

**第2編 上フランジ継手部RC床版内に残存した
遅れ破壊ボルト取替え施工法の施工試験**

第2編 上フランジ継手部RC床版内に残存した遅れ破壊ボルト取替え施工法の施工試験

目 次

1. はじめに	2-1
2. 遅れ破壊ボルトの概要・背景	2-3
3. 試験ステップ	2-6
4. 試験内容・方法	2-6
4.1 施工試験方法	2-6
4.1.1 スケルトンモデルによる施工確認	2-10
4.1.2 RC床版を疑似モデル化した施工確認	2-12
4.2 すべり試験方法	2-15
5. 試験結果	2-17
5.1 施工試験結果	2-17
5.2 すべり試験結果	2-18
6. まとめ	2-21
7. おわりに	2-22

WG メンバー

小芝 明弘	((株)ビーエムシー)
佐藤 浩明	((株)宮地鐵工所)
中島 一浩	((株)ロボテックスファニングシステム)
菅野 晃生	(川田工業 (株))
〈島田 清明〉	(川田工業 (株)旧メンバー)
安保 文博	(片山ストラテック(株))
井上 信夫	(開発虎ノ門コンサルタント(株))
加納 謙司	(日本車輛製造(株))
竹田 圭一	((株)IHI)

1. はじめに

高力ボルト遅れ破壊は、過去の問題として「何を今更遅れ破壊か」と考えている技術者もおられるかもしれない。しかし、現実には「遅れ破壊問題」は、過去において完全に問題解決されたわけではなく「現在まで未だ放置され問題が先延ばしされている問題」と考えておく必要がある。幸いにも、ボルト落下により人身事故はまだないようであるが、その一步手前であったとのヒヤリハット例や物損事故例は報告されている。人の往来部、高架下の多目的利用施設（公園・遊歩道・駐車場等）、橋梁下に車や列車が走行する等、その上に架かる橋梁には、第三者被害を防止する上で遅れ破壊によるボルト落下に十分注意を払っておく必要がある。

また、「湿気がこもり結露して湿度が飽和状態になりやすい鋼製箱桁内面や鋼製橋脚基部の添接部」・「水はけの悪い添接部」・「雨水に直接濡れる添接部」では、高力ボルト孔内部に水が侵入し、高温多湿条件と重なり腐食反応が促進され、鋼中に水素侵入が顕著なため、遅れ破壊ボルトの発生が多くなっている。1添接部のボルト群中1～2本といった損傷にとどまらず、ボルト群の半分以上のボルトが損傷し、耐力が要求性能を満足できず緊急補修するといった極端な橋梁事例も報告されている。そのため、今後も経年により大量にボルト破壊が進行し出す可能性は依然続くと認識し、常に関心を寄せ危機管理する必要がある。

維持管理部会では2006年10月から「片面施工ディテールに関する調査・研究」をメインテーマとし研究活動をしてきた。鋼製橋脚基部の中埋めコンクリート部や鋼桁上フランジRC床版中に埋設した添接部での損傷した摩擦接合用高力六角ボルトF11Tは、遅れ破壊の心配のないF10T（JIS B 1186）に交換取替え補修工事にあたって、ボルト前後に締め込み補修空間を必要とするため、大規模にコンクリートをはつり込む必要があった。しかし、「鋼製橋脚柱内の中詰めコンクリート掘削」や「RC床版上の掘削のため、走行帯の長期交通規制」を余儀なくされるため、その有効な取替え方法が少なく補修予算も莫大となり、かつ交通止め等による社会的な経済的損失も大きいことから、現実には取替え困難箇所と判断され、取り替え工事が見送られ交換されず経過観測のみに終わっている箇所が多い実態がある。

このため、本部会では交通規制や大規模な施工を伴わず、現在まで有効な取り替え工法が少ない「既設橋RC床版内にある遅れ破壊後の高力ボルトを片面施工で取替えられる工法」に着目し研究してきた。既設橋のRC床版中にある「摩擦接合用高力座金」と「摩擦接合用六角ナット」は残存させ、締め込み片面から遅れ破壊した損傷ボルトのみを撤去し、同位置の片面ボルト孔からコンクリート掘削して裏側の締め込み空間を形成し、材片の片側や部材外側からのみの作業で締め込み可能なトルクコントロール型片面施工用高力ボルト「ワンサイド高力ボルト」（写真-1・写真-2、図-1）を差し込み、再締め付けを行う工法を考え施工試験により作業性を確かめた。また、本施工法により一端失った摩擦力が再び回復できるかをすべり試験により確認し、恒久補強対策までの一次的な応急補修策とし適用可能との試験結果を得たのでここに報告する。



写真-1 ワンサイド高力ボルト

MUTF 20・MUTF 24・MUTF 27が
シリーズ化されているが、今回提案の取替え
工法では、残存ナット孔径に本ボルトを貫通
させるため、コアピン最大外径 20.9mm の
MUTF 20を使用する。

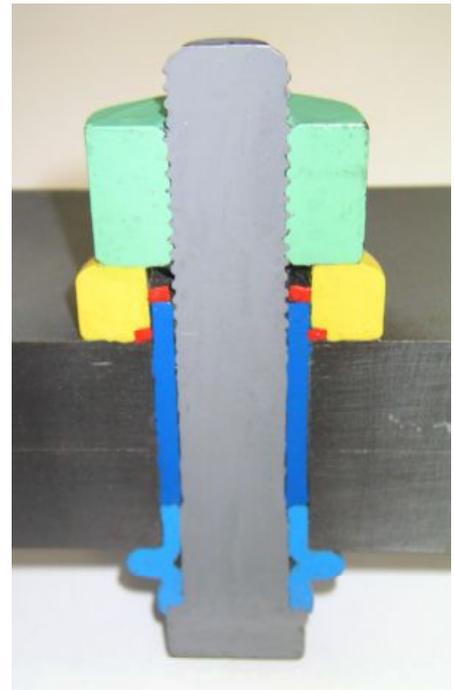


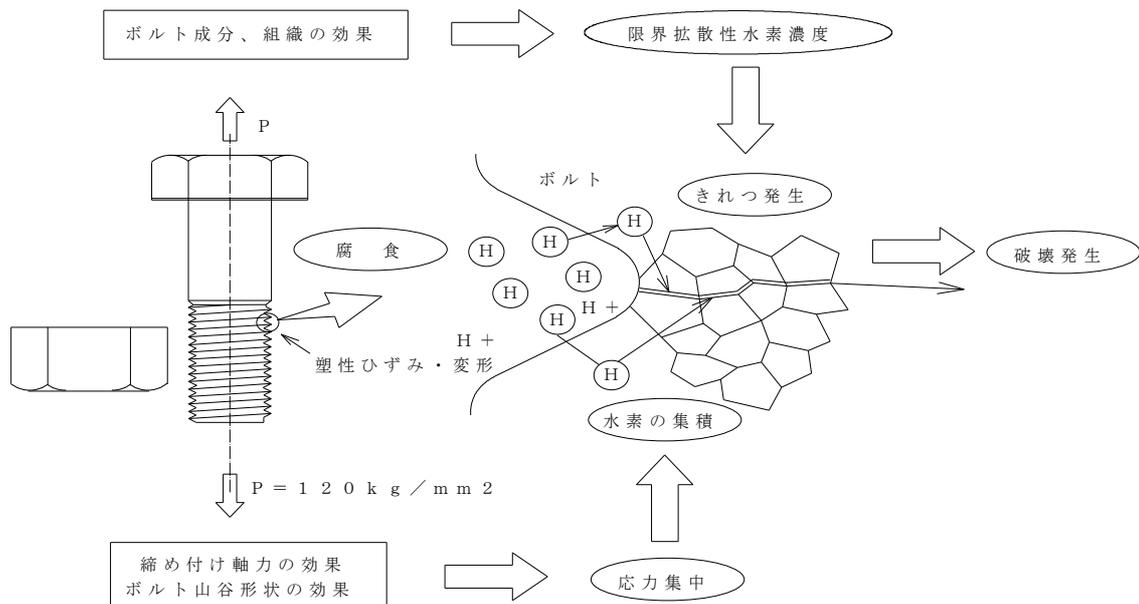
写真-2 ワンサイド高力ボルト
締結後カット断面



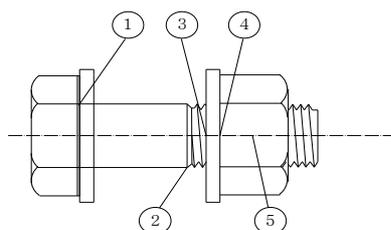
図-1 ワンサイド高力ボルトの部品構成図（6部品構成）

2. 遅れ破壊ボルトの概要・背景

遅れ破壊（Delayed Fracture）とは、高強度鋼の高力ボルト（F 13 T、F 11 T）に一定の静的に引張力 P が作用した状態である時間経過した後、外見上ほとんど変化することなしに（巨視的塑性変形をとまわず）、突然脆性的に破壊する現象をいう。見かけ上突然破断したように見えるが、実際の現象は、構造工学上ほとんど問題にはならない程度の微細な切欠き、マイクロクラック、腐食によるピットなどの応力集中部がクラックの発生点となり、時間と共に徐々に進行して最終的に急速に破壊する現象である。破断面は亀裂が徐々に進行した起点部と、起点部から扇状に急速に広がった脆性破面が明確に区分できる。図-2 に遅れ破壊過程の概略イメージ図を示す。



