第Ⅰ部門　　静ひずみモニタリングを用いた高力ボルト遅れ破壊検知に関する研究

関西大学　学生員　○行松　利真,　　正会員　石川　敏之
高田機工株式会社　正会員　松本　直樹, 吉田　悠真,　佐合　大, 大久保　宣人

1.　はじめに

鋼橋においては，主に高度経済成長期に製造された F11T 高力ボルトの遅れ破壊が懸念されている．現在も遅れ破壊による第三者被害を防止するために，F11T の取り換えや落下を防止するためのボルトキャップの取り付けが進められている．F11T の遅れ破壊に対する既存の点検手法は，ハンマーによる打音検査や超音波探傷試験が一般的であるが，打音検査は技術者の経験に大きく依存し，超音波探傷試験は点検時の精度は高い一方で，その後の損傷進行を長期的にモニタリングすることは困難である．他方，実橋モニタリングに関する既往の研究として，低コストで LPWA 通信が可能な IoT データロガーを利用した静ひずみモニタリングによって，吊橋のセンターステイロッドの破断を検知できることが明らかになっている[1]．この技術は，高力ボルトの遅れ破壊のモニタリングにも適用できる可能性がある．

そこで，本研究では高力ボルトの遅れ破壊の進行による断面減少を再現し，実橋においてもひずみゲージの貼付が容易であるボルト頭部のひずみを計測し，遅れ破壊に対する静ひずみモニタリングの適用性を明らかにする．

2.　試験概要

本研究では，遅れ破壊によるボルト軸部の破断を再現するために，ボルト軸部に切れ込みを導入する，ボルト破断試験を実施した．

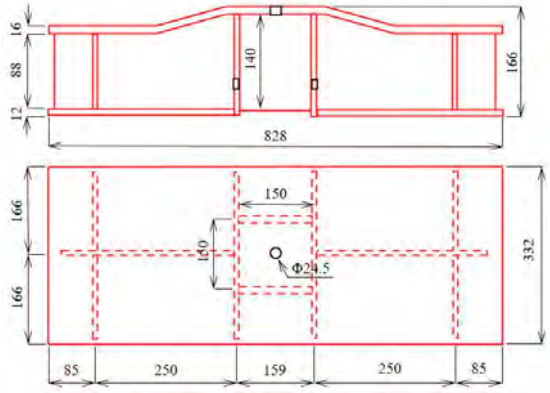
本研究の対象となるF11Tは入手が困難であったため，試験では，F10Tを使用した．試験体は9体用意した．ボルト破断試験を実施するために，**図－1**に示すように，中央位置にボルト孔を設けた長さ828 mm，幅332 mm，中央部高さ166 mm の試験治具を用意した．**図－2**に示すように，2台の治具を対向に配置して，中央のボルト孔にM22 F10Tの高力ボルトを挿入して，治具同士を連結した．その後，治具間に設置した2台の油圧ジャッキで治具間を押し広げることで，試験体のF10Tに軸力を導入した．軸力導入後は，**図－2**に示すように，幅0.9 mmのセイバーソーを用いて，治具の隙間から，F11Tの遅れ破壊が最も生じやすい位置であるねじ切り部端部近傍に切込みを加えた．試験では，高力ボルトが完全に破断に至るまで切込みを導入した．**図－3**にひずみゲージ貼付位置を示す．ボルト頭部の中心に3軸ひずみゲージを貼付し，3方向の平均ひずみをボルト頭部の静ひずみとする．本研究で使用したF10Tは切込みを容易に入れるために，ねじ切り長を70mmとした．切込みの途中で脆性的な破断が生じる可能性が考えられたため，ひずみ計測には，IoTデータロガーではなく，純正的なデータロガーを用いて，50Hzでひずみとジャッキの圧力を計測した．

