

ボルト締めした円孔の応力集中と疲労強度

森 猛

正会員 工博 法政大学助教授 工学部土木工学科 (〒184 東京都小金井市梶野町3-7-2)

疲労損傷の補修方法の一つに疲労亀裂の先端に円孔をあけ、それをボルト締めする方法がある。ここでは、この方法で補修した疲労損傷部材の疲労強度評価を行なう際の鍵になると考えられるボルト締めによる円孔壁での応力集中の緩和に注目し、中央にボルト締めした円孔を有する矩形鋼板の応力測定試験および三次元有限要素応力解析を行なうことにより、応力集中緩和に対する母板の厚さ、円孔径、ボルト軸力の影響について検討している。さらに、応力測定試験結果と応力解析結果から求めた応力集中の緩和を利用した疲労強度評価方法を示すとともに、その評価方法の妥当性を既往の疲労試験結果と比較することにより確かめている。

Key Words : repair of fatigue damage, stop hole, bolting, stress concentration factor, finite element method, fatigue strength

1. はじめに

近年、交通量の増加や車両の重量化に伴い鋼道路橋においても疲労損傷の発生事例が数多く報告されている^{1), 2), 3)}。これらの損傷は、主に車両の走行による応力変動の繰り返しが原因で生じる微細な亀裂によるものであるが、これらの亀裂をいかなる処置も施さずに放置すれば、亀裂は進展し、やがては橋全体の崩壊に至る恐れもある。また、崩壊に至らなくとも、亀裂進展による変形などが原因で交通止めとなったときの社会生活への影響は計り知れない。したがって、橋梁を長期間安全に使用するためには、疲労損傷の適切な補修を行なうことが不可欠である。しかしながら、疲労損傷に対してどのような補修・補強を行えばよいのか明確な判断基準が設けられていないのが現状かと思われる。これは、損傷部を種々の方法で補修した場合の補修効果、すなわち補修部材の疲労強度が充分には明らかとされていないことに原因の一端があると考えられる。

疲労損傷の補修方法の一つにストップホール法がある。これは、疲労亀裂先端に円孔（これをストップホールと呼ぶ）をあけ、亀裂先端の応力集中を緩和することにより疲労強度の向上を図る方法である。また、このストップホールをボルト締めすることにより応力集中はさらに緩和されるため、その補修効果は高いとされている。ここでは、疲労亀裂先端に円孔をあけ、それをボルト締めする補修方法をボル

ト締めストップホール法と呼ぶ。

ストップホール法により補修した部材の疲労強度については、ストップホール先端での応力範囲を求め、それを基に評価すればよいとされている^{4), 5)}。また、ストップホール先端での応力範囲を求めるための計算式も示されている^{4), 5), 6)}。同様に、ボルト締めストップホール法で補修した場合の疲労強度についてもストップホール先端の応力範囲で整理できることが実験的に明らかとされている⁷⁾。したがって、ボルト締めした場合のストップホール壁での応力集中係数、すなわちボルト締めすることによりストップホールだけの場合と比べてどの程度応力集中が緩和されるかを明らかにすることにより、ボルト締めストップホール法により補修した部材の疲労強度評価が可能となる。

ボルト締めによる応力集中の緩和は、母板とワッシャ間およびワッシャとボルト頭（あるいはナット）間の摩擦によりワッシャやボルト頭が力を伝達するために生じると考えられる。したがって、ボルト締めによる応力集中の緩和に対しては、母板の厚さ、ストップホールの大きさ、ボルト軸力など、様々な因子が影響するものと考えられる。

本研究では、ボルト締めストップホール法により補修した疲労損傷部材の疲労強度評価を行なう際の鍵になると考えられるボルト締めによる円孔壁での応力集中の緩和について、中央にボルト締めした1つの円孔を有する矩形鋼板の応力測定試験および三

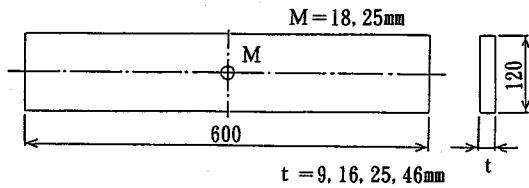


図-1 試験体の形状および寸法

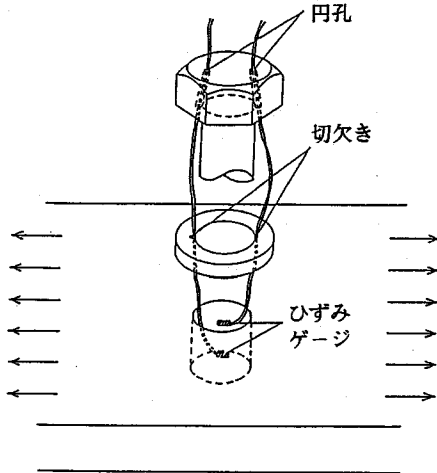


図-2 ゲージリードの取り出し方法

次元有限要素応力解析を行なうことにより検討する。すなわち、ボルト締めによる円孔壁での応力集中の緩和に対する母板の厚さ、円孔径、ボルト軸力の影響について検討する。さらに、応力測定試験結果と応力解析結果から求めた応力集中の緩和を利用した疲労強度評価方法を示すとともに、その評価方法の妥当性を既往の疲労試験結果⁷⁾と比較することにより確かめる。

