

(論文)

# 熱プレストレスを活用した橋梁補強工法

## Thermal Pre-stressing for Bridge Strength Enhancement



山口邦彦\*  
Kunihiko Yamaguchi



沼田 克\*  
Katsu Numata



山田岳史\*\* (工博)  
Dr. Takeshi Yamada

Pre-stressed continuous composite girder bridges are constructed with either of following two methods: 1) the jacking method; 2) the outer/inner pre-stress cables method. Both construction methods require many complicated design and fabrication procedures. In this paper a new method is proposed that incorporates thermal pre-stressing. Theoretical induced pre-stress force and fabrication procedures were examined. Study results indicated that the fillet of the corner of the steel piers was too small, and that the fatigue cracks in the fillet were due to excessive stress concentration. Further study showed that fatigue crack development could be prevented with thermal pre-stressing. Test results indicated that pre-stressing was effective.

まえがき = バブル時代が終わり、橋梁構造物も合理化・省力化が叫ばれ、とくにライフサイクルコスト (LCC) が議論される時代となり、橋梁の耐久性は 100 年を目安にすることになった。一方、各地で老朽化橋梁が増しつつあり、その維持補修の問題も、橋梁技術者にとって重要な課題である。

最近、合成・複合構造の開発・研究が盛んである。中でも、連続合成桁の見直し普及が各地で行われている。従来の連続合成桁は、中間支点上のコンクリート床版にひび割れ制御を目的とした圧縮力を導入するために、内・外ケーブル緊張によるプレストレス導入工法や、中間支点のジャッキアップ・ダウン工法が用いられてきた。しかし、その設計・施工法は煩雑なものであった。

そこで、連続合成桁の耐久性向上及びコスト削減のため、補強部材の加熱、あるいは本体の加熱による温度差応力を利用して、プレストレス力を導入する熱プレストレス工法<sup>1)</sup>を開発した。この工法によると、内・外ケーブルや、中間支点のジャッキアップ・ダウンが不要で、連続合成桁が容易に建設できる。また、単純桁の連続化、既設橋梁の補修・補強、あるいは床版の補強への応用も可能である。

また最近、鋼製橋脚に疲労亀裂及び低サイクル疲労亀裂が多数発見されている。その応急対策として、鋼板あて板をボルト取付けする補強工事が実施されている。このたび、熱プレストレス工法による補強法がストップホールなしで疲労亀裂の進展を防止できることを疲労実験で確認した。隅角部の疲労亀裂の恒久対策としても熱プレストレス工法による補強が可能である。

### 1. 熱プレストレス工法の概要

フックの法則による応力ひずみ  $\epsilon_s$  は、

$$\epsilon_s = \sigma_s / E \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\sigma_s$  : 応力度 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $E$  : ヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)

温度差による熱ひずみ  $\epsilon_t$  は、

$$\epsilon_t = \alpha \cdot t \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\alpha$  : 線膨張係数 (1/°C)  
 $t$  : 温度差 (°C)

応力ひずみと熱ひずみは同じであり、温度差応力度  $\sigma_t$  は、  
 $\sigma_t = E \cdot \epsilon_t \dots\dots\dots (3)$

となる。熱プレストレス工法の原理は、この温度差応力度を強制的に定着するものである。

熱プレストレス工法 1 (図 1 参照) は、鋼補強部材を加熱して温度膨脹させた状態で鋼桁に高力ボルトで定着する。補強部材が常温に戻れば温度差応力度が発生し、合成断面にプレストレス力を与えるものである。熱プレストレス力は、桁と補強材の断面積比及び曲げ剛性などにより変化するが、相対平均温度差 60°C で補強部材の応力度は 120 N/mm<sup>2</sup> 程度導入が可能である。この応力度に断面積を乗ずればプレストレス力となる。この応力導入法は、引張及び圧縮の両方が可能である。

