

付録 高力ボルトの高温せん断残余耐力が崩壊温度に与える影響

本論文の 4 章 4.4 節で提案済みの高力ボルト個材の高温せん断応力 τ ~ せん断変形 Δ 関係は、今までに公にされた高力ボルト個材のせん断に関する既往実験データから確定したものである。それは、常温・高温に関わらず 0.5cm のせん断変形能力を有し、400℃を上回る温度域では変形限界到達後にせん断残余耐力を有する。特に加熱された梁の熱応力が大きく成長する場合、梁継手は後者の効果によって高温度域まで持ちこたえることとなる。しかしながら、高力ボルトの高温時における残余耐力特性に関しては、本論 2 章で述べた通り、それを立証する実験データ等は未だ少ないのが現状である。

本付録では、平島らの既往実験[43]から得られた実際のせん断残余耐力の他に、それが半分の場合、およびそれを有さない場合の高温時力学特性を仮定して数値解析を行い、高力ボルトの高温せん断残余耐力が架構の崩壊温度に与える影響を検討する。

ここで対象とする高力ボルト個材のせん断応力 τ ~ せん断変形 Δ 関係は、以下に示す [TypeA] ~ [TypeC] のそれである。

[TypeA] 既往の実験結果から定めた τ ~ Δ 関係の場合

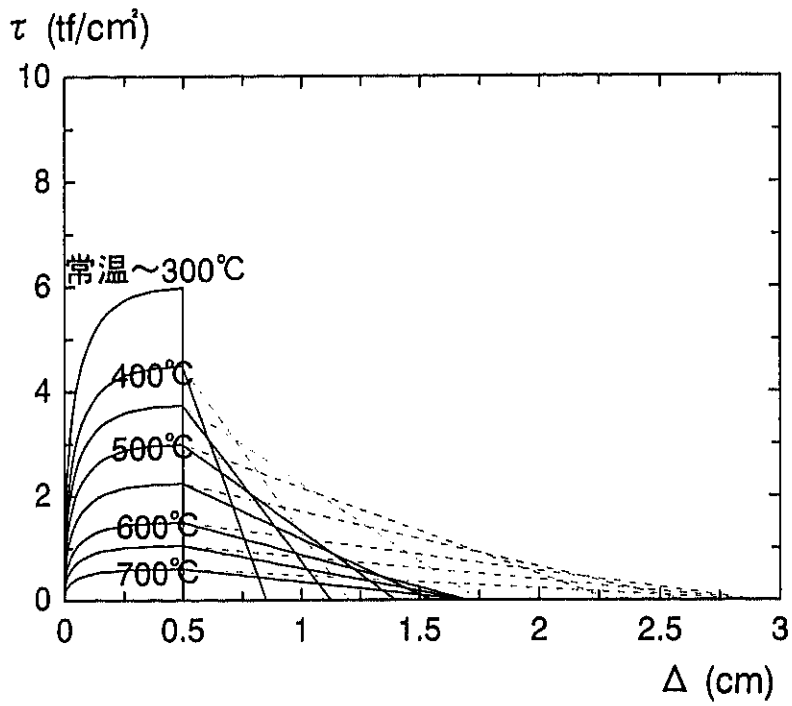
この場合の τ ~ Δ 関係は、本論 4 章の 4.4 節で述べた式(4.4-1)、式(4.4-2)で与えられる。すなわち、これは前節までに検討を行ってきた τ ~ Δ 関係である。