2. 応力測定試験

(1) 試験体

供試鋼材は板厚9mmと16mmの溶接構造用鋼材SM490YAおよび板厚25mmと46mmのSM570である。これらの鋼板を幅120mm、長さ600mmの帯板に加工し、その中央にストップホールを想定して直径18mmあるいは25mmの円孔をあけた。試験体の形状・寸法を図-1に示す。試験体は上記の板厚と円孔径を組み合わせて8体用意した。以後、試験体は円孔径と板厚を組み合わせた M□T□ という記号で呼ぶ。例えば、円孔径25mm・板厚46mmの試験体記号はM25T46である。さらに、これらの円孔をボルトで締め付けた。使用したボルトは径18mmの円孔に対してトルク係数0.18

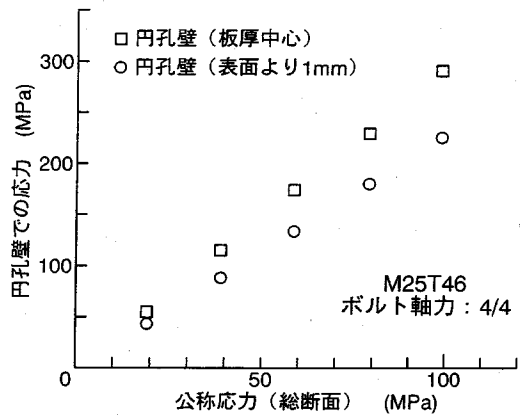


図-3 円孔壁の応力と公称応力の関係

のF10T-M16、径25mmの円孔に対してトルク係数0.18のF10T-M22である。ボルトの締め付けは、各ボルトの標準軸力 (F10T-M16で106kN, F10T-M22で201kN) の0/4, 1/4, 2/4, 3/4, 4/4, 5/4倍の軸力がボルト軸に導入されるようにトルクレンチで行なった。

ここでは、以上の母板の厚さ、円孔径、ボルト軸力を組み合わせた計48種類の条件で応力測定試験を行なっている。

(2) 試験方法

すべての試験体に対して、円孔壁での応力集中が最も高くなると予想される板厚中心部にゲージ長1mmの歪ゲージを貼付した。M25T46試験体に対しては、表面近くの円孔壁、すなわち表面より深さ1mmの位置にも歪ゲージを貼付した。また、試験体の公称応力を求めるため、円孔による応力の乱れが生じない試験体両側面 (円孔中心より試験体長手方向に100mm離れた位置) にも歪ゲージを貼付した。円孔壁に添付した歪ゲージのリード線を円孔外に取り出すため、図-2に示すようにボルト頭に円孔をあけ、さらにワッシャの一部を切り欠いた。

荷重試験には荷重能力2MNの万能試験機を用い、試験体長手方向に引張荷重を作用させた。その際、荷重を公称総断面応力が20, 40, 60, 80, 100MPaとなるように5段階に分けて荷重し、それぞれの荷重で歪を測定した。

(3) 試験結果

図-3に、ボルト軸力を標準としたM25T46試験体での円孔壁の板厚中心および表面近くで測定した応力と試験体側面で測定した応力の関係を示す。なお、これらの応力はそれぞれの位置で計測した歪値に鋼

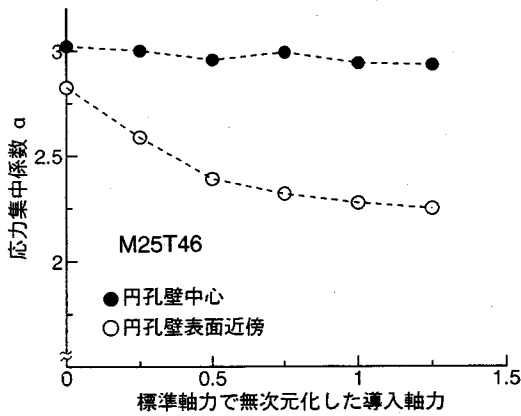


図-4 円孔壁の応力集中に及ぼすボルト軸力の影響

の弾性係数(2.06x10⁵MPa)を乗じることによって求めている。円孔壁の板厚中心、表面近くとも、そこでの応力は公称応力と線形関係にある。したがって、円孔壁での応力集中係数は総断面応力によって変化しない、すなわちワッシャーと母板間の摩擦による応力の非線形挙動は生じないと言える。このことは、他の試験体、他の軸力においても同様であった。以後、公称応力が100MPaとなるときに測定結果を用いて議論を進める。

M25T46試験体の円孔壁での応力集中係数(公称の総断面応力を基準としている)とボルト軸力の関係を図-4に示す。ボルトに軸力を導入していないとき、すなわちボルトなしの円孔壁での応力集中係数は板厚中心と表面近傍でほぼ同じ値を示している。しかし、ボルト軸力を増すと、円孔壁板厚中心での応力集中係数はほぼ一定であるのに対し、板表面近くでの応力集中係数はかなり軽減され、両者の応力集中の差が大きくなっている。これはボルト軸力が大きくなるにしたがって、ワッシャーと母板間の摩擦抵抗が大きくなり、またその影響は表面に近いほど顕著であることを示している。さらに、板厚中心では摩擦の影響を受けにくく円孔内の最大応力は板厚中心で生じることを示している。以後の検討では円孔壁板厚中心での応力に注目する。

ボルト締めにより応力集中がどの程度緩和されるかを表わすため、応力緩和係数(γ)なるパラメータを以下のように定義する。

$$\gamma = (\alpha_B - 1) / (\alpha_H - 1) \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (1)$$