- a、使用環境中の経年腐食反応によってボルト表面からボルト中に水素が侵入
- b、ボルト中に侵入した拡散性水素（使用環境中で鋼材中に侵入して自由に動き回る水素）がナット開始ねじ部の応力集中部に集積
- c、拡散性水素量が材料の許容できる水素量（限界拡散性水素濃度）を超えた時点できれつ発生
- d、きれつ成長がある段階に達した時点で破壊に至る（脆化現象・粒界われ）



ナット開始部である右図②④の位置が他の部位に比べて破壊が集中する場合が多い。

図-2 高力ボルト遅れ破壊過程の概略イメージ図

1964年（昭和39年）、我が国では道路橋として、関東地域では千葉県市川市原木中山付近にある京葉道路をまたぐ跨道橋（花輪橋：支間30m）にF13Tが使用され（現在は撤去されている）、関西地区では新十三橋や阪神公団大阪環状線湊町工区にF13Tが使用され供用された。どの橋梁も設計性能としてはF11T級として設計実施されていたが、一年程度を経過した後、突然ボルトが落ちだした。安全率を大きくして使用応力レベルを若干小さくしても破壊現象を防止するには至らなかった。この新しい破壊性状については生産メーカーはもちろんのこと、国内の専門家の注目を集め、原因究明のため研究が重ねられ、経験の浅い材料や設計法を採用する場合は、未知の問題が潜在していることや実証実験や慎重な調査が特に重要であることを痛感する事例であった。

遅れ破壊の原因は、継手の腐食環境・温度・製品材料の化学成分・調質管理・表面処理・応力集中・作業管理などの要素が複合されたものであるが、特に「水素脆性による破壊」、「応力腐食割れ」、「ボルトメーカーと工場製作ロットの違い」でボルトが落ちる落ちないの違いがあった。また、継手に作用する応力と遅れ破壊とは無関係であることは実験により知られている。

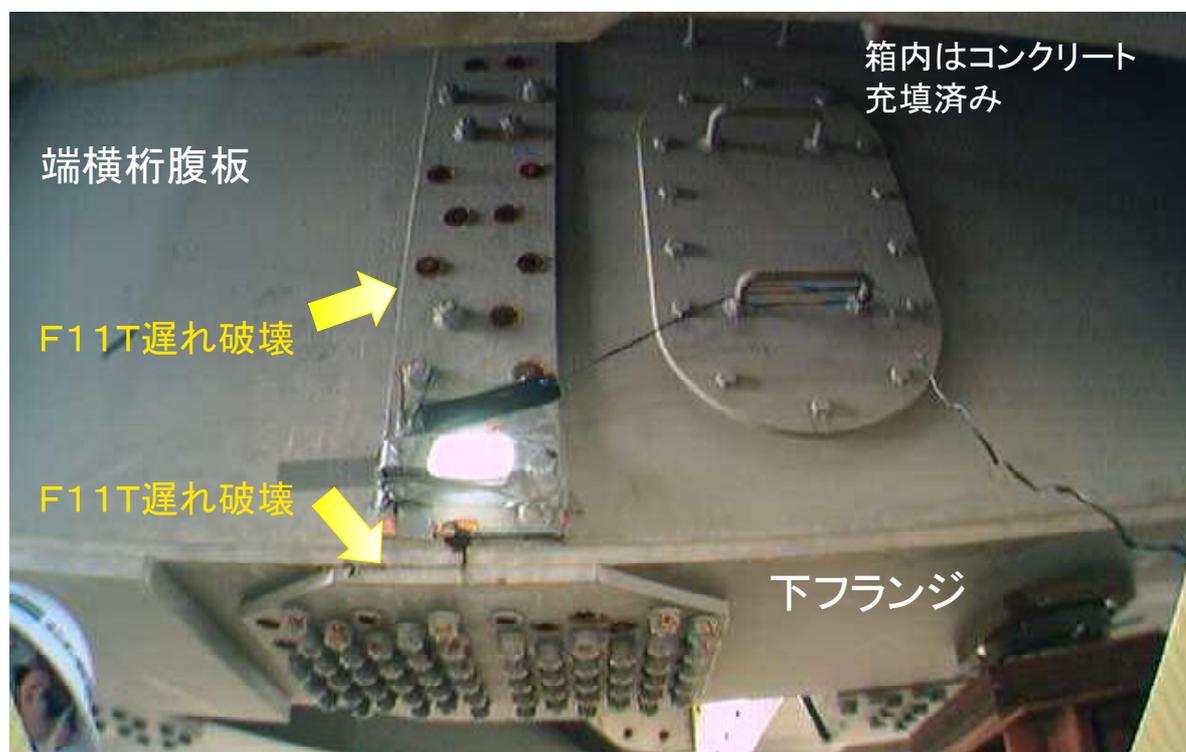
これら経験から、1964年JIS B 1186「摩擦接合用高力六角ボルト・六角ナット・平座金のセット」で規格制定されていたF13Tが、3年後の1967年（昭和42年）改訂時に廃止され、実橋採用されていたF13TボルトはF11TやF10Tに交換された。廃止当時の判断では「F11T級のボルトではほとんど遅れ破壊は生じないだろう」とされ、使用が続けられ実績も多かった。その後、時間経過に伴いF13Tほどの急激な遅れ破壊ボルトの発生でないまでも、昭和50年代に入り徐々にF11Tボルトの落下も報告されるようになり破壊の危険性があることがわかり再び問題となった。このため、1979年JIS B 1186の改訂では「なるべく使用しない」との備考注記が付けられカッコ書き扱いとなり、1980年（昭和55年）道路橋示方書でF11Tの使用は禁止され、1981年以降鉄道橋でも使用中止となった。このように、昭和39年から昭和56年までの18年間でF11Tボルトは、正式な規格として存在し、多くの鋼構造物（橋脚・鋼桁等）に使用されてきた。

国土交通省の実態調査では、「全国約7000橋でF11Tボルトが使われ数千万本のオーダーで残っている」と報告している。使用量が膨大なだけにF13Tボルトの場合より問題は深刻で、全てのF11Tを遅れ破壊の心配のないF10Tやトルシア型高力ボルトS10Tに交換するには予算的にも非常に厳しい状況である。単年度に橋全体の全てのボルトを交換するのは難しい現実があり、ボルト落下によって第三者被害が生じる危険性の高い箇所を取り替えを先行するよう、優先順位づけを考えながら対処療法的な対策がなされている。しかしながら、未だにボルト交換されていない鋼構造物が全国的には残されていて、予防保全対策ができていないのが現実である。また、ボルトを交換できない箇所には、破壊したボルトの落下を防止する落下防止ネットや落下防止柵の対策を施している場合が多い。このように、どのような対策を実施するかは、最終的には道路管理者各が判断を下している状況である。

遅れ破壊ボルトを調査した結果、さまざまな要因があり、遅れ破壊が起こるまでの経過時間にも

相当な幅があり、今まで破壊していないからと言って将来的にも安全であるとは言い難い。遅れ破壊はある時期に終息してしまうことはなく、何年にも渡って発生し続け、現在進行形で累積発生件数は右肩上がりにある。F 11 Tが全て遅れ破壊を起こす訳ではないが、破壊を起こしたボルトが1本でも確認されたボルト群では、残りのボルトが破壊される危険が非常に高く、ボルト製作ロットにも関連性があると留意しておく必要がある。また、水分が多い箇所や閉断面構造などの腐食環境の厳しいところに特に発生事例が多いことから、環境や構造形式に留意した継続的な調査点検が重要である。