さらに別工法があり、熱プレストレス工法 2 (図 2 参照) は、床版と鋼桁間にすべり部を設けておき、鋼桁を加熱

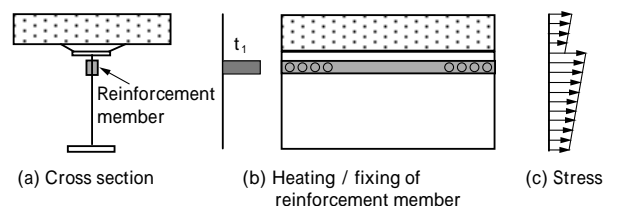


図 1 熱プレストレス工法 1  
Fig. 1 Thermal pre-stressing method-1

\*都市環境・エンジニアリングカンパニー 構造技術部 \*\*技術開発本部 機械研究所

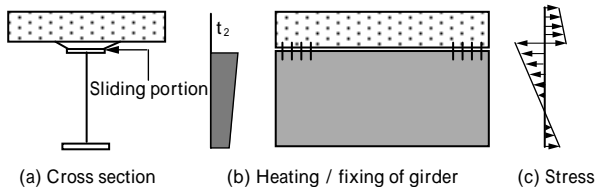


図2 熱プレストレス工法2  
Fig. 2 Thermal pre-stressing method-2

した状態のもとで床版と鋼桁とを定着し、桁が常温に戻れば、熱ひずみ効果によって床版断面には圧縮プレストレス力を、また鋼桁断面には引張プレストレス力を導入するものである。

熱プレストレス力は不静定であるので、断面積及び温度差を仮定して、変形法によるフレーム解析で求める。熱プレストレス工法1では、プレストレスの付与位置が自由にとれる。たとえば合成桁断面の図心に合わせると負の曲げモーメントは0となり、軸方向力による応力度のみが導入できる。逆に、支間部に負の曲げモーメントをあたえると、支点部には正曲げモーメントが作用する。すなわち、プレストレス付与位置を変化させ、これらを巧みに組み合わせれば、連続合成桁に所要のプレストレス力を導入することができる(図3参照)

## 2. 単純桁での実験

熱プレストレス工法は、補強材の加熱及び定着のため、人為的な作業が不可欠になる。その施工性及び導入プレストレス量の妥当性を検討するために、切出しスパン約4mの老朽補修桁の下フランジのカバープレートに、熱プレストレス工法で応力を導入する実験を行った(写真1



写真1 熱プレストレス導入実験状況  
Photo 1 Scene of experiment of thermal pre-stressing

参照)。カバープレートの加熱にはガスバーナを使用し、そして相対温度差35℃を目標として約1mの範囲を局部的に加熱した。そのときの最高温度は145℃に達したが、とくには断熱及び冷却は不要であり、所定の温度差を与えることができた。また温度伸縮量は、目標値1.60mmに対して誤差は0.09mmであり、その導入応力度は計算値の87%であった。ところが、フランジの水平面に4mmのそりが発生した。これは、補強断面が溶接L形で初期曲がりがあった、取付け後の形状がC形で、下フランジの面内剛性不足によるフランジ面内曲げが発生した、及びカバープレート図心と定着ボルトの偏心による曲げが発生したことなどに起因したと思われる。今回の実験桁断面のみの特異事象と考えられる。これはまた、補強構造は偏心曲げの少ない構造にすべき教訓でもある。熱プレストレス工法による応力導入は、ひずみ制御にもとづく補強部材の温度伸縮量の管理さえすれば、正確な応力導入が可能となる。実験では温度伸縮量の測定に変位計を使用した。現場ではダイヤルゲージで1/100mm単位で読めば十分である。

## 3. 単純桁の連続化

単純桁が連続的に架設されている場合、橋梁のノージョイント化及び耐震性の向上のため、主桁を連結する桁連続化工法が最近多く施工されている。連続化すると活荷重は連続桁として作用するので、中間支点近傍では負の曲げモーメントが卓越する。そこで、主桁連結材の上フランジ側の部材を負の曲げモーメントを避ける区間まで延長し、熱プレストレス工法1で合成断面にプレストレスを与えることで、連続合成桁化が容易となる。補強材取付位置は、孔明け作業性、摩擦面数、プレストレス付与位置などより、腹板の上部モーメントプレート位置がよい(図4参照)。この合成桁化により、舗装を除去する防水工施工の省略、交通規制期間も短縮できる。