[TypeB] [TypeA] の τ ~ Δ 関係において高温残余耐力区間の変形能力が半分になる場合

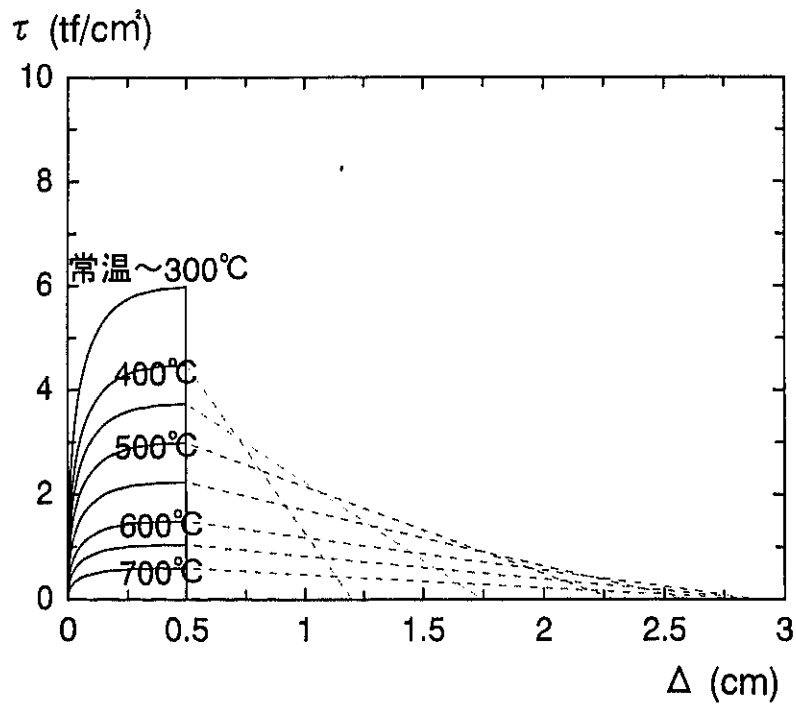
この場合の τ ~ Δ 関係は、[TypeA] のそれに比べて、残余耐力区間の変形能力が半分になるものである。すなわち、これは式(4.4-2)中の $\Delta_2(T)$ が、次式で与える $\Delta_{B2}(T)$ に置換されたものである。

$$\Delta_{B2}(T) = \begin{cases} 0.0 & : RT \leq T < 400 \\ 0.45 + \frac{0.5}{100}(T - 400) & : 400 \leq T \leq 500 \\ 0.9 + \frac{0.3}{100}(T - 500) & : 500 \leq T \leq 600 \\ 1.2 & : 600 \leq T \end{cases} \quad (\text{付} \cdot 1)$$

付図 1(a)に τ ~ Δ 関係を示す。図中実線がこの場合の τ ~ Δ 関係である。また、同図中には [TypeA] の τ ~ Δ 関係を破線で併記している。



(a) [Type B] 実際の残余耐力の半分の場合



(b) [Type C] 残余耐力が無い場合

付図1 高力ボルトの高温時せん断応力 τ ～せん断変形 Δ 関係

[TypeC] せん断残余耐力を有さない $\tau \sim \Delta$ 関係の場合

この場合の $\tau \sim \Delta$ 関係は、せん断残余耐力を有さないものである。すなわち、これは式(4.4.2)中の $\Delta_2(T)$ が、何れの温度においても零の場合である。付図 1(b)に、この場合の $\tau \sim \Delta$ 関係を示す(図中実線)。

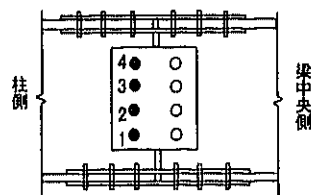
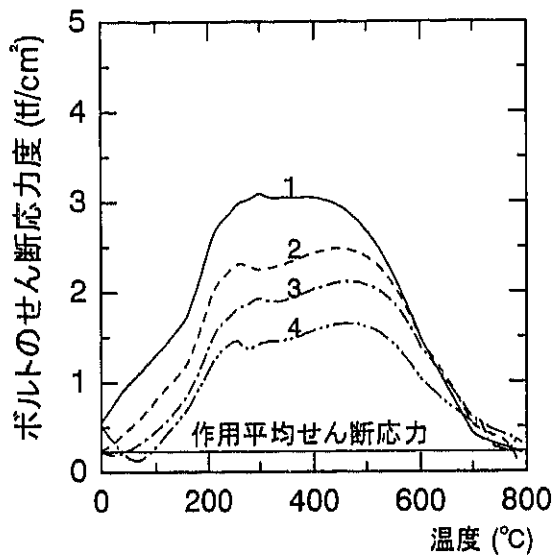
付図 2(a)~(c)に、[TypeA]~[TypeC]の $\tau \sim \Delta$ 関係を用いた数値解析の一例を示す。これは、2層9スパン架構に $L/h = 2$ 、 $\bar{p} = 0.1$ 、 $\bar{q} = 0.2$ 、梁断面 H-460×200×10×15 を設定した場合の数値解析結果である。(a)~(c)図には、それぞれ[TypeA]~[TypeC]の $\tau \sim \Delta$ 関係に対するウェブボルトのせん断応力の温度履歴が示される。各図において番号を付した曲線群は、(a)図の右端に記した継手図中の同番号のボルトの挙動を表す。また、図中にはボルトに作用する平均せん断応力が横実線で併記されている。