昭和 39 年から昭和 48 年にかけて製作提供されていた高力ボルト F 11 Tは、ウィットねじが使用されている場合が多い（鉄道橋はほとんど）。1968 年（昭和 48 年）にインチ表示であるウィットねじが JIS 規格で廃止されるまで、現在の M22 相当の高力ボルトは、インチ表示 W 7 / 8 インチ (22.22mm) で 7 分（ななぶ）と呼ばれ使用されていた。それ以降現在まで ISO のメートルねじ（国際標準機構）が日本工業規格（JIS 規格）に標準化されている。したがって、ウィットねじのボルトやナットにおける内外径とねじピッチは、現在の M22 高力ボルトのメートルねじのそれとは微妙に異なっている。このことは、この時期に施工した R C床版や中詰めコンクリート中に残されたインチねじピッチのナットをそのまま利用して、現在ボルトメーカーで製作されているメートルねじピッチのボルトでは補修できないことを示しており、インチサイズの高力ボルトを現在製作している国内メーカーもないことから問題をいっそう複雑にしている。写真－3は鉄道橋の密閉断面においてウィットねじタイプの高力ボルト F 11 Tが大量に遅れ破壊を起こした事例である。



写真－3 密閉箱断面における高力ボルト遅れ破壊事例

3. 試験ステップ

R C床版内の遅れ破壊高力ボルト F 11 T を片面施工で補修する工法の確認試験は、下記に示したステージ 1 ～ステージ 3 のステップに分け段階的に実施する。

ステージ 1 : ボルト取替え補強手順を概略的に理解してもらうために説明用モデルを作成。

(R C床版部分を透明樹脂に置き換えスケルトンモデルとする)

ステージ 2 : 上フランジと R C床版部をコンパクトモデル化して再現し、ボルト取替え施工手順を再現した施工性確認試験を実施する。

(実施工業が実験室レベルで可能であるかの確認試験)

ステージ 3 : 母材・添接板・座金・ナットを全てワンサイド高力ボルトで締め込んだ後にすべり試験を実施する。(引張試験で摩擦係数 $\mu = 0.4$ 以下の低減なしを確認)

4. 試験内容・方法

4. 1 施工試験方法

ボルト取替え作業手順を図-3～図-6に示す。

- ① 昭和 48 年以前のウイトサイズの高力ボルト W7/8 インチを想定した。
- ② 既設橋の R C床版中にある「摩擦接合用高力座金」と「摩擦接合用六角ナット」は残存させたまま、締め込み片面から遅れ破壊した損傷高力ボルトのみを片面ボルト孔から撤去する。

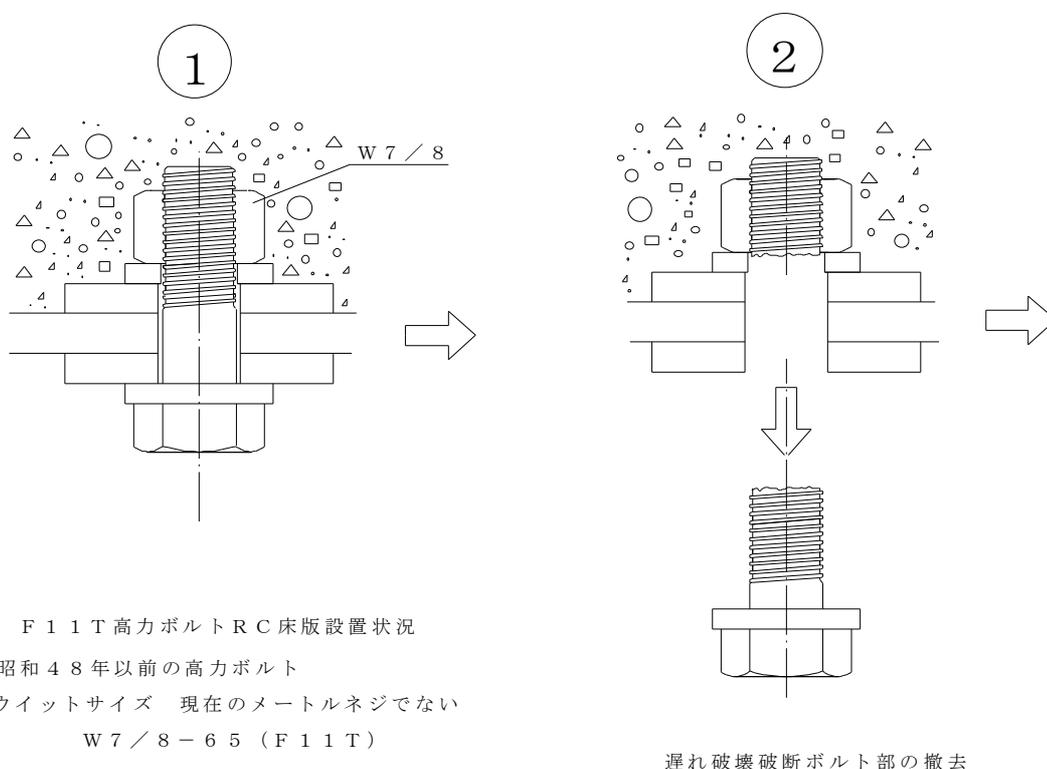


図-3 遅れ破壊ボルト取替え作業手順 (その 1)

- ③ 同位置の残されたボルト残片を鉄鋼ドリル（ノス型ドリルφ 21.5mm）で撤去する。
- ④ コンクリート振動ドリル（φ 21.0mm）により裏側のRC床版をワンサイド高力ボルト（MUTF20（F8T相当））差し込み長さ分、掘削する。

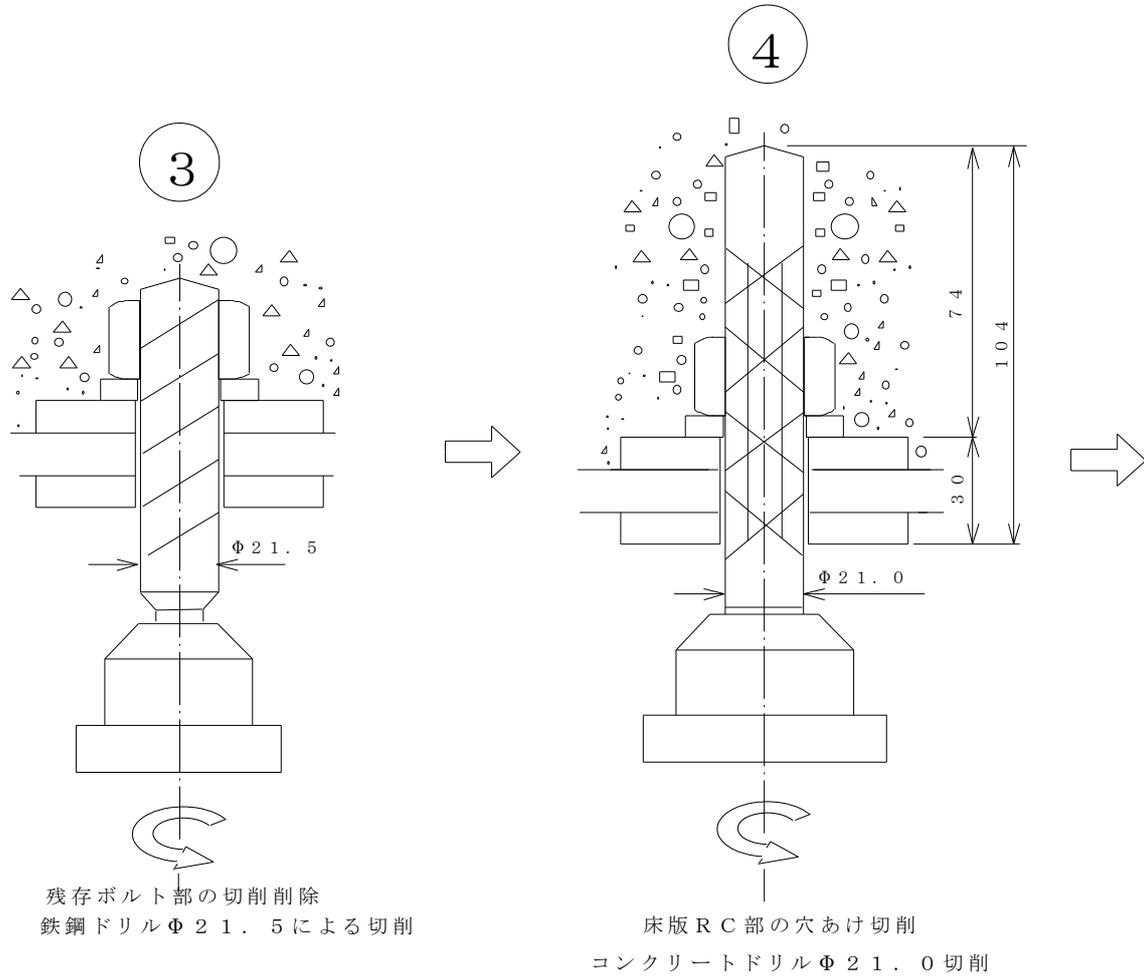


図-4 遅れ破壊ボルト取替え作業手順（その2）

- ⑤ 残存ナットのねじ山をワンサイドボルト径(ϕ 20.9mm) が完全に通過できる径まで切削する。(今回の試験では本数が少量のため ϕ 22mm を目標に超硬ロータリバーにて切削したが、破壊ボルト本数が多量の場合は特注リーマーで対応する)
- ⑥ ワンサイド高力ボルトのボルト頭を形成するバルブスリーブ部の締め込み内径空間を必要とするため、工業用ダイヤモンドフレークを電着させた今回試験用に特別注文したロータリー砥石(シャフト径 10mm・ローター部径 21mm)により孔径を拡大研磨する。
(ボルト締め込み後にコンクリート空間充填の必要がある場合は、締め付け後に樹脂モルタル注入することになる。そのため、エア抜き孔をミストドリルで削孔しておく)