α_H : 円孔のみの場合の円孔壁板厚中心での応力集中係数

α_B : ボルトを締め付けた場合の円孔壁板厚中心での応力集中係数

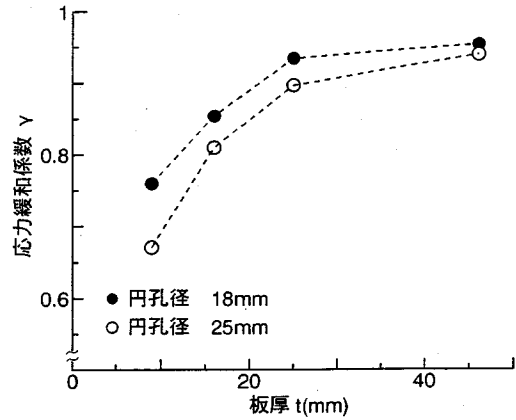


図-5 応力緩和係数と板厚の関係(標準ボルト軸力)

γの値が小さいほど、ボルト締めによる応力集中の緩和が大きいということになる。

図-5は標準軸力となるようにボルトを締め付けたときの応力緩和係数と板厚の関係を円孔径別に示したものである。応力緩和係数は母板が厚くなるにしたがって高くなっており、また円孔径18mmのほうが円孔径25mmに比べて高くなっている。すなわち、ボルト締めによる応力集中の緩和効果は、板が薄いほど、また円孔径(ボルト径)が大きいほど高いと言える。図-6(a)は円孔径18mm、図-6(b)は円孔径25mmの試験体で得られた応力緩和係数と板厚の関係を全てのボルト軸力について示したものである。いずれの円孔径においてもボルト軸力が高いほど緩和効果が高くなっている。

以上のように、応力緩和係数は円孔径に反比例し、板厚に比例することより、円孔径Mと板厚tの比M/tにより応力緩和係数を整理してみた。その結果を図-7に示す。ここでの結果はボルトに標準軸力を与えた場合についてであり、図中には既往の結果⁸⁾も含めている。応力緩和係数はM/tとほぼ直線関係にある。このことは、他の軸力においても同様であった。

3. 応力解析

(1) 解析対象および解析条件

前章の応力測定に用いた試験体を対象として、8節点固体要素を用いた3次元有限要素応力解析を行った。要素分割例を図-8に示す。ここでは試験体の対称性を考慮して1/8モデルとして解析している。注目する円孔壁近傍での要素寸法は1mmである。弾性係数は2.06x10⁵MPa、ポアソン比は0.3とした。また、ボルト軸力は、ボルト軸下面に強制変位を与え

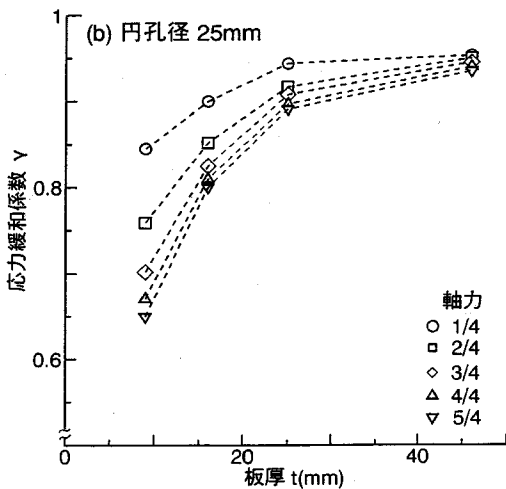
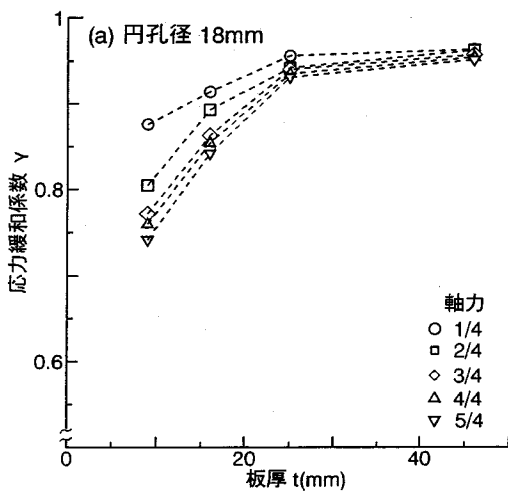


図-6 応力緩和係数と板厚の関係

ることにより導入した。

a) ボルト頭の形状について

ボルト頭の形状は六角形であるが、本解析ではボルト頭の形状を六角形と面積が等しい円形とした。これは、実際にボルトを締め付けたとき、ボルト頭の方が一定にならないため、その影響を除くためである。

図-9は、M18T16モデルを対象にボルト頭の形状を丸あるいは六角形としたときの円孔壁に沿う応力分布の解析結果を示したものである。円形とした場合の応力は、六角形の場合と比べて多少大きくなっているものの、両者はほぼ一致している。

b) 微小な滑りを考慮するための要素

図-10は、ボルト、ワッシャ、母板を一体として行なった応力解析の結果を実験結果と比較したもの

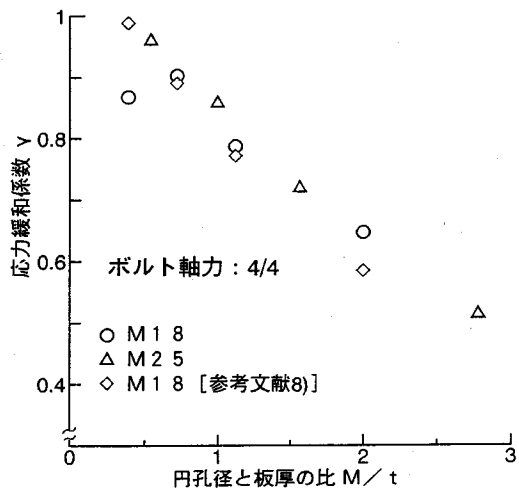


図-7 応力緩和係数とM/tの関係(実験結果)