新設の連続合成桁は、まず単純合成桁を架設し、熱プレストレス工法による連続合成桁化が有利となる。その理由は、死荷重による負の曲げモーメント相当分のプレストレス量が小さくなることである。

また熱プレストレス工法により、ラーメン橋をも連続合成化することができる。多径間合成ラーメン橋は、低桁高化で安定感があり、耐震性にすぐれ、上下部全体の工期・コスト削減により次世代橋梁として推奨できる。熱プレストレス工法は、前述の被補強鋼桁断面を、トラ

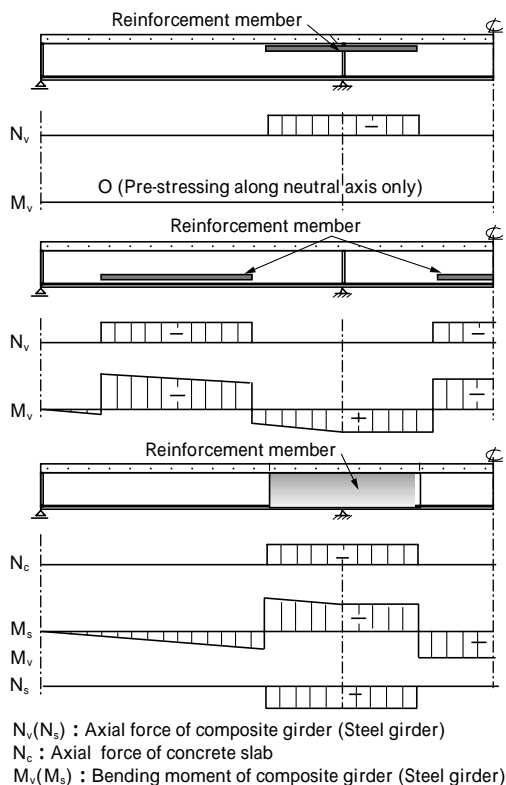


図3 熱プレストレス工法による部材力  
Fig. 3 Member force by thermal pre-stressing method

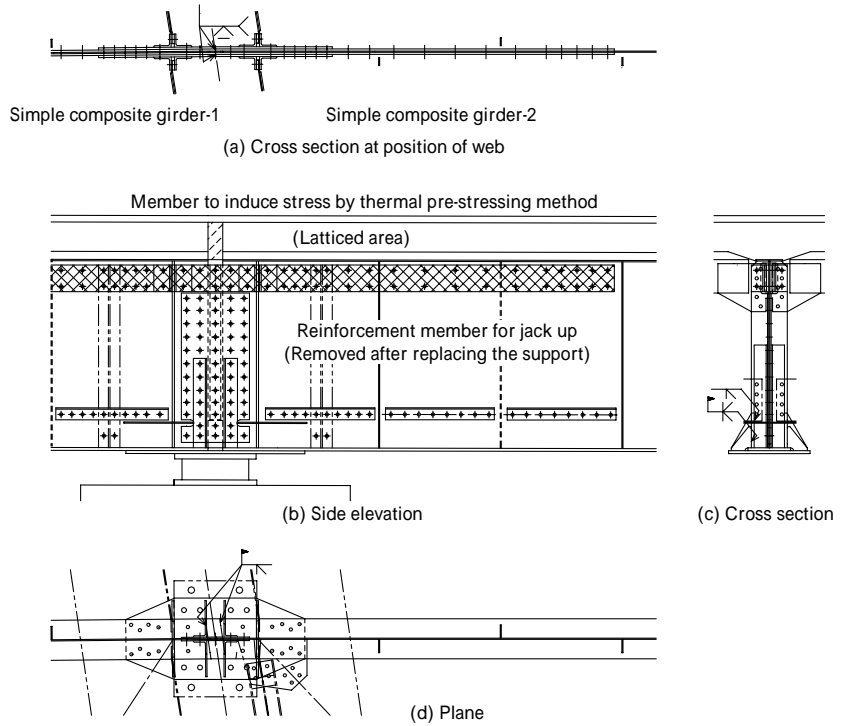


図4 連続化による連続合成桁の試算例  
Fig. 4 Trial design to convert simple girders into a continuous composite girder