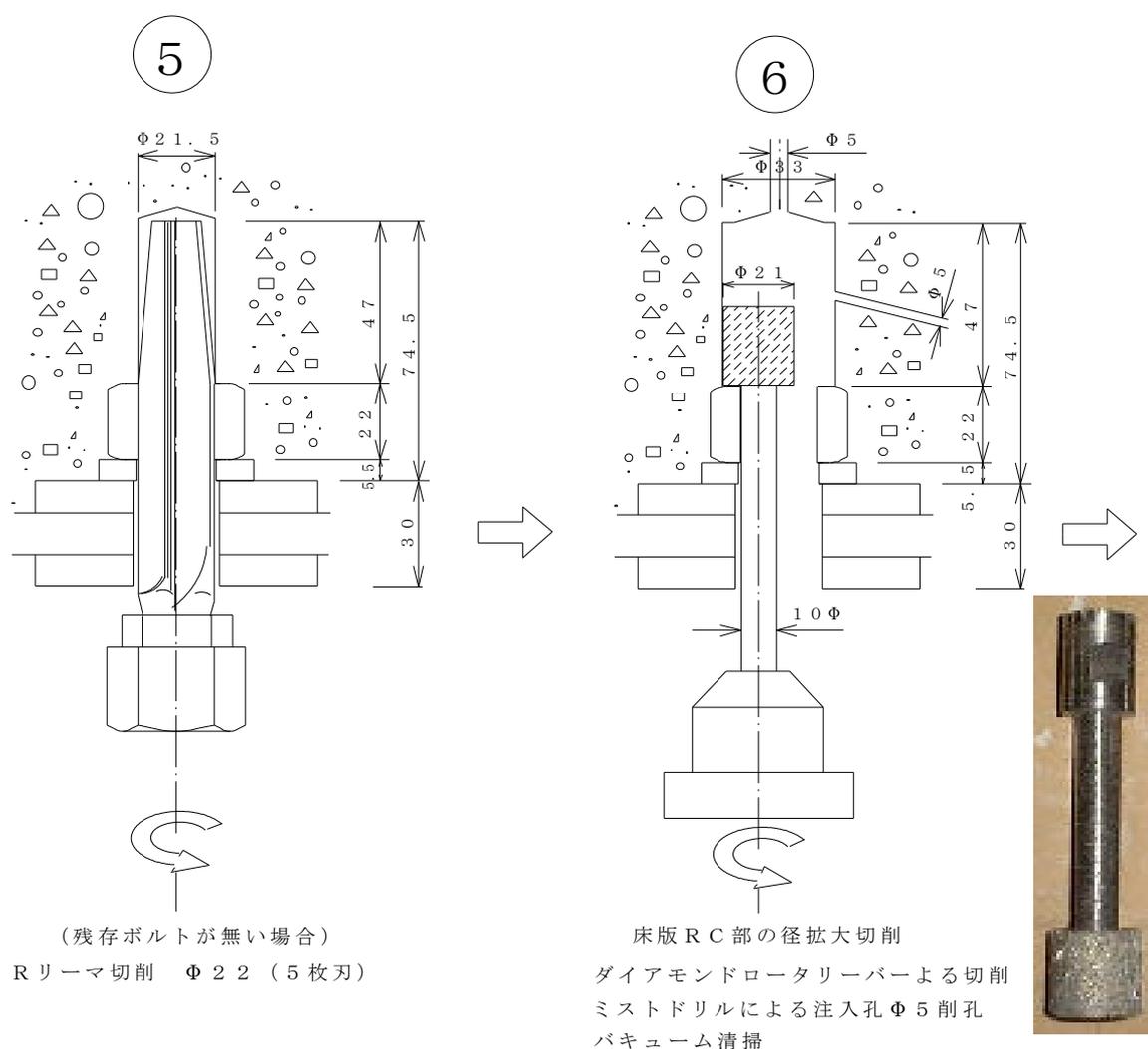
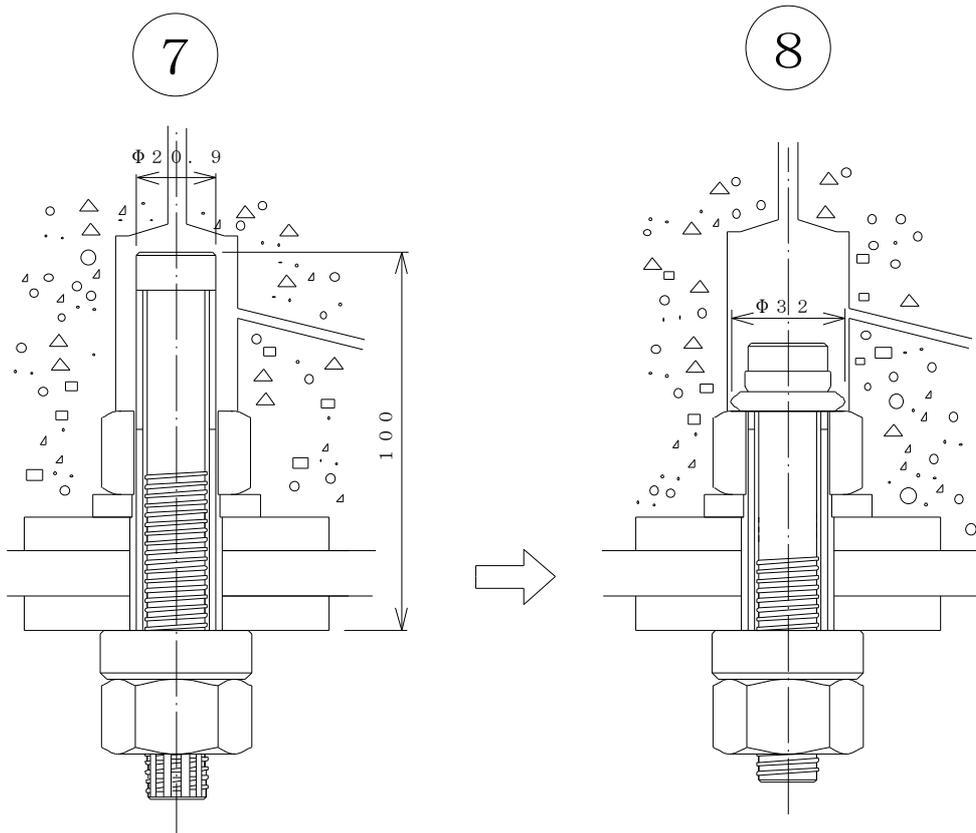


図-5 遅れ破壊ボルト取替え作業手順(その3)

- ⑦ R C床版部の削孔と拡大研磨作業を完了後、コンクリート粉等の清掃を完了させ、ワンサイド高力ボルトを差し込む。
- ⑧ トルクシアボルト締め付け機と同機能を持った専用シャーレンチで「摩擦接合用高力座金」と「摩擦接合用六角ナット」を母材と添接板と共に一緒に再び締め込む。
(ボルト締め込み後にコンクリート空間充填の必要がある場合は、樹脂モルタル注入)



ワンサイド高力ボルトの挿入
MUT F 20 - 60 (F 8 T相当)