[TypeA]の $\tau \sim \Delta$ 関係から得られる精算結果((a)図)は、本論 4 章 4.8.2 節の精算例[2]で示したそれと同じである。部材温度が 590℃においてボルト 1 のせん断変形が変形限界 0.5cm に至り、その後、ボルト 1 は耐力劣化を来たしながら変形が進行する。この場合の架構の崩壊温度は 775℃であり、崩壊モードは梁継手のせん断崩壊である。

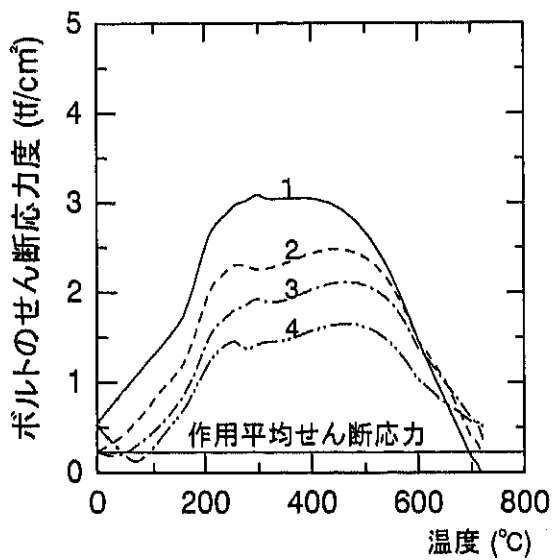
[TypeB]の $\tau \sim \Delta$ 関係の場合((b)図)、変形限界温度 590℃を超えたボルト 1 のせん断応力は、[TypeA]のそれに比べて激しく劣化する。これは、図 4-12-1 に見るように、[TypeB]の残余耐力区間では劣化勾配が急になるからである。この場合の架構の崩壊温度は 720℃であり、[TypeA]の場合に比べて、55℃下回る。このときボルト 1 のせん断応力はほぼ零に帰し、それが負担していた梁上荷重によるせん断力(図中横実線で表す作用せん断応力)は、その他のウェブのボルト群に再配分されることになる。

[TypeC]の $\tau \sim \Delta$ 関係の場合((c)図)、ボルト 1 は、せん断変形が変形限界 0.5cm に至ると同時に破断する。(c)図中においてそのときの部材温度は、せん断応力が急激に零になる温度である。ボルト 1 が破断した後も、この架構の梁上荷重は小さいため($\bar{q} = 0.2$)、梁継手はさらに高温まで持ちこたえる。部材温度が 624℃に至るとボルト 2 が破断し、これより温度上昇した 676℃において、ボルト 3 も破断して梁継手はせん断崩壊する。この場合の架構の崩壊温度は 676℃であり、[TypeA]の場合に比べて 100℃程度下回る。

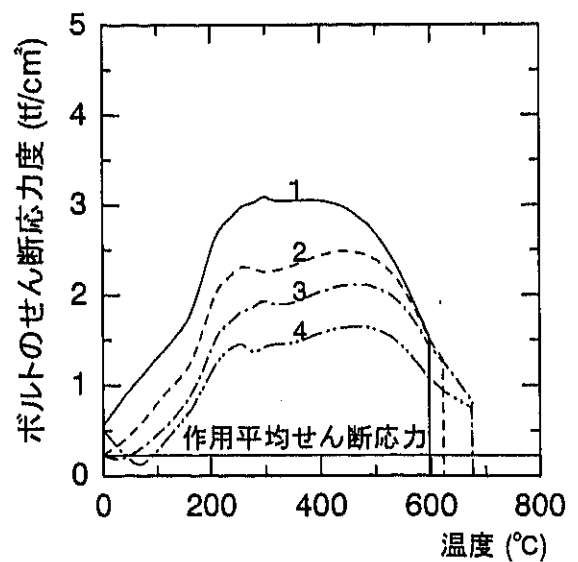
付図 3(a)、(b)は、[TypeA]~[TypeC]の $\tau \sim \Delta$ 関係による数値解析結果と理論崩壊温度を一括したものである。同図には 2 層 9 スパン架構の解析結果が示される。(a)図は梁断面 H-460×200×10×15 の場合、(b)図は梁断面 H-900×200×15×20 の場合である。全図の横軸が温度 $T(^\circ\text{C})$ 、縦軸は \bar{q} である。図中の曲線群は架構の理論崩壊温度を表す。それらの詳細は 4.9 節で述べたそれと同じである。一方、図中のプロット点群は精算解を表す。図中○、●印は[TypeA]の、▲印は[TypeB]の、■印は[TypeC]の精算崩壊温度である。このうち梁継手がせん断崩壊したものは●、▲、■印をつけた。精算において、ウェブに配した何れかのボルトのせん断変形が早期に変形限界 0.5cm に至る架構については、そのときの部材温度を図中◎印で示す。



