

木部材の鋼ジョイント近傍の応力分布特性

Stress distribution of timber member near the steel joint

藤本英稔* 今井富士夫** 中澤隆雄** 間瀬英男***

FUJIMOTO Minoru, IMAI Fujio, NAKAZAWA Takao and MASE Hideo

* 宮崎大学博士前期課程 (〒889-2192 宮崎市学園木花台1-1)
** 工博 宮崎大学工学部土木環境工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台1-1)
*** 宮崎ウッドテクノ (〒883-0105 宮崎県東臼杵郡東郷町)

ABSTRACT The members in the timber bridge are connected by a bearing force of bolts. Therefore, it is expected that an irregular stress occur by local bearing force of the bolt in the section near the steel joint of the timber member. We analyzed the timber member including the steel joint subjected to tensile load, bending load and the above-mentioned combination load. The influence of the joint bolt was remarkable in the section near the steel joint, and the stress on the side of member became 1.5 times or more the stress calculated by the beam theory.

Keywords 集成材, 鋼ジョイント, ボルト接合, 応力分布
glued laminated timber, steel joint, bolt joint, stress distribution

1. まえがき

近年、自然との共生が望まれるなかで木材を主部材とした橋梁などの大型構造物の建設が増加している。このような大規模な構造物では長く大きな部材が使用されており、部材高さも1mを超えるものとなっている¹⁾。しかしながら、設計に使用される仕様は木質構造設計規準²⁾などの一般に建築分野でのあまり大きくない部材に示されたものを準用しているようである。

また、接合法は木材が鋼に比べて柔らかいため、鋼橋で一般的となっている摩擦接合は適用できず、ボルトのせん断によるリベット接合に属する支圧接合となっている。この場合、ボルト近傍の木部材には応力集中が発生して、その近傍の応力分布は梁理論とは異なったひずみの突出などが生じることが考えられる。実際に、昨年完成した世界でも最大規模のキングポストトラス橋で実施した下弦材の鋼ジョイント近傍でのひずみは梁理論では説明できない分布を呈しており、さらに著者らが実施した引張試験でも同様な分布変化を確認している³⁾。

このことから、大断面を有する集成材の鋼ジョイント近傍の応力分布を解明することは、大型部材を使用する木橋などの設計においては不可欠な課題であると考えられる。

本論文では、実際に設計された前述した梁高の高いトラス橋を対象に、ボルト接合された鋼ジョイント近傍の集成材の応力やひずみ分布を明らかにするために、鋼ジョイントとその近傍の集成材を切り出した部材モデルについて有限要素法による数値解析を行った。解析では市販の解析ソフトMARCを使用し、荷重は軸方向の引張荷重と曲げ荷重を別個に載荷して、トラスに生じた複合荷重は両者の重ねあわせとした。

2. 解析モデル

対象とした木橋での接合法は集成材の両面に鋼板を配置して、ボルト接合したもので、図-1は本解析で使ったモデルの要素分割を示している。解析要素は木部とボルトには8節点ソリッド要素を、ジョイント用鋼版は4節点シェル要素を使用し、ボルト部の要素分割の詳細はA)に示すとおりである。

解析では高さ方向については梁高全体の1830mmについて要素分割を行ったが、図には上半分を示している。また、奥行き方向は図に示すように半解析とし、木部は4等分割とした。

拘束条件は鋼板のみの左端を鉛直方向、水平方向の変位および鉛直軸回りの回転を固定し、さらに木部とボルトの中央面側(図-1(a)の上縁)の材軸直角方向変位を拘束した。

対象とした集成材は対称異等級モデル(E75F240)で、ラミナ(薄板)の配分は図-2に示すとおりである。図中の例えばL90は曲げ弾性係数が $E=9 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ を保証するラミナで、集成材は曲げに対応できるように、縁端に規格値の高いものが使用されている⁴⁾。

荷重は引張と曲げの2つを考え、引張の場合には梁理論で木部断面に様に 100μ のひずみが、曲げでは上下縁に 100μ のひずみが発生するような分布荷重を集成材の各ラミナ層で規定された弾性係数を考慮して作用させた。

本解析での木部と鋼板との連結には以下のような仮定を行った。

- (1) 鋼板と集成材の間での接触面は、力の伝達はしない。
- (2) 鋼板と集成材間力はボルトのみで伝達する。
- (3) 材料はすべて弾性とする。

実橋では図-3に示すように、木部と鋼板の間に隙間を設け、下部導入口から樹脂を注入し、反対側の充填確認口から樹脂があふれ出たとき、ボルトと木部の隙間には樹脂が充填されたとするもので、充填試験で十分な充填が確認されている。よって、実橋では鋼板と木部間にも樹脂が充填されているが、