3.　ボルト軸力とボルト頭部静ひずみの関係

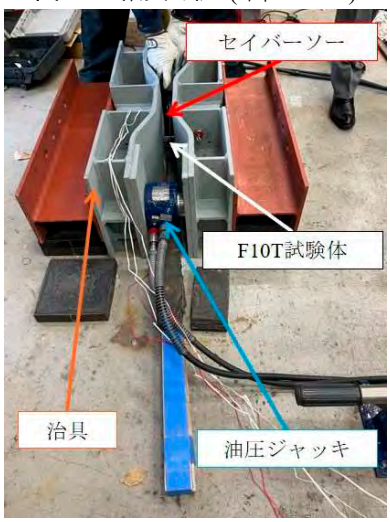
ボルト破断試験で得られたボルト軸力とボルト頭部静ひずみの関係を**図－4**に示す．最小二乗法によって求めたボルト軸力とボルト頭部静ひずみの関係も同図に実線で示している．この図より，ボルト軸力が大きくなると，ボルト頭部静ひずみも大きくなる傾向が確認できる．本試験結果から得られた関係式を次式に示す．

$$N = 0.189\varepsilon \tag{1}$$

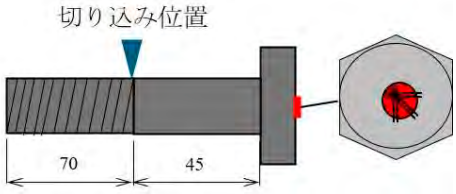
ここに，
N：ボルト軸力 (kN)，ε：ボルト頭部静ひずみ (μ)



図－1　治具寸法 (単位：mm)



図－2　試験の様子



図－3　ひずみゲージ貼付位置 (単位：mm)

4.　試験結果

表－1 にボルト破断試験の結果，**図－5** に最大軸力導入後からの軸力低下量とボルト頭部静ひずみ低下量の関係を示

Toshimasa YUKIMATSU, Toshiyuki ISHIKAWA, Naoki MATSUMOTO, Yuma YOSHIDA , Dai SAGOU, Nobuhito OKUBO
k354681@kansai-u.ac.jp

表－1　ボルト破断試験の結果

試験体名	最大軸力(kN)	最大軸力時のボルト頭部静ひずみ(μ)	破断直前の軸力(kN)	破断直前の軸力低下量(kN)	破断直前の軸力低下率(%)
試験体1 (195kN)	199.1	-1203	110.3	88.8	44.6
	199.1	-926.2	99.6	99.5	50.0
	207.2	-1128	121.1	86.1	41.6
試験体2 (205kN)	218.0	-1307	126.5	91.5	42.0
	226.0	-1294	161.4	64.6	28.6
	228.7	-1305	113.0	115.7	50.6
試験体3 (235kN)	266.4	-1629	166.8	99.6	37.4
	269.1	-1626	174.9	94.2	35.0
	293.3	-1257	177.6	115.7	39.4

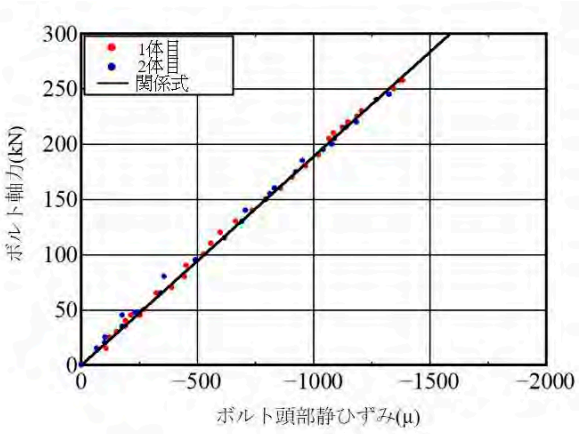
す．また，**図－6** に破断直前，破断後のボルト頭部静ひずみ低下量を示している．本試験では，導入軸力の目標値を M22 の設計軸力である 205kN を参考に，195 kN，205 kN，235 kN の 3 通りとし，それぞれ 3 体実施した．また，最大軸力が 195 kN，205 kN，235 kN の試験体をそれぞれ試験体 1，試験体 2，試験体 3 とする．ボルト軸力はジャッキの圧力にジャッキの受圧面積を乗じて算出している．**表－1** より最大軸力が大きくなると，最大軸力時のボルト頭部静ひずみも大きくなる傾向が確認できる．**図－5** より，ボルト軸部の断面減少により，ボルト軸力が低下することに伴い，ボルト頭部静ひずみも減少する挙動を示すことが分かる．試験体 2 では，破断直前までの平均軸力低下は約 91 kN であり，最大軸力から約 45 %低下した．破断直前のボルト頭部静ひずみ低下量は 600 μ 程度であり，最大軸力時から約 46 %低下した．試験体 1，3 の場合も，同様の傾向が確認されていることから，破断直前までは最大軸力がボルト軸力およびボルト頭部静ひずみの低下量に与える影響は小さいことが明らかとなった．また，式(1)より得られた関係式と比較すると，概ね一致していることが分かる．