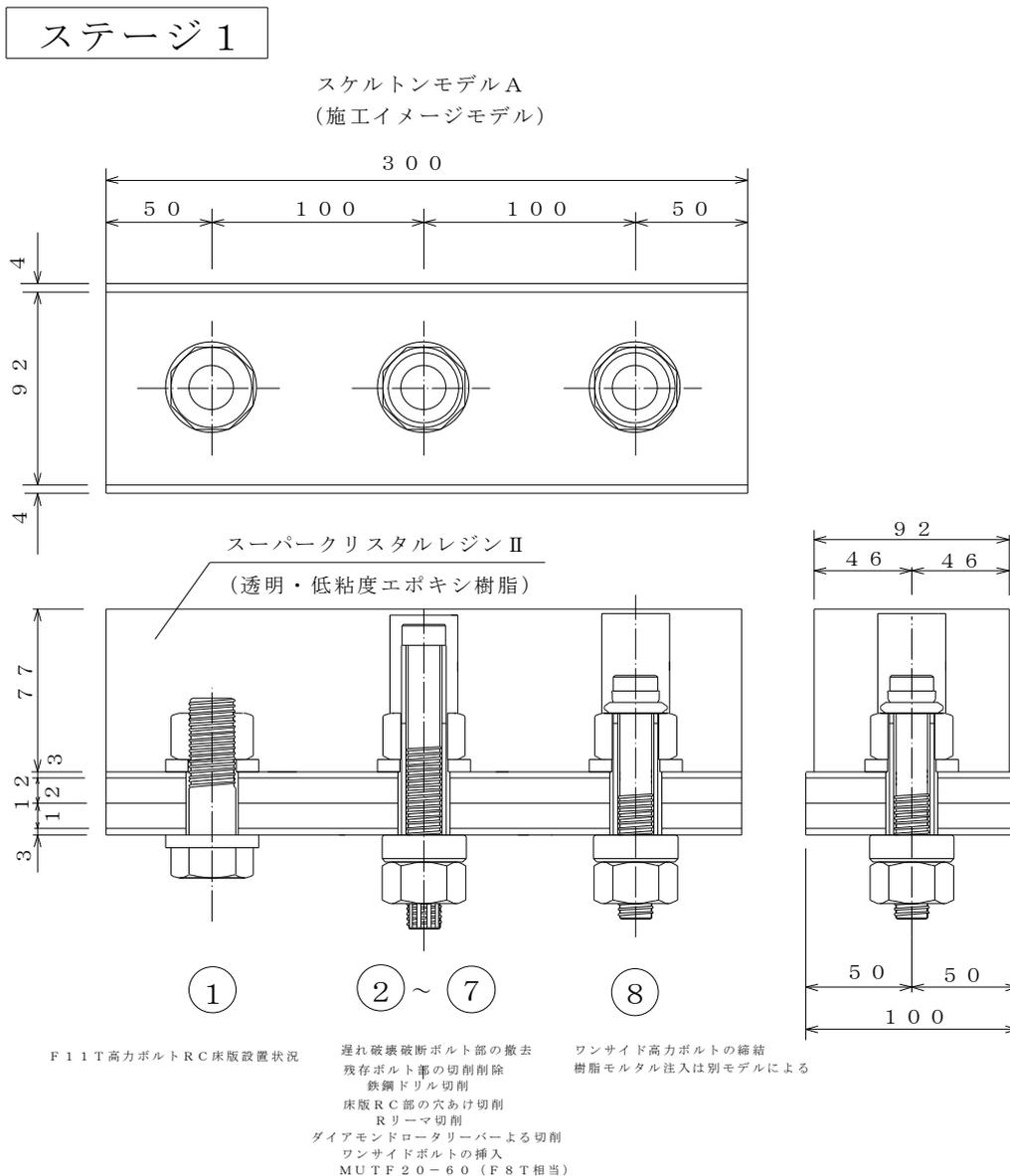
ワンサイド高力ボルトの締結
樹脂モルタル注入

図-6 遅れ破壊ボルト取替え作業手順 (その4)

4. 1. 1 スケルトンモデルによる施工確認（ステージ1）

図-3～図-6に示したボルト取替え補修手順を概略的にみなさんに理解してもらうため、床版コンクリート部を通常は標本やアクセサリ等の製作に使用する透明・低粘度エポキシ樹脂（スーパークリスタルレジンⅡスーパークリアー）を使用してスケルトン化して、内部状況を直接目視確認できる施工確認モデルを作成する。

図-7、図-8にモデル図面を示し、写真-4～写真7にモデル施工完了写真を示す。



使用材料

- 2-PL 100×3×300 (アルミパネル)
- 2-枚 100×12×300 (木材)
- 3-HTB MUTF20-60 (F8T)
- 1-HTB M22×70 (F10T)
- スーパークリスタルレジンⅡ 1.4L 2セット
(透明・低粘度エポキシ樹脂2液タイプ：日進レジン製)

図-7 スケルトンモデル図-A (施工イメージモデル)

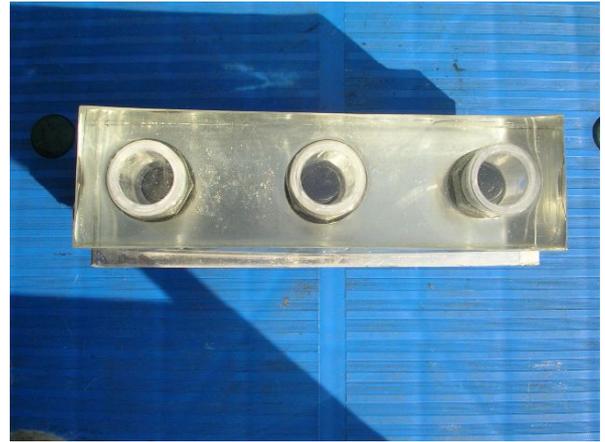
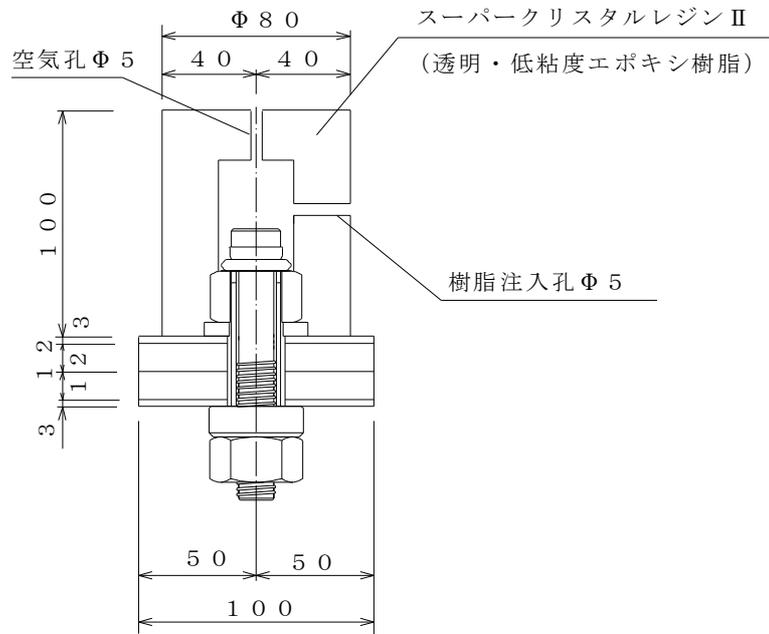
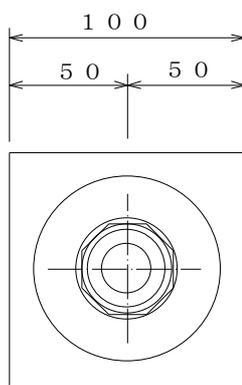


写真-4 スケルトンモデル (側面)

写真-5 スケルトンモデル (上面)

スケルトンモデルB
(樹脂注入確認モデル)



使用材料

2-PL 100× 3×100 (アルミパネル)

2-枚 100×12×100 (木材)

1-HTB MUTF20-60 (F8T)

スーパークリスタルレジンⅡ 350mm l 2セット
(透明・低粘度エポキシ樹脂 2液タイプ:日進レジン製)

図-8 スケルトンモデル図-B (樹脂注入確認モデル)

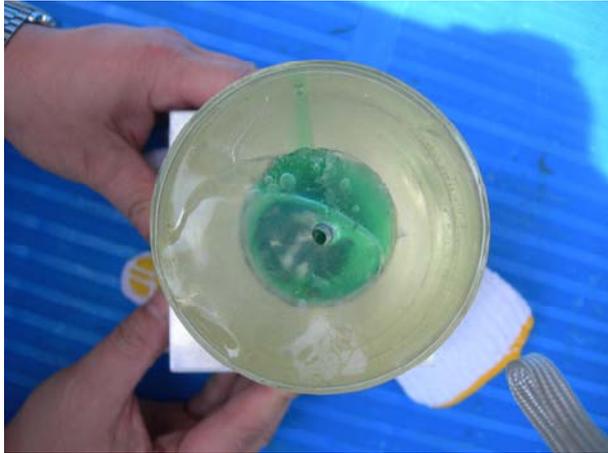


写真-6 スケルトンモデル (上面)