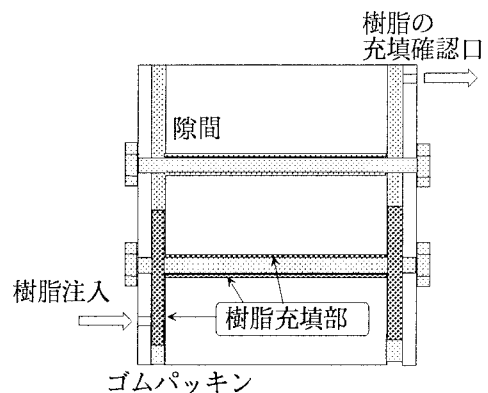
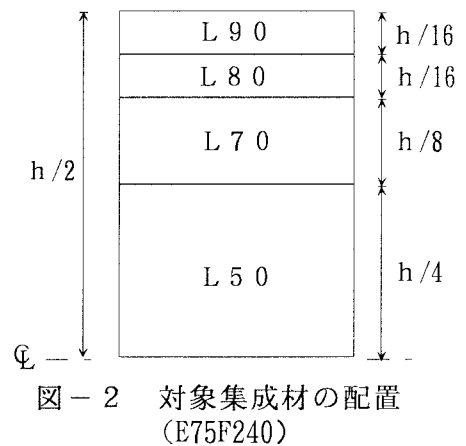
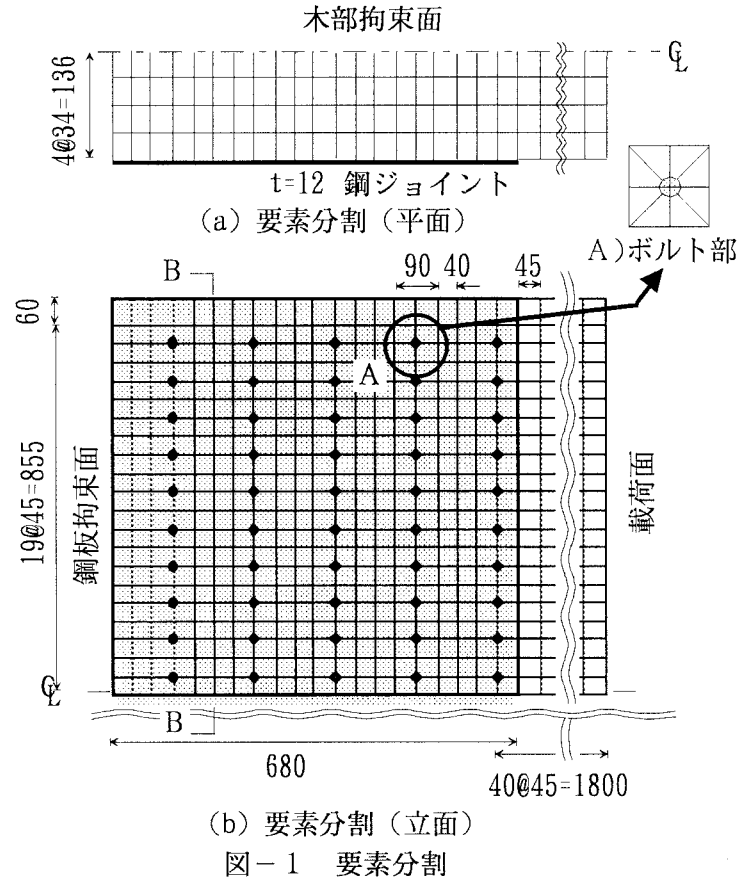


表-1 集成材 (E75F240) と各ラミナの材料定数

集成材		弾性係数 (N/mm ²)		規準材料強度 (N/mm ²)			規準許容応力度 (N/mm ²)		
		引張・圧縮	曲げ	圧縮	引張	曲げ	圧縮	引張	曲げ
		6500	7500	17.4	15.0	24.0	5.8	5.0	8.0
ラミナ	E50	4900		19.2	14.4	24.0	6.4	4.8	8.0
	E70	6900		23.4	17.4	29.4	7.8	5.8	9.8
	E90	8800		28.2	21.0	34.8	9.4	7.0	11.6

表-2 換算断面の諸元

断面積 (mm ²)			断面2次モーメント (mm ⁴)		
均一断面	換算断面	比	均一断面	換算断面	比
4.978 × 10 ⁵	4.786 × 10 ⁵	0.962	1.389 × 10 ¹¹	1.389 × 10 ¹¹	1.000