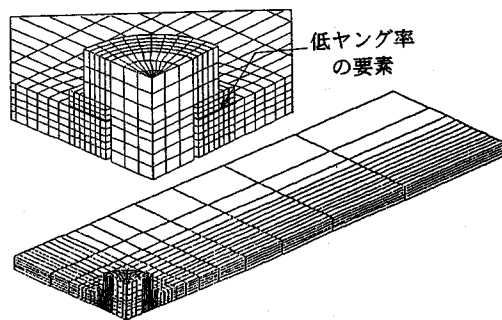


図-8 要素分割例

である。解析結果は実験結果よりもボルト締めによる応力緩和効果を過大に評価している。これは、ボルトと母板を一体としたことで、母板とワッシャの接触面での微小な滑りを考慮できなかったためと考えられる。ここでは、母板とワッシャの間に弾性係数の低い要素(厚さ0.1mm)を挿入することでこの微小な滑りを表すことを試みた。また、この微小滑りを表わす要素の弾性係数はワッシャと母板間の接触圧力に比例すると考えた。

ボルト軸力を標準とした場合の接触圧力の解析結果を図-11に示す。図の縦軸は円孔の縁での値で無次元化した接触圧力であり、横軸は円孔壁からの距離(x)を図中に示す寸法(r)、すなわち、ボルト頭がワッシャと接している長さで無次元化したもの(接触圧力比)である。円孔径18mmと25mmでの接触圧力比と(x/r)の関係はほぼ一致している。ここでは図中に実線で示す圧力比の分布に従って、ワッシャと母板間に挿入する要素の弾性係数を設定することと

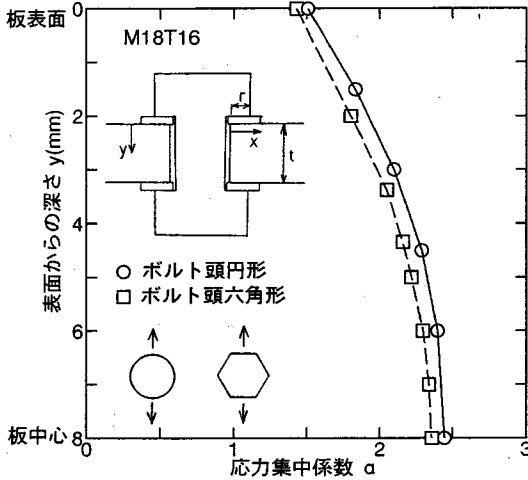


図-9 ボルト頭形状が円孔壁の応力に及ぼす影響

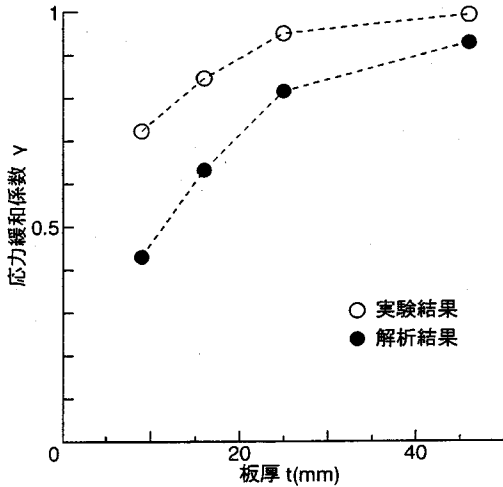


図-10 実験結果と解析結果の比較
(ボルト, ワッシャー, 母板を1体にモデル化)

する。なお、この接触圧力比の分布はボルトの軸力を変えても変化しない。

円孔径18mmのモデルを対象としてワッシャーと母板間に挿入する要素の弾性係数の値を変化させて応力解析を行ない、それを実験値と比較した結果を図-12に示す。なお、この解析ではボルト軸力を標準軸力としている。また、ここで示す弾性係数は挿入する要素の内、最も内側の要素に対するものである。弾性係数を鋼材の1/100、すなわち206MPaとすれば解析値は板厚によらず実験値とほぼ一致している。このとき、挿入する要素の弾性係数Eは以下に示す式となる。

$$E = 12.6 \times \text{接触圧力} \quad (2)$$

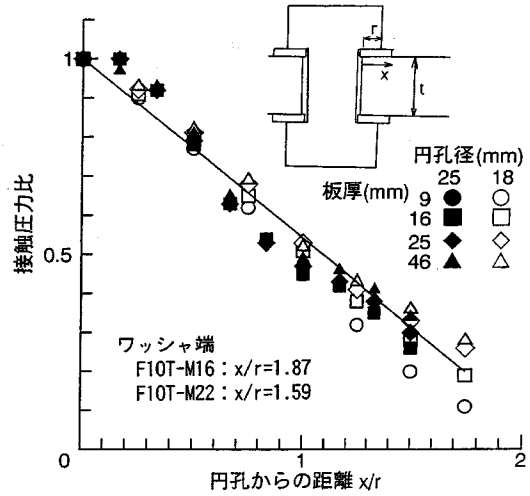


図-11 母板とワッシャー間の接触圧力

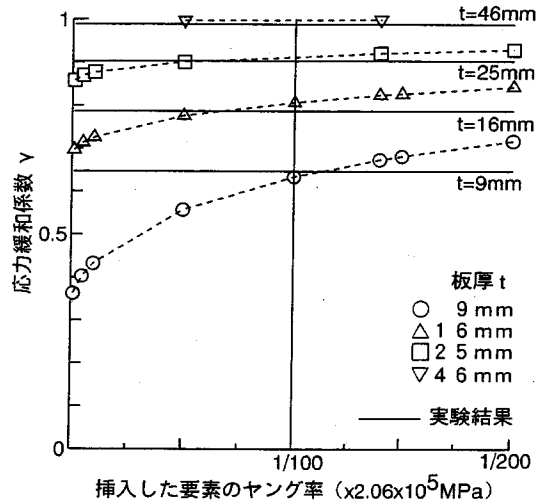


図-12 応力集中係数に対する挿入要素ヤング率の影響

ただし、12.6という数値はここで用いたワッシャーと表面をグラインダーで仕上げた鋼表面との接触面に対して適用できるものであり、接触面の状況が違えばその値も異なると考えている。