一方で，破断後のボルト頭部静ひずみ低下量は，**図－6** に示すように，試験体 1，2，3 でそれぞれ 1000～1100 μ，1300～1400 μ，1600～1800 μ 程度であり，最大軸力が大きくなるにつれて破断後のひずみも大きくなる．したがって，破断後は最大軸力が大きくなると，ボルト頭部静ひずみ低下量も大きくなることが分かる．

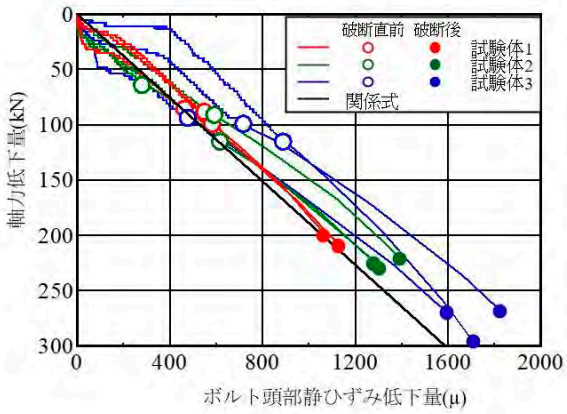
したがって，断面減少によるボルト軸力低下に伴って，ボルト頭部の静ひずみが明確に変化することから，ボルト頭部の静ひずみモニタリングによって，遅れ破壊の発生の予測および検知を行うことが可能であると考える．

5.　まとめ

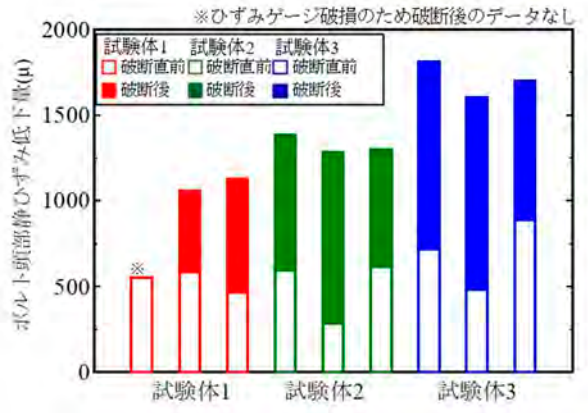
本研究では，F10T高力ボルトを用いたボルト破断試験を実施した．試験結果から，ボルト軸部の断面減少に伴って，ボルト頭部の静ひずみが明確に変化していることが明らかとなった．これにより，IoTデータロガーを用いた静ひずみモニタリングによって，F11Tの遅れ破壊の兆候や破断の検知が可能であると考える．



図－4　ボルト軸力とボルト頭部静ひずみの関係



図－5　最大軸力導入後からの軸力低下量とボルト頭部静ひずみ低下量の関係



図－6　破断直前と破断後のボルト頭部静ひずみ低下量

参考文献

1)　栄翔太，横井芳輝，藤田憲二，河野晴彦，後藤稜平，溝上善昭，石川敏之：IoT を活用した吊橋センターステイロッドの遠隔監視手法の試行，インフラメンテナンス実践研究論文集，Vol.3，pp.85-94，2025.