村、山口、齊藤、吉岡、林：特殊ナットを用いた 2 段締め高力ボルト摩擦接合継手の拡大座金に関する解析的研究，土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集，I-508，2015.9