ス・アーチ・床版・コンクリート部材などに置換することにより、あらゆる構造物の新設・補強・補修に応用可能である。

#### 4. 橋脚隅角部の補強要領

疲労損傷の補強はボルト構造が望ましく、図5に示す要領の引張フランジ接合が考えられる。しかし、引張フランジ接合の有効ボルトは、母材に最も近い1列だけであること、引張フランジの曲げが卓越し隙間が発生するなど、継手の剛性不足により採用はできない。

既設橋脚の隅角部では、応力集中を緩和するために、フィレットの新設に相当した規模の補強が必要となる。また、大型部材は箱内部へ搬入することができないので、側面におけるあて板方式の補強となる。あて板補強をボルト接合する場合は、部材を直線交差させても応力集中が生じない。側面での補強板の長さは、隅角部の応力度の最大位置における応力分布を考慮すると、フランジの半幅以上、理想的には半幅の1.5倍が必要である。その要領を図6に示す。ところが、鋼板あて板補強は活荷重応力度しか作用せず、死荷重応力度分だけ遊ばせることになる。これを有効に働かせるのが、熱プレストレス工法である。

ボルト接合補強部材は、溶接がないので疲労強度が高い。さらに、補強部材の存在により、断面積及び断面係数の増大が図れ、また発生応力度も低減する。したがって、応力振幅が減少する。熱プレストレス工法は、プレストレスによる応力改善と面積補強による応力改善のほか、さらにボルト接合材を用いて疲労強度の改善をするトリプル効果がある。また導入プレストレス力は、引張・圧縮の両方が可能で、座屈補強・そのほかの補強との組み合わせも自由自在である。