鋼板と木部の接合面でのすべりに対する樹脂の寄与の度合いが明確でないことから、本解析では(2)と(3)のような仮定を用いた。

表-1は対象とした対称異等級集成材 (E75F240) の集成材と各ラミナの材料定数を示したものである²⁾。また、表-2は表-1での集成材の弾性係数を基準にして算出した断面積を示したもので、「均一断面」とはラミナの規格値に関わりなく、断面が一様と仮定して求められたものであり、「換算断面」は、集成材の規格弾性係数を基にして換算された断面積である。表から明らかなように、「均一断面」と「換算断面」での断面積と断面2次モーメントの値はほぼ一致しており、集成材の設計では、集成材としての弾性係数を用いれば、断面は均一として取り扱えることを示している。

3. 解析結果および考察

実橋はトラス橋であるが、鋼ジョイントが剛なために弦材には軸力と曲げモーメントが同時に作用する複合荷重を受けている。鋼ジョイント近傍の応力やひずみ分布特性を明確にするため、ここでは2つの荷重を個々に载荷して、複合荷重については両者の結果を重ね合わせて考察する。

3.1 引張载荷

本節では、部材が長手方向に一樣な引張荷重を受ける場合について解析を行ったもので、設定ひずみは前述したように、梁理論で断面一様に 100 μ が生じる分布荷重を作用させた。

図-4は鋼ジョイントから 45mm 離れた点と 225mm 位置で高さ方向の木部のひずみ分布を示したもので、側面 (鋼板側) と奥行き中央面について図示している。

鋼板から 45mm での木部では、側面が中央面に比べて著しく大きくなっており、側面は設定した 100 μ を大きく上回る結果となっている。また、側面ではボルトによる

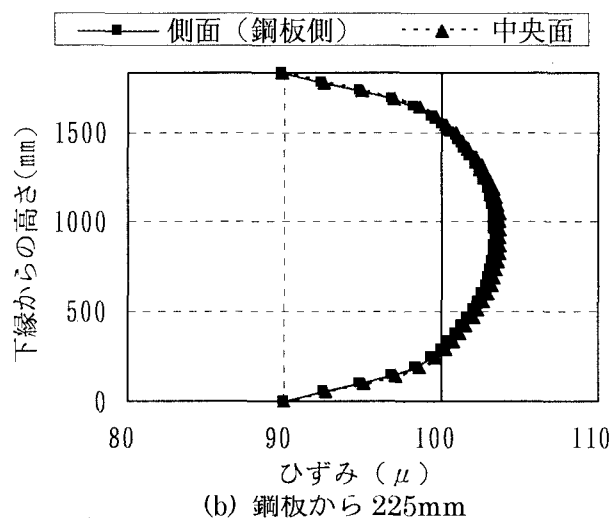
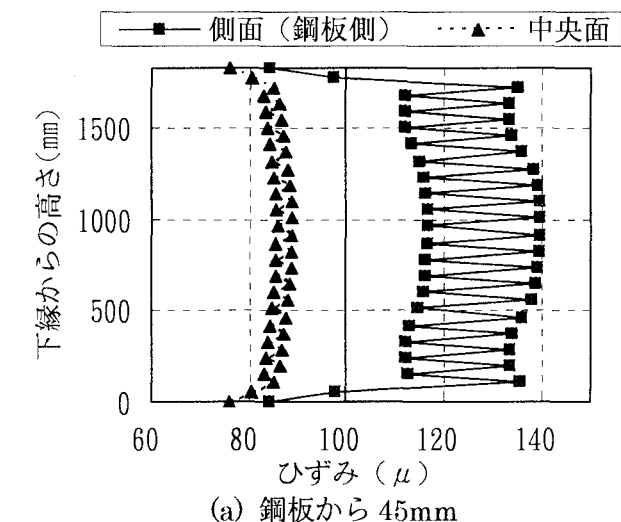


図-4 高さ方向のひずみ分布

支圧接合の影響も大きく、 30μ 程度の変化となっている。さらに、縁端ボルトの外側のひずみが大きく減少する結果ともなっている。

図-4(b)の鋼板から225mm(梁高さの1/4程度)離れた部位では、側面と中央面との差異はほとんど観られない。高さ中央が上下縁に比べて大きくはなっているが、 100μ を超える部分でも超過量は 5μ の影響は極めて局所的であるが、鋼ジョイント近傍では設定ひずみに対して40%程度まで上昇することは設計上、重要な問題となる。

図-5はひずみが断面で最大となっている高さ中央での奥行き方向のひずみ分布を示したものである。鋼板から225mmでは奥行き方向での変化はあまり見受けられないが、45mmでは図-4で考察したように、中央面が小さく、側面が 140μ と突出した値となっていることが判る。