(a) [Type A] 実際の残余耐力の場合

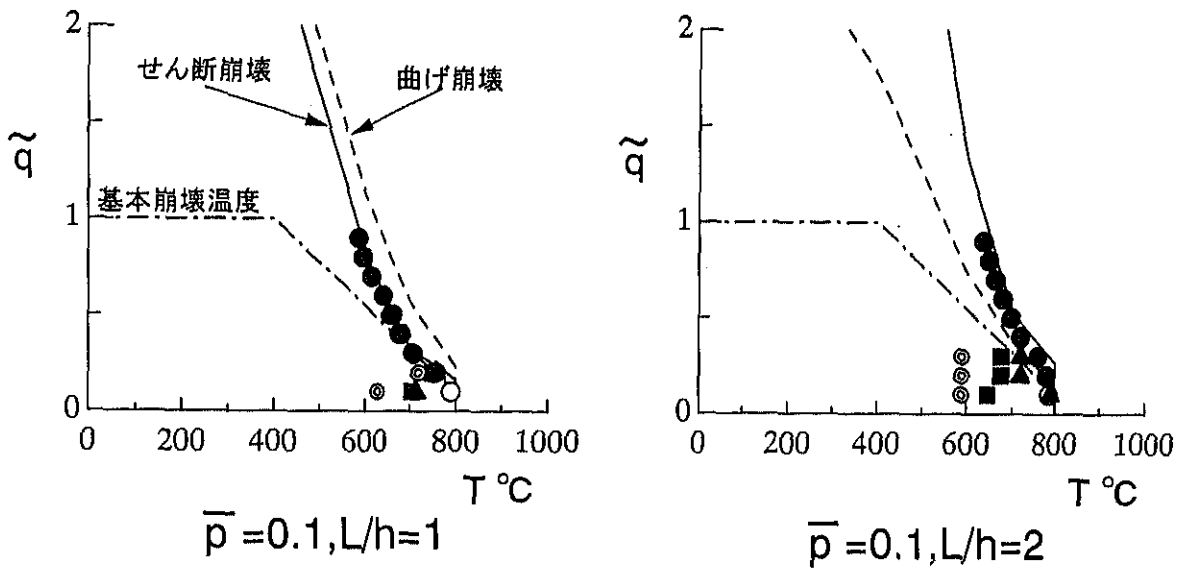


(b) [Type B] 実際の残余耐力の半分の場合

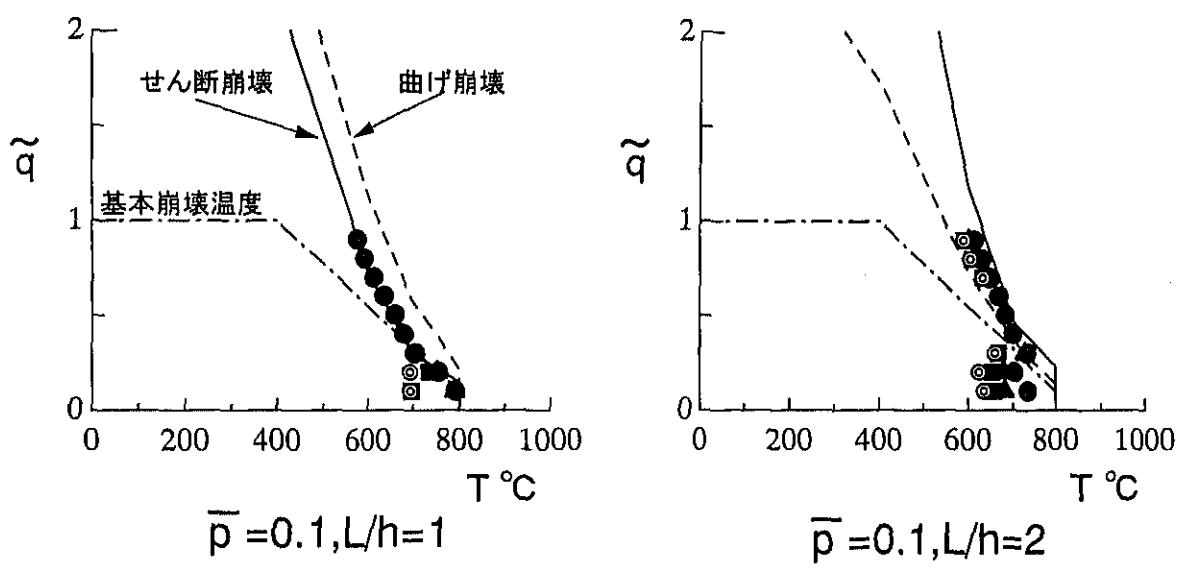


(c) [Type C] 残余耐力が無い場合

付図2 ウェブボルトのせん断応力の温度履歴
(2層9スパン架構 $L/h = 2$, $\bar{p} = 0.1$, $\tilde{q} = 0.2$)



(a) 梁断面が H-460×200×10×15 の場合



(b) 梁断面が H-900×200×15×20 の場合

- | | |
|---|---|
| <p>実線:せん断崩壊型の理論崩壊温度
 破線:曲げ崩壊型の理論崩壊温度
 一点鎖線:基本崩壊温度</p> | <p>○:精算崩壊温度(TypeA、柱の座屈)
 ●:精算崩壊温度(TypeA、継手のせん断破断)
 ▲:精算崩壊温度(TypeB、継手のせん断破断)
 ■:精算崩壊温度(TypeC、継手のせん断破断)
 ◎:精算解(ウェブに配した何れかのボルトの変形が0.5cmに至る場合の部材温度)</p> |
|---|---|

付図3 理論崩壊温度と精算崩壊温度の比較(2層9スパン架構の場合)

(a)、(b)両図において、[TypeB]と[TypeC]の精算崩壊温度が省略されているケースがある(例えば、 $L/h=1$ で \tilde{q} が大きな架構の場合)。これは、ウェブに配した全ボルトのせん断変形が、ほぼ同一部材温度下で一斉に0.5cmに至る架構、すなわち◎印がプロットされない架構である。これらの架構では架構と継手内の応力再配分はほぼ完結し、この場合[TypeA]~[TypeC]の精算崩壊温度は等しくなるので、(a)、(b)図では[TypeA]のそれ(●印)で代表している。