写真-7 スケルトンモデル (側面)

4. 1. 2 RC床版を疑似モデル化した施工確認 (ステージ2)

施工確認試験に先立ち、ワンサイド高力ボルトのボルト頭を形成するバルブスリーブの提灯座屈部が随時変形していく過程をノギス計測により確かめ、コンクリート空間成形量の妥当性を確認した。図-9にバルブスリーブ変形過程図を示す。

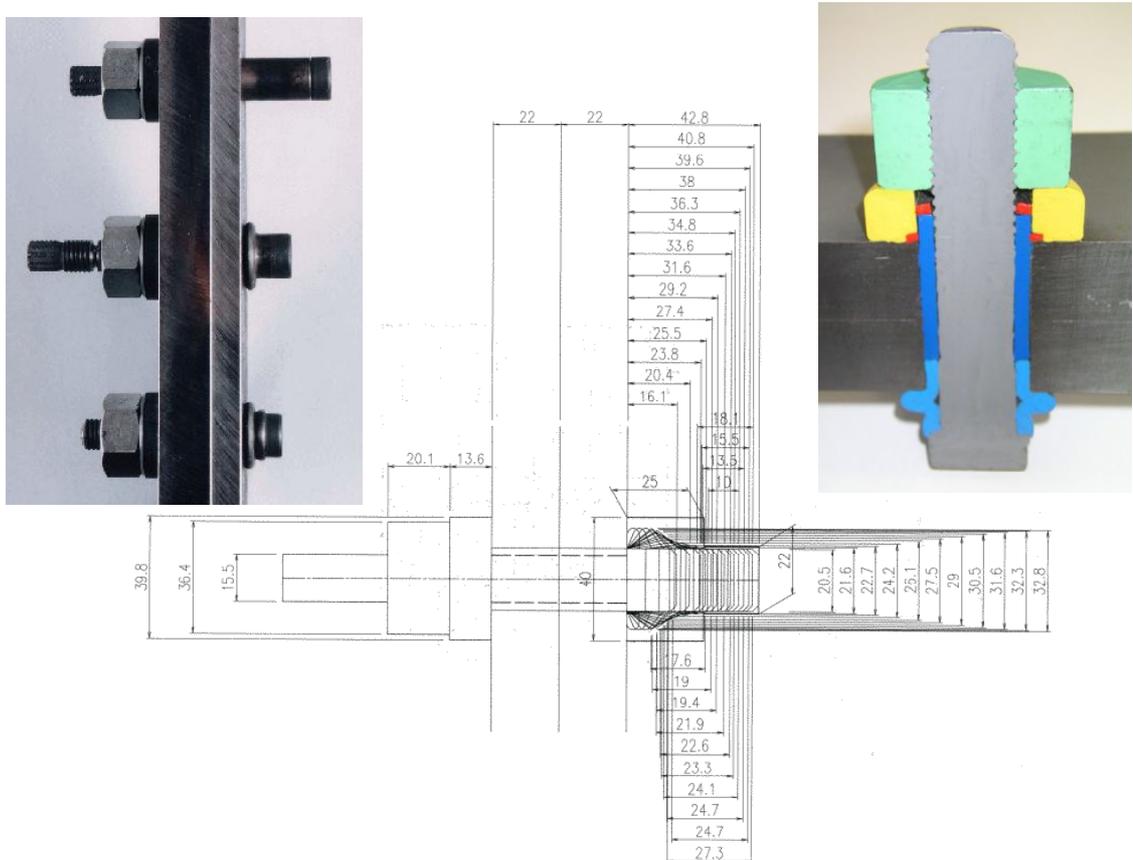


図-9 バルブスリーブ変形過程図

プレートガーダー上フランジとRC床版部をコンパクトモデル化して再現し、図-3～図-6に示したボルト取替え補強手順にて施工確認を実施し、実施工性を確認する。図-10にモデル製作図を示し、写真-8～写真-14に施工確認中の写真を示す。