鋼板近傍での木部断面のひずみ分布を等高線として描いたものが図-6で、太い実線は 100μ であり、 10μ 毎の変化を色の濃淡で示している。色が濃いほどひずみの値は高い。

図から、図-4と-5で考察したように、梁の両側面のひずみが過大となると同時に、最縁ボルトから外側の上下縁ではひずみが激減することも確認できる。

以上の結果から、鋼ジョイントの影響が顕著で設定ひずみを大きく上回るのは、鋼板近傍であることが明確となった。そこで、応力度の評価は鋼板から45mmの部位について検討する。

図-7は集成材が均一であると仮定して算出された応力度に対する解析応力度との比を示したものである。横軸での破線は図-2でのラミナ配分の領域を示している。中央面では一様応力度に対して最縁のL90においても1.3倍程度で、中央部L50では0.7倍であるが、鋼板に近い側面における各ラミナ層の最大値は、L90では一様応力の最大で1.9倍近い値となっており、L80では1.7倍、L70では1.5倍となり、L50においても1.1倍となっている。いずれのラミナ層においても均一断面から算出される応力度を超過する値を示す結果となった。

3.2 純曲げ載荷

本節は等曲げを受けた場合の解析結果について考察を行うもので、梁理論で上下縁に 100μ が生じるように図-1の右端に分布荷重を載荷したものである。

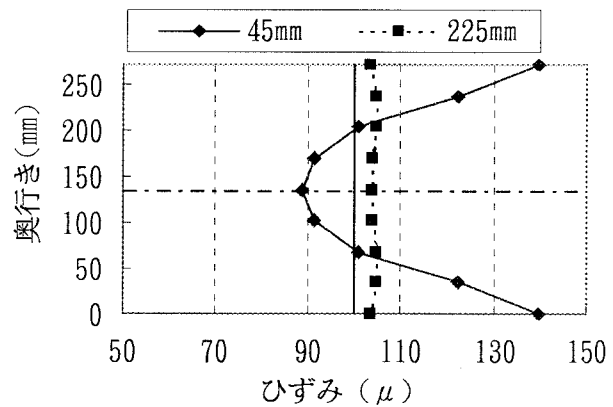


図-5 奥行き方向ひずみ分布 (高さ中央)

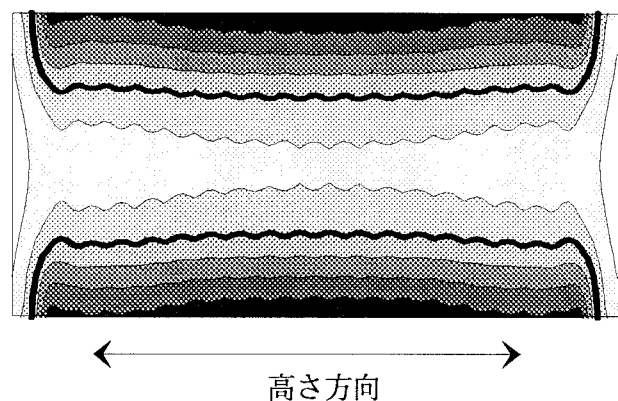


図-6 ひずみ等高線

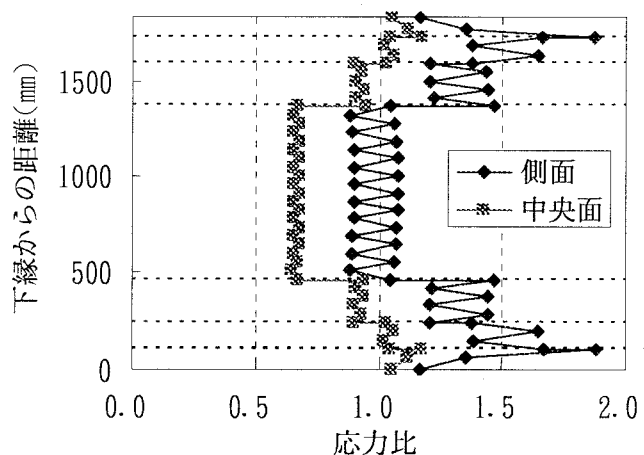


図-7 応力比分布(45mm)

図-8は鋼板から45mmの位置での木部の高さ方向ひずみ分布を示したもので、この場合にもボルト支圧の影響は生じている。また、最縁ボルトから外側の部分のひずみは最縁ボルト位置の値よりも減少している。さらに、鋼板側と中央面とのひずみの比較においても軸力の場合と同様に鋼板側の側面が大きく、側面では設定したひずみ 100μ を40%程度上回る結果となっている。