(2) 解析結果

図-13(a)~(d)に円孔壁に沿う応力分布の解析結果の例を示す。いずれの場合も軸力が増すにつれて応力集中は軽減されており、特に母板表面でこの傾向は顕著である。また、ここで示す解析結果からも板厚中心で最も高い応力集中が生じることがわかる。

図-14に応力緩和係数と板厚の関係を示す。実験結果と同様に、軸力が大きいほど、板厚が薄いほど、円孔径が大きいくほど応力集中の緩和効果は高くなっ

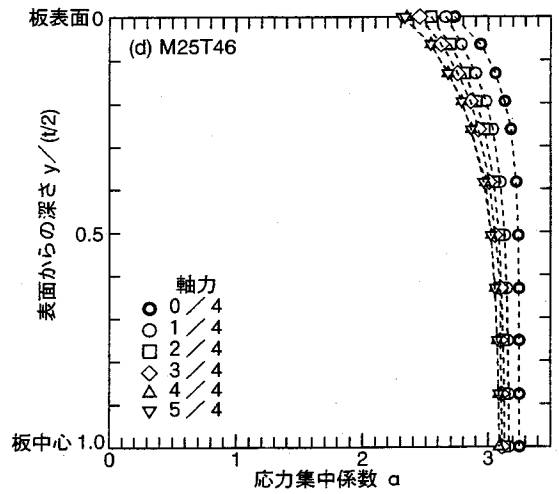
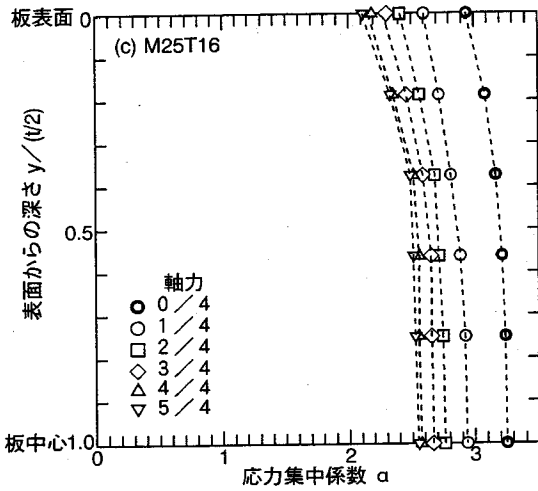
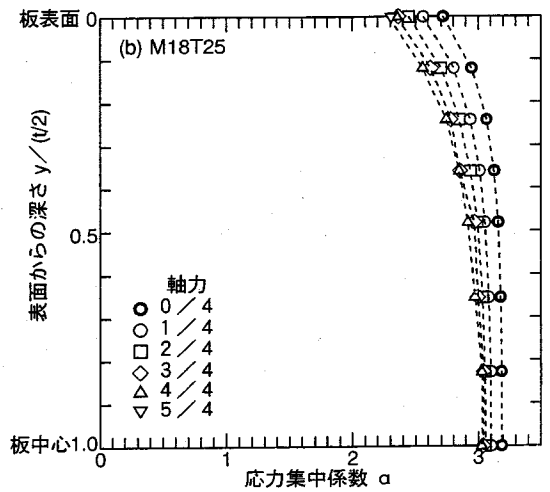
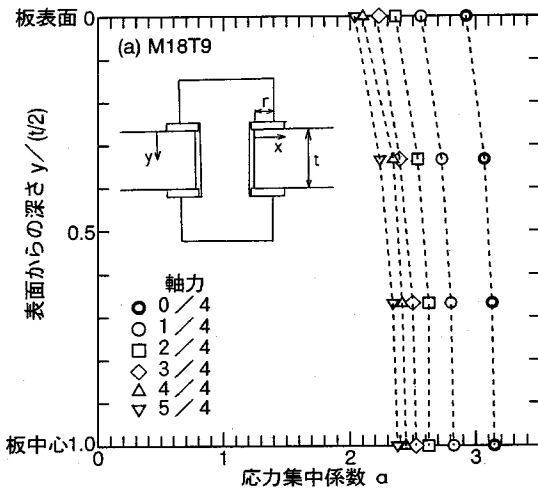


図-13 円孔壁の応力分布の解析結果

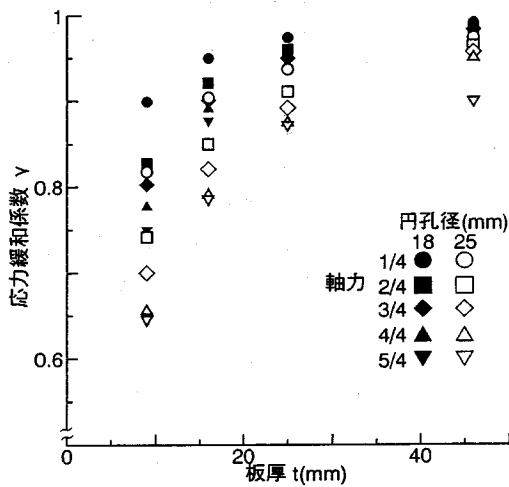


図-14 応力緩和係数と板厚の関係 (解析結果)