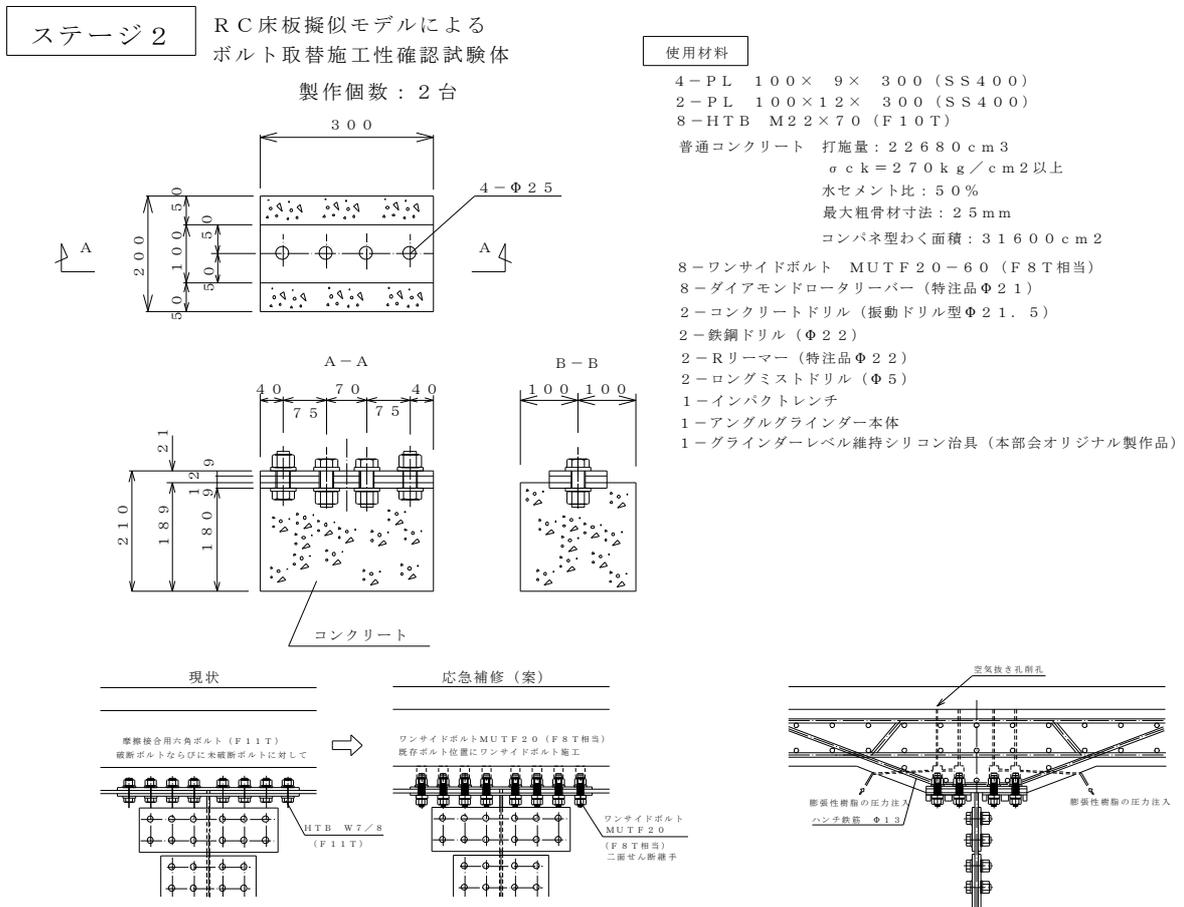


図-10 RC床版擬似モデルによるボルト取替え施工確認試験体図



写真-8 型枠作成後



写真-9 コンクリート打設

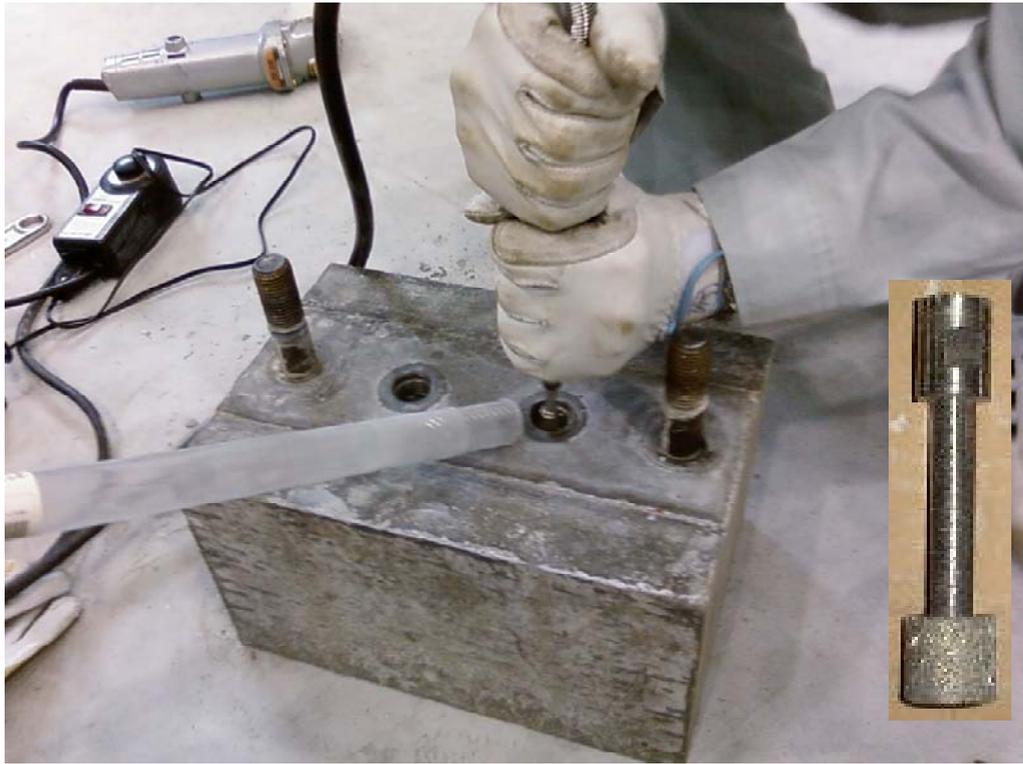


写真-10 超硬ロータリーバーによる床版内ナット切削作業



写真-11 専用シアレンチでボルト締結



写真-12 ボルト施工完了



写真-13 樹脂注入後



写真-14 全体写真

4. 2 すべり試験方法 (ステージ3)

ワンサイド高力ボルトの機械的性能は、ロブテックスファスニングシステムと明星大学により以下①～④の継手確認試験を実施し、十分実用性のある良好な結果を事前に得ている。

- ① 摩擦接合継手のリザクゼーション試験 ② 繰り返し荷重が作用した時の軸力変動
 ③ 繰り返し載荷後の継手すべり試験 ④ 疲労耐久性試験

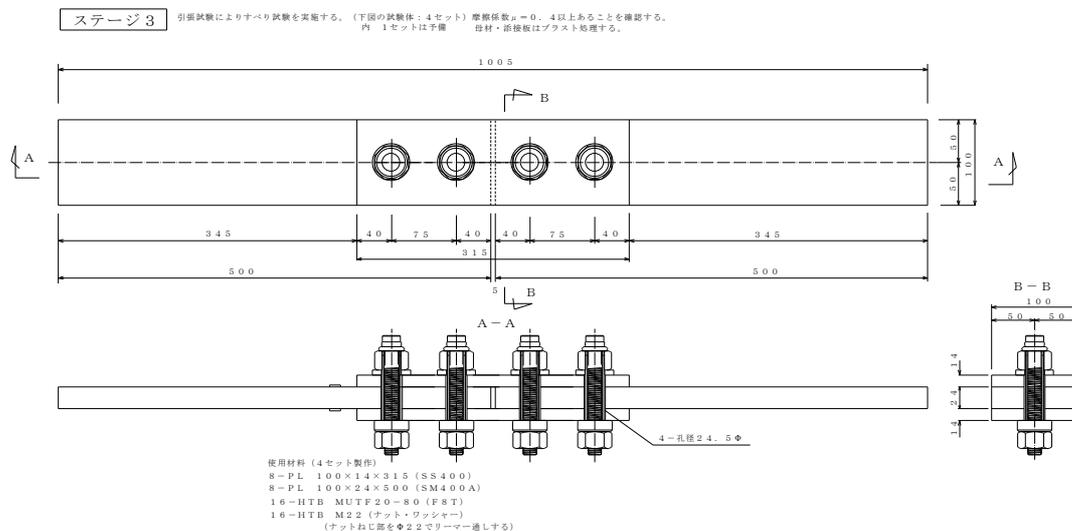
今回のすべり試験はステージ3として以下の方法で行う。

(写真－15～写真－20にすべり試験前の準備状況を示す。)

- ・遅れ破壊後に同工法でいったん摩擦力を失った継手部にて再締め付けにより摩擦接合力を回復できるかは現在まだ良く解っていない。そこで、取替え補強工法（コンクリートがない状態）を再現し、補修後の摩擦接合継手のすべり係数確認試験を実施する。
- ・図－11に示す試験体を4体作成する。1体はスペア部材とし3体の試験を実施する。
- ・母材の厚さは24mm、添接板の厚さは14mmとする。ワンサイド高力ボルトはMUTF20－80、ボルト孔径は既設孔径の24.5mmとする。摩擦面はグリットブラスト処理（ $R_z = 75 \mu m$ 程度）を施し、無機ジンクリッチ処理をしない裸仕様とする。
- ・すべり試験は、ボルトのリラクゼーションを考慮してボルト締め付け後7日以上経過させてから実施する。

ボルト導入軸力 (N_i) = 145 kN (設計ボルト軸力の $131 \times 1.10 = 145kN$)

- ・アムスラー型万能試験機 (Max : 1000 kN) を用いて引張試験を行う。
- ・すべり荷重 (P_s) kN は、明瞭なすべり音を発生した時の荷重を主すべり荷重とし、すべり係数 $\mu = 0.40$ 以上を得られることを確認する。 $P_s = \mu \cdot a \cdot n \cdot N_i$
- ・摩擦係数は、 $\mu = \text{すべり荷重 (} P_s \text{)} / (2 \text{面 (} a \text{)} \cdot 2 \text{本 (} n \text{)} \cdot \text{ボルト導入軸力 (} N_i \text{)})$ で算出。



図－11 すべり試験 試験体詳細

表-1 すべり試験体の材料性能表

	材質	幅 mm	長さ mm	板厚 mm	孔径 mm	総断面積 mm ²	純断面積 mm ²	降伏点min N/mm ²	平均的降伏点 N/mm ²	伸び %
中板	SM400A	100	500	24	24.5	2400	1812	235	300	31
添接板	SS400	100	315	14	24.5	2800	2114	245	316	30



写真-15 ワンサイド高力ボルト締結前



写真-16 ワンサイド高力ボルト締結後



写真-17 ワンサイド高力ボルト締結中



写真-18 すべり試験体



写真-19 試験体組立状況



写真-20 1000kN アムスラー試験機

5. 試験結果

5. 1 施工試験結果

- 1) ワンサイド高力ボルト MUTF20 は、一般市販サイズが締め込みグリップ長 90mm までがエントリーサイズである。このため、グリップ長を概算算出するとグリップ長＝母材厚 28mm + 添接板厚 2 @ 16mm + 座金厚 6mm + ナット高 22mm となり、合計長は 88mm となる。したがって、本工法での補修施工は、母材厚の最大厚さ 28mm 以下での補修施工までが限界厚さとなることがわかった。残念ながら、上下フランジ厚が厚くなる長支間橋梁の支間中央付近や大規模な鋼橋脚柱の基部にある添接部には適用できないことがわかった。
- 2) ワンサイド高力ボルト補修施工後に RC 床版に残ってしまう掘削孔は、施工後の交通振動等によりコンクリートクラック発生の根元となりやすいため、樹脂注入方法や最適材料を検討したが、膨張性のない材料を使用したため、空洞を残存させしまう結果となった。注入後に適度に膨張性を発揮し水密性もよく、強度もコンクリートと同等まで発揮される最適材料が使用できなかったことが原因である。アンカーフレーム等に使用する膨張性能をもつ無収縮モルタルの使用が考えられるが、今後も流動性・水密性・膨張性の良い最適材料登場を察知しておく必要がある。
- 3) 2mmピッチでワンサイド高力ボルトのバルブスリーブの提灯座屈の変形過程を観察し、最大外径は $d_1 = 32.8\text{mm}$ となった。したがって、RC床版部の最適拡大削孔内径は、当初計画通り $d_2 = 33.0\text{mm}$ 以上を掘削研磨目標とする必要があることがわかった。
- 4) RC床版部の拡大削孔研磨のために使用した特注品のダイヤモンドフレイクを電着させたダイヤモンドロータリーバーは、要求内径を確保するために十分な性能を維持していることがわかった。要求サイズまでの掘削研磨時間は1孔で5分～7分程度で施工完了することができた。また、1本当たりの耐久性は、6孔程度までは十分な施工性能を維持できることがわかった。
- 5) 残存ナットの天端面近傍に残るコンクリートをダイヤモンドロータリーバーで削るとき、ナット側をきずを付けないようにするには多少の慣れが必要であった。今回の試験では、アングルグラインダーにダイヤモンドロータリーバーを取り付け作業したが、グラインダー本体をレベル維持しながら作業すればキズは押さえられることがわかった。
- 6) ダイヤモンドロータリーバーで削り込まれたコンクリート粉は、市販のドリル装着用のフレキシブルワイヤーブラシを掘削孔から挿入回転させれば十分清掃が可能であった。
- 7) 残存ナットにワンサイド高力ボルトを貫通させるために、市販の超硬ロータリーバー（タンガロイ）で1 mm 程度内径を拡大切削する必要があったが、5分以内の比較的短時間で作業を完了することが可能であった。