フランジ面の疲労亀裂が大きくなると、梁断面が開断

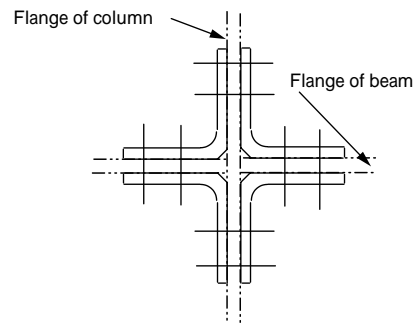


図5 十字継手のせん断補強  
Fig. 5 Reinforcement member of cross joint

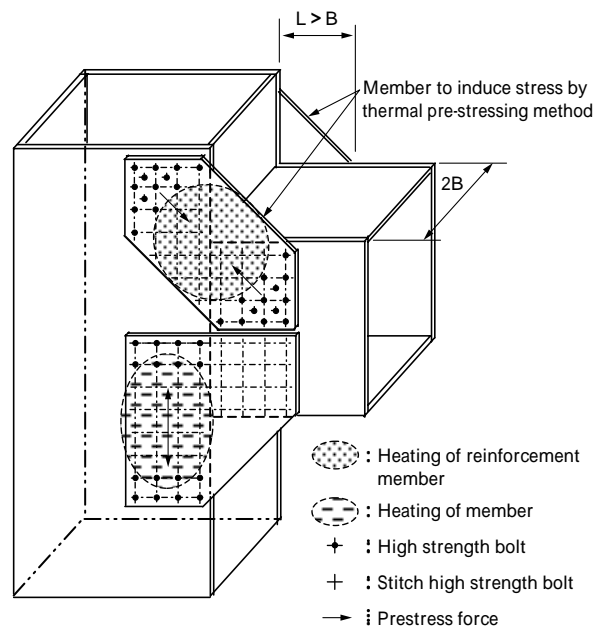


図6 隅角部の熱プレストレス補強  
Fig. 6 Thermal pre-stressing method for steel pier

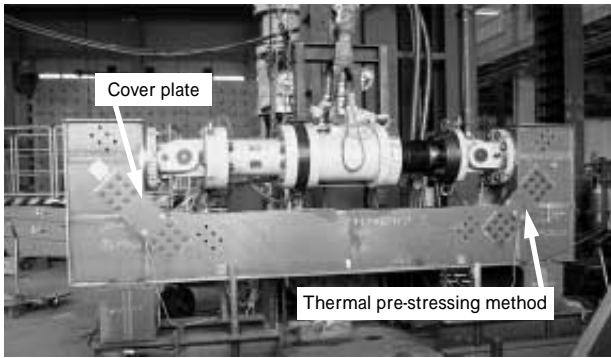


写真2 隅角部補強の疲労試験状況  
Photo 2 Fatigue test of corner reinforcement



写真3 あて板補強 ( $A_p$ ) の試験後  
Photo 3 Fatigue crack of  $A_p$  specimen



写真4 熱プレストレス補強 ( $C_p$ ) の試験後  
Photo42 Fatigue crack of  $C_p$  specimen

面となるのでねじり剛性は著しく低下する。そのため、図5に示す要領によるせん断力伝達補強を併用しなければならない。この補強は、亀裂の密閉効果にもなる。

## 5. 隅角部の疲労実験

熱プレストレス工法による疲労亀裂の補強効果を確認するために、疲労実験を実施した。実験体の形状及び載荷要領は、写真2に示すように実験体と載荷フレームとが兼用のコ字形水平加振タイプである。まず、補強板を取付けないフィレット ( $R=6\text{mm}$ ) の実験体 ( $A_0$  及び  $C_0$ ) で、亀裂再現実験を実施した。補強板の大きさは2種類とし、実験体  $A_p$  は所要よりやや小さ目、実験体  $C_p$  (写真2) は所要の補強板を想定したものである。いずれも

左右の大きさが同じで、亀裂発生後、片側は鋼板あて板補強、反対側は熱プレストレス補強を行い、相対的な比較を行った。

載荷には600kNのサーボジャッキを使用し、また変動荷重は200kN、5Hzとした。その荷重による梁一般部の応力度は、65MPaである。事前の亀裂発生実験 ( $A_0$  及び  $C_0$ ) も同じ荷重で実験し、その繰返し数  $N$  はそれぞれ  $4.33 \times 10^5$  及び  $1.22 \times 10^6$  であった。補強板の取付け後の  $A_p$ 、及び  $C_p$  の繰返し数  $N$  は、それぞれ  $1.08 \times 10^6$ 、及び  $1.41 \times 10^6$  である。

あて板補強側では、 $A_p$  及び  $C_p$  とも亀裂が進展した (写真3参照)。熱プレストレス側では、 $A_p$  は亀裂の進展が僅かとなり、 $C_p$  では亀裂の進展が認められなかった (写真4参照)。疲労亀裂に圧縮プレストレス応力度を導入すれば、ストップホールを設けなくても亀裂の進展が防止できると考えられる。

ここで大胆であるが、亀裂が生じた場合応力度を約50%改善する補強対策が必要であるとの提言を試みた。これは、隅角部にフィレット ( $R > h/5$ ) を設けるのと同様な処置である。すると、強度等級は2段階の向上に相当し、疲労寿命は約4倍となり十分と考える。

むすび=熱プレストレス工法は、熱制御ではなく、ひずみ制御で簡単明瞭である。ただし、従来の施工法に比べれば、ひずみの現場計測作業が追加となる。

- 1) 熱プレストレス工法により、耐荷性・耐久性に富み、コスト削減も可能な連続合成桁を設計・製作・架設できる。
- 2) 単純桁を連結して、連続合成桁化するときにも適用できる (適用範囲の拡大、機能の向上、新規の建設工法)。
- 3) 既設鋼桁・鋼製橋脚・床版などの補修・補強・増強に応用できる。
- 4) 疲労亀裂、低サイクル疲労亀裂などの補修・補強に威力を発揮し、恒久的な亀裂補強対策となる。
- 5) コンクリート構造物、合成・複合橋梁などあらゆる構造物に活用できる。

熱プレストレス工法は、焼きばめ・冷やしばめを鋼桁などに応用したものである。焼きばめ・冷やしばめはやり直しができないが、熱プレストレス工法はやり直しが可能である。また、経済的であることが特長である。

### 参考文献

- 1) 山口邦彦ほか：熱プレストレス工法による合成桁橋の開発・研究、鋼構造年次論文報告集第8巻、(2000) p.477.