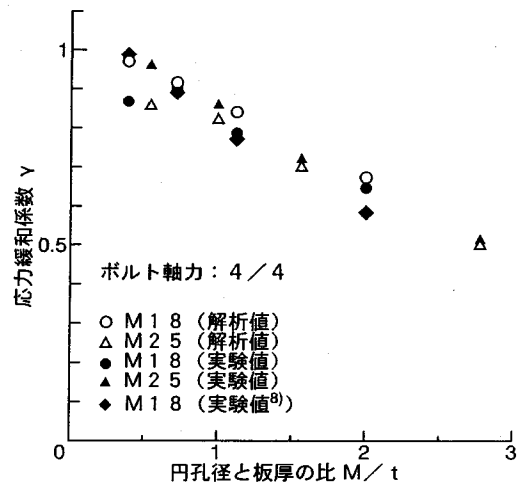


図-15 実験結果と解析結果の比較

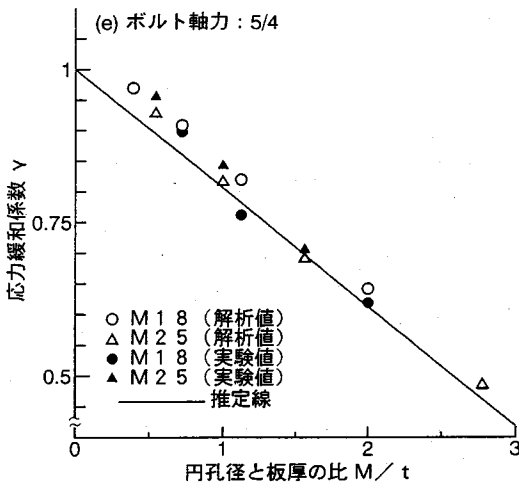
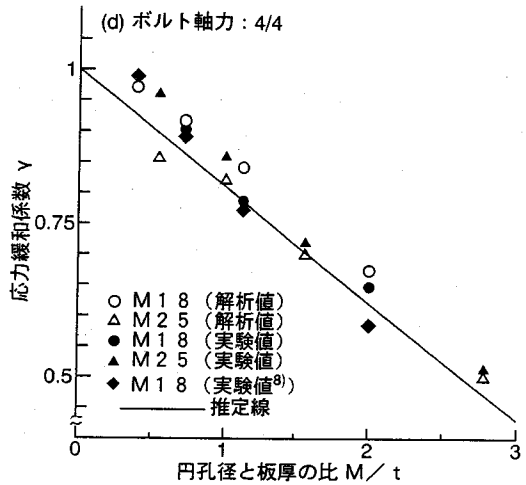
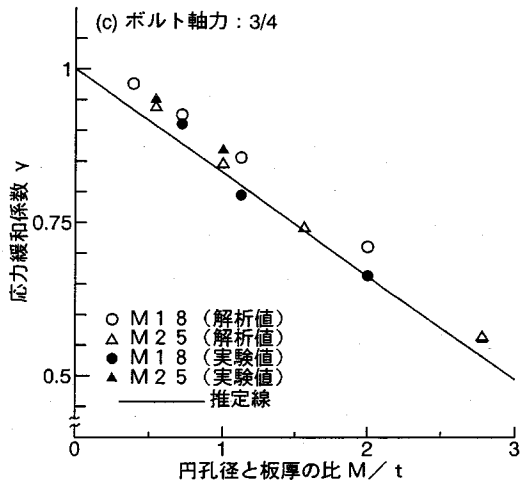
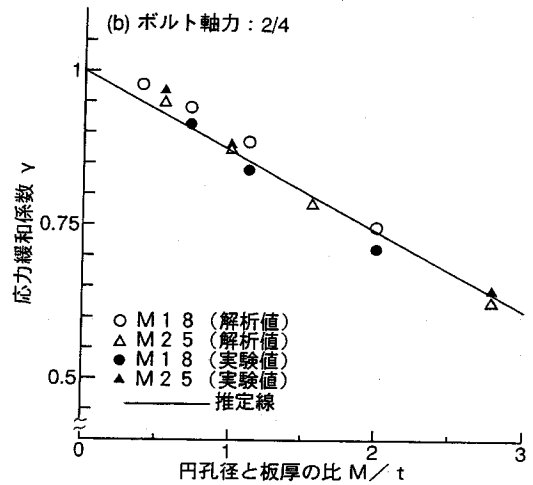
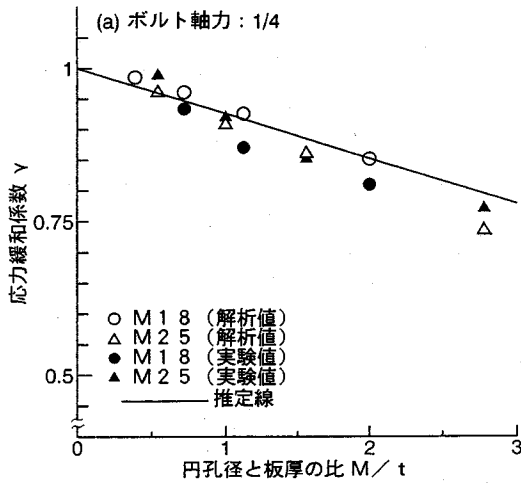