(a)、(b)図より、ウェブに配したボルトの何れかが0.5cmに至る架構の場合(◎印)、精算崩壊温度は、高い崩壊温度から順に、[TypeA](●印)>[TypeB](▲印)>[TypeC](■印)である。平島らの実験結果を踏まえた[TypeA]の精算崩壊温度はせん断崩壊型の理論崩壊温度に近接するものの、せん断残余耐力を有さない[TypeC]のそれは、特に \tilde{q} が小さな架構の場合に、せん断崩壊型の理論崩壊温度を下回る(■印)。したがって、梁上荷重が小さな架構では崩壊温度にバラツキが見られ、高力ボルトのせん断残余耐力は梁継手の耐火性能に影響を与えることが分かる。

しかし実際の架構では、梁継手がせん断崩壊するとき、フランジに配した添え板群もせん断され、それらは継手のせん断強度に寄与することが考えられる。特に梁上荷重が小さな架構では、その寄与分はある程度期待できるものと思われる。さらに梁継手部では、母材と添え板が重なり合うことで熱容量が増し、梁材や柱材に比べて温度上昇が緩やかになることが考えられる。これは盛期火災など、短時間で急激に高温になる火災条件に該当し、特に加熱面に露出しないボルト軸部では、火災時の温度上昇は緩慢になると考えられる。これらは、何れも梁継手の耐火性能を向上させる要因である。本研究では、フランジ板のせん断強度寄与分を無視し、さらに全部材を等しく温度上昇させることで、実際の架構に比べて厳しい構造・火災条件下で数値解析を施している。したがって、梁上荷重が小さな架構において、せん断残余耐力の違いに依る崩壊温度のバラツキ(●、▲、■印)は、上述の耐火性能向上効果を鑑みると、実際の架構では副次的な影響因子とも考えられる。勿論、このことはまだ検証され得たことではなく、確たる実証データ等は何も得られていない。梁継手の高温実験によりそのせん断強度、および継手各要素の温度分布の解明が必要であり、これらは今後の研究課題になると認識している。