5. 2 すべり試験結果

1) 3 試験体のすべり試験結果における摩擦係数 μ は、下記の値を示した。

$$\text{試験体 No1 : } \mu_1 = 0.539$$

$$\text{試験体 No2 : } \mu_2 = 0.504$$

$$\text{試験体 No3 : } \mu_3 = 0.607$$

したがって、全試験体で目標すべり係数値 $\mu = 0.40$ 以上をクリアした。

(写真-21～写真26を参照)

2) 本すべり試験により、遅れ破壊後に一端失った継手摩擦力は、ワンサイド高力ボルトの MUTF20 により、座金・ナットを再利用し母材と添接板と共に再締め付けを行っても継手摩擦力は、ワンサイド高力ボルト許容力レベルまでは回復可能であることが確認できた。ただし、以下の点はよく理解しておく必要がある。

3) 本補修案で採用したワンサイド高力ボルト MUTF20 (F8T相当) のボルト1本2面摩擦あたりの許容力(N)は $\rho_{a1} = 61.6\text{kN}$ である。

$$\rho_{a1} = 2 \text{面} \cdot \mu \cdot N1 / \nu = 2 \times 0.4 \times 131 / 1.7 = 61.6 \text{ (kN)}$$

$$\begin{aligned} \text{設計ボルト軸力 } N1 &= \alpha \cdot \sigma_{y1} \cdot Ae1 \\ &= 0.75 \times 1006 \text{ (N/mm}^2\text{)} \times 174 \text{ (mm}^2\text{)} \\ &= 131 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

ここに、 ν : 継手のすべりに対する安全率 (1.7)

μ : すべり係数 (0.4)

α : 降伏点に対する比率 (0.75)

σ_y : ボルトの耐力 (N/mm²)

Ae : ねじ部の有効断面積 (mm²)

一方、遅れ破壊を起こした高力ボルト M22 (F11T) の

ボルト1本2面摩擦あたりの許容力(N2)は $\rho_{a2} = 106.1\text{kN}$ である。

$$\rho_{a2} = 2 \text{面} \cdot \mu \cdot N2 / \nu = 2 \times 0.4 \times 216 / 1.7 = 101.6 \text{ (kN)}$$

$$\begin{aligned} \text{設計ボルト軸力 } N2 &= \alpha \cdot \sigma_{y2} \cdot Ae2 \\ &= 0.75 \times 950 \text{ (N/mm}^2\text{)} \times 303 \text{ (mm}^2\text{)} \\ &= 216 \text{ (kN)} \end{aligned}$$

したがって、60%程度の許容力までにしか回復できないことになる。

わかり易く例えれば、遅れ破壊前の高力ボルト F11T の一次締めトルク程度 (二次締めの60%程度) までしか回復されていないことになる。



写真-2 1 すべり荷重 $P_{s1} = 312.4\text{knN}$
 摩擦係数 $\mu_1 = 0.539$



写真-2 2 すべり荷重 $P_{s2} = 292.6\text{knN}$
 摩擦係数 $\mu_2 = 0.504$



写真-2 3 すべり荷重 $P_{s3} = 352.0\text{knN}$
 摩擦係数 $\mu_3 = 0.607$



写真-2 4 すべり後のナット側状況



写真-25 すべり発生後の添接板表面状況



写真-26 すべり発生後のワンサイド高力ボルト状況

6. まとめ

- 1) ワンサイド高力ボルトのバルブスリーブ部が提灯座屈生成するためのRC床版部への最適削孔内径は、33.0mm以上確保する必要がある。
- 2) RC床版部の削孔研磨施工は、コンクリート振動ドリルとダイヤモンドフレークを電着させたダイヤモンドロータリーバー（特注品）の組み合わせで有効に施工が可能である。ただし、残存ナットにきず付けない作業前をするためには2箇所程度の練習が必要。
- 3) ワンサイド高力ボルト MUTF20 を使用した本補修工法では、継手部の母材板厚は28mm以下の部位までが限界である。したがって、母材板厚の厚い支間の長い支間中央部や大規模な鋼製橋脚基部にある添接部には適用不可である。
- 4) RC床版内に残存したナットねじ部の切削（ねじ山1mm程度の切削）は、市販の超硬バー（タンガロイ）で十分施工可能である。1カ所5分以内に要求内径まで切削できる。
- 5) ワンサイド高力ボルト締め込み完了後、RC床版部に残る残存削孔は、現行では膨張性能をもつ無収縮モルタル注入が考えられるが、注入施工試験を別途実施する必要がある。
- 6) 高力ボルト F 11 T の遅れ破壊後に一端失った継手摩擦力は、本補修工法（残存座金・残存ナット・母材・添接板をワンサイド高力ボルトで再締め付け）により、ワンサイド高力ボルト許容摩擦力レベルまでは回復でき、摩擦係数 $\mu = 0.4$ 以上を確保することができる。

7. おわりに

本部会では交通規制や大規模な施工を伴わず、現在まで有効な取替え工法が少ない「既設橋RC床版内にある遅れ破壊後の高力ボルトを片面施工で取替えられる工法」に着目しおよそ2年間にわたり実験をメインに研究活動をし、高力ボルト遅れ破壊により、一端失った摩擦力が再び回復できるかをすべり試験により確認し、恒久補強対策までの一次的な応急補修策とし適用可能との試験結果を得ることができた。「取替えはできない」として諦めることなしに、既設橋のRC床版中にある「摩擦接合用高力座金」と「摩擦接合用六角ナット」は残存させ、締め込み片面から遅れ破壊した損傷ボルトのみを撤去し、同位置の片面ボルト孔からコンクリート掘削して裏側の締め込み空間を形成し、材片の片側や部材外側からのみの作業で締め込み可能なワンサイド高力ボルトを差し込み、再締め付けを行うといった斬新な補修工法を部会員全員で考え議論を重ね、明星大学の学部学生と共に試験室にて施工試験に励み、本報告を纏めることができた。

そもそも、ワンサイド高力ボルトMUTFシリーズは、遅れ破壊を起こしにくいボルトコアピン・ナットのねじ山谷設計やボルトコアピンの耐力を $\sigma_y = 1200\text{N/mm}^2$ に近い所までの設計をして、耐遅れ破壊特性を持たせ開発されたボルトである。最近では、SHTBボルト（超高力ボルト）など、従来の高力ボルトF10Tの約1.5倍という超高耐力化を実現し、F14T級（ 1400N/mm^2 ）やF15T級（ 1500N/mm^2 ）の強度を持たせながら、素材開発や応力集中を緩和できるボルト形状や新ねじ形状の採用により、耐遅れ破壊性能を付与した高力ボルトが開発されている。したがって、ワンサイド高力ボルトのコアピンにSHTBボルトF15T級の強度をもたせられれば、高力ボルトF10Tの85%程度まで許容力を発揮することができるため、本補修工法の提案は応急補修案で終わることなく、この提案手順のまま恒久補強案に変化させる可能性を秘めている。もちろんこの時にはすべり試験のみならず、リラクゼーション試験や疲労耐久性試験も同時に実施する必要がある。また、試験に際してコアピンの軸力変動を計測するため、軸力ゲージを埋め込む必要があるがコアピン直径が小さいためゲージ埋め込み方法の検討も同時に行う必要がある。

昭和39年から昭和48年にかけて架設された橋梁は、半世紀を向かえ始める現実を目の前にして、交通規制等の障害をあたえることなしに継続的に長寿命化させるための大量補修・補強時代の宿命に備えるため、予め、潜在する問題点に対処する手法を考え払拭しておく必要がある。このため、コアピンの製造メーカーやボルト製造メーカーには、上記性能を有した遅れ破壊補修専用ワンサイド高力ボルトの開発・登場を切望するしだいである。