図-16 応力緩和係数とM/tの関係

ている。

実験結果と同様にM/tによって応力緩和係数を整理した結果の例(軸力:4/4)を実験結果とともに図-15に示す。解析結果は実験結果とよく一致している。他の軸力においても同様であった(図-16参照)。したがって、本研究で用いた解析方法は妥当であったと言える。

4. 応力緩和係数の表示式

2章, 3章で求めた応力緩和係数(γ)と円孔径-板厚比(M/t)の関係をボルト軸力ごとに図16(a)~(e)に示す。いずれの軸力においてもγはM/tとほぼ線形関係にある。なお、M/t=0でγ=1である。したがって、γは次式で表わすことができる。

$$\gamma = 1 - \beta \cdot (M/t) \quad (3)$$

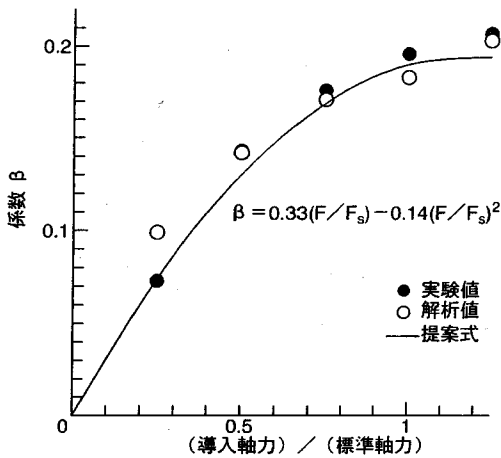


図-17 係数 β と軸力の関係

β は γ - M/t 関係の傾きを表わす定数であり、ボルト軸力によって変化する。図16(a)~(e)に示す γ - M/t 関係に最小2乗法を適用して各軸力での β を求め、それと軸力の関係を示したのが図-17である。 β と軸力の関係が二次曲線で近似できるとして、最小2乗法により求めた回帰曲線が式(4)である。

$$\beta = 0.33(F/F_s) - 0.14(F/F_s)^2 \quad (4)$$

F : 導入軸力, F_s : 標準軸力

以上より、応力緩和係数は次式で与えられる。

$$\gamma = 1.0 - \{0.33(F/F_s) - 0.14(F/F_s)^2\} (M/t) \quad (5)$$

式(5)より求められる応力緩和係数(γ)と(M/t)の関係を図16(a)~(e)中に実線で示した。

5. 疲労強度評価

1章でも述べたように、ストップホールにより補修した部材の疲労強度については、ストップホール先端での応力範囲を求め、それを基に評価すればよいとされている^{4),5)}。また、ボルト締めした場合の疲労強度についても、ストップホール先端の応力範囲で整理できることが実験的に明らかとされている⁷⁾。したがって、円孔壁での応力範囲($\Delta\sigma_H$)と疲労寿命の関係は式(6)で与えられる。

$$\Delta\sigma_H^m \cdot N = C \quad (m, C : \text{定数}) \quad (6)$$

また、ボルト締めした円孔での $\Delta\sigma_H$ は、式(1)より

$$\Delta\sigma_H = \{\gamma(\alpha_H - 1) + 1\} \cdot \Delta\sigma_n \quad (7)$$

α_H : 円孔のみの応力集中係数

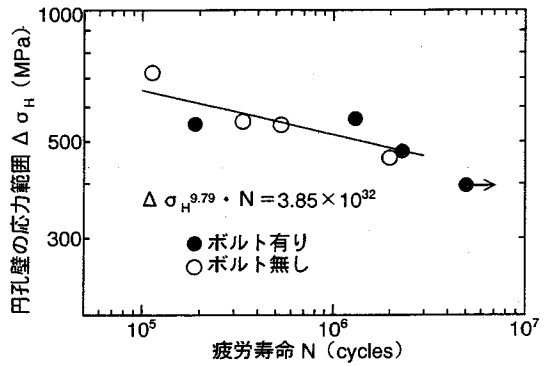


図-18 円孔壁での応力範囲と疲労寿命の関係

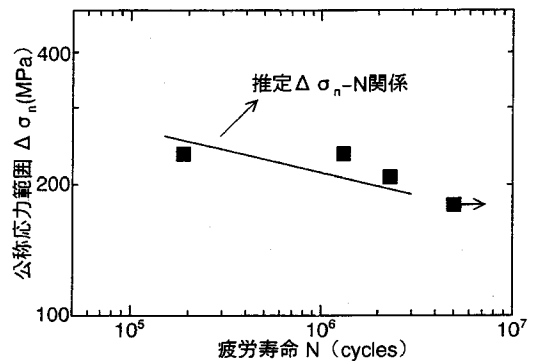


図-19 疲労強度推定結果と実験結果の比較

γ : 応力緩和係数

$\Delta\sigma_n$: 公称応力範囲

で与えられる。 α_H は経験式⁶⁾などより容易に求めることができる。したがって、ボルト締めした円孔の疲労強度は式(8)より評価できる。

$$\Delta\sigma_n^m \cdot N = C / \{\gamma(\alpha_H - 1) + 1\}^m \quad (8)$$

著者は、直径23mmの円孔を付した板厚12mmの平板試験体とその円孔をF10T-M20のボルトで締め付けた試験体の疲労試験および応力測定試験を行なっている⁷⁾。その結果より求めた $\Delta\sigma_H$ と N の関係を図-18に示す。この関係、簡便式より求めた α_H ⁶⁾、式(5)より求めた γ を式(8)に代入することにより推定した $\Delta\sigma_n$ - N 関係を、疲労試験結果とともに図-19に示す。推定線は実験結果とよく一致している。

6. まとめ

矩形鋼板の中央に円孔をあけボルト締めした試験体を用いた応力測定試験とそれらを対象とした有限

要素応力解析を行なうことにより、ボルト締めによる応力集中の緩和について検討するとともに、ボルト締めした円孔の疲労強度について検討し、以下の結果を得た。

(1) ボルト締めによる円孔壁での応力集中の緩和は、軸力が高いほど、円孔径が大きいほど、また母板が薄いほど顕著である。

(2) ボルト締めによる応力集中緩和の程度は次式で表わすことができる。

$$\gamma = 1.0 - \{0.33(F/F_s) - 0.14(F/F_s)^2\} (M/t)$$

$$\gamma = (\alpha_B - 1) / (\alpha_H - 1)$$

α_B : ボルト締めした円孔の応力集係数

α_H : 円孔のみの応力集中係数

F: ボルト軸力,

F_s : 標準ボルト軸力(F10T)

M: 円孔径, t: 板厚

(3) 個体要素を用いた三次元有限要素応力解析からボルト締めした円孔内の応力を求めるための解析モデルを構築した。

- ・軸力は強制変位を与えることにより導入する。
- ・母板とワッシャ間に滑りを表すために弾性係数の低い要素を挿入する。この弾性係数の値は接触面の圧力に比例する。

(4) ボルト締めストップホール法により補修した疲労損傷部材の疲労強度評価式を以下のように提案する。

$$\Delta \sigma_n^m \cdot N = C / \{ \gamma (\alpha_H - 1) + 1 \}^m$$

$\Delta \sigma_n$: 公称応力範囲

C, m: 材料定数

(5) 提案する疲労強度評価法の適用性を実験結果と比較することにより確かめた。

ここでは、ボルト締めストップホール法により補修した疲労損傷部材の疲労強度評価法を確立することを最終的な目標とし、その際の鍵になると考えられるボルト締めによる円孔壁での応力集中の緩和について、かなり簡略化したモデルを用いて検討した結果を述べた。実際にこの方法が適用可能であり、また効果が高い疲労損傷は、フランジあるいはウェブガセット継手などに生じる疲労亀裂のように平滑な母材表面に進展したものと考えており、そのような損傷継手についても検討を始めている。

ここで示した一つの円孔を持つ平板での検討結果を実際の疲労損傷部材に適用するためには、亀裂の

存在にも注意する必要がある。また、円孔壁での応力範囲と疲労寿命の関係は、母材の材質や溶接による残留応力、変形状(面内、面外)などの影響も受けると考えられるため、この関係についての検討も必要と考えている。

さらに、本文中でも述べたように母板との接触面の状況がボルト締めした円孔の応力に著しい影響を及ぼすと予想されるため、それに関する検討も必要である。また、場合によっては母板ではなく、ワッシャやボルトが疲労破壊することもあるため、その対処方法についても検討しなければならないと考えている。現在ところ、その方策としてワッシャと母板の間に板を挟むことを考えている。

以上のように、本論文は有効であるもののその疲労強度が不明であったために仮の補修方法として用いられることが多かったボルト締めストップホール法の効果を明らかにするための第1ステップを印したものである。今後、上記の事柄についての検討を進める予定である。

謝辞: 本研究は文部省科学研究費(一般研究C, 06650528, 代表: 森 猛)の補助を受けて行なったものである。また、本研究を遂行するにあたり、法政大学あるいは大学院の学生であった 三辺 考志、森田 順、稲田 洋之 の各氏には多大なる協力を頂いた。ここに記して深謝する。

参考文献

- 1) 西川 和広: 道路橋における疲労問題と補修, 橋梁と基礎, Vol.17, No8, pp.19-23, 1983.
- 2) 三木 千寿, 坂野 昌弘, 館石 和雄, 福岡 良典: 鋼橋の疲労損傷事例のデータベースの構築とその分析, 土木学会論文集, No.392, pp.403-410, 1989.
- 3) 名取 暢, 浅岡 利明, 稲田 育朗: 橋梁の補修・補強, 横川ブリッジ技報, No21, pp.63-90, 1992.
- 4) 山田 健太郎, 近藤 明雄: 鋼部材の亀裂補修補強後の疲れ挙動, 土木学会論文, 第368号, pp.411-415, 1986.
- 5) Miki, C, Toyoda, Y., Mori, T. and Enokido, N.: Fatigue of Large-Scale Welded Girders under Simulated Highway Loadings, *Proceedings of JSCE*, No422, pp.165-173, 1990.
- 6) 西田 正孝: 応力集中, 森北出版, 1967.
- 7) 森 猛: ストップホールをボルト締めすることによる疲労亀裂の補修, 構造工学論文集, Vol 35A, pp.969-975, 1989.
- 8) Mori, T. and Satukawa, Y.: Stress Analysis and measurement of Bolted Circular Hole, *Proceeding of The Second Japan-Korea Joint Seminar on Steel Bridges*, pp.1-9, 1992.

(1995. 11. 14 受付)

STRESS CONCENTRATION AND FATIGUE STRENGTH OF RECTANGLE PLATES WITH BOLTED CIRCULAR HOLES

Takeshi MORI

Stress analyses by using three dimensional finite element method and stress measuring tests are performed in order to make clear the reduction of stress concentration by bolting the stop hole which is a circular hole drilled at the tip of fatigue crack. On the basis of the results of above examinations, evaluating procedure for fatigue strength of fatigue damaged steel members repaired by drilling and bolting the stop holes is proposed, and validity of this procedure is verified by comparing predicted results to experimental results.