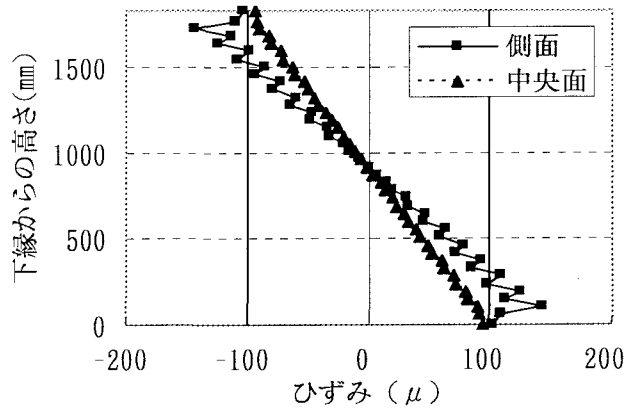


図-8 高さ方向の曲げひずみ(45mm)

図-9は集成材を均一断面として、縁端ひずみが 100μ となる時の縁端応力度と解析で得られた応力度の比を示したものである。曲げ荷重下では縁端ひずみが大きく、図心軸が中立軸となるため、縁端部が過大となっており、一様断面から算出された応力度の1.8倍の値となっている。

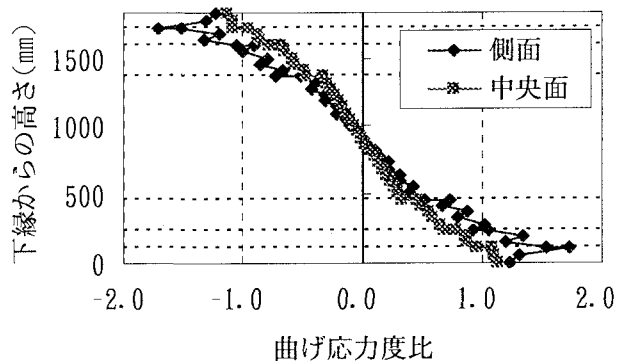


図-9 高さ方向の曲げ応力度比分布

3.3 許容応力度による考察

2つの解析で得られた応力度と許容応力度を各層ごとに整理したものが、表-3である。

表で、「許容応力度比」とは2つの荷重における集成材の許容応力度に対する各層ラミナの許容応力度の比を示したもので、曲げについては集成材全体は曲げ変形となるが、ラミナに作用する応力は引張あるいは圧縮応力となることを考え、集成材の曲げ許容応力度に対する比も示している。また、「発生応力度比」は図-7と図-9での応力度比の各層最大値を示している。

表から明らかなように、いずれの層においても発生応力度比はほとんど許容応力度比を上回る結果となっている。

特に曲げ荷重の場合には、最縁の層では引張や圧縮応力度比を大きく上回るもので、このことは集成材を均一部分材として設計した場合、鋼ジョイント近傍の局所的な応力ではあるが、その部分については危険側の設計となっていると云えよう。

3.4 複合荷重

ここでは軸方向荷重と曲げ荷重が同時に負荷した場合の複合荷重下でのひずみ分布について検討する。図-10は鋼板から45mmの位置のものである。本結果は、前述の軸方向ひずみ 100μ と縁端曲げひずみ 100μ の結果を複合したもので、図中での「集成材」は複合した梁理論による解である。中央面ではほぼ梁理論の結果と一致するが、鋼板側の側面では曲げ分布の傾斜は解析が大きく、引張側の最縁ボルト以遠の部分は 100μ 近く減少している。

表-3 発生応力度と許容応力度の関係

		E50	E70	E80	E90
許容応力度比	引張	0.96	1.16	—	1.40
	曲げT	0.60	0.73	—	0.88
	曲げC	0.80	0.98	—	1.18
	曲げM	1.00	1.23	—	1.45
発生応力度比	引張	1.07	1.47	1.60	1.87
	曲げ	0.52	1.01	1.57	1.71

※ 「曲げ○」は集成材の曲げ許容応力度に対する。

※ 「曲げT」=ラミナの引張許容応力との比

※ 「曲げC」=ラミナの圧縮許容応力度との比

※ 「曲げM」=ラミナの曲げ許容応力度との比

図-11 は解析対象としたトラス橋で得られた実験値と解析値を比較したものである。ただし、実橋で得られた実験値を10倍とした結果である。

両者ともにひずみ分布の傾向はほぼ一致しており、梁理論から得られる曲げひずみに対して、引張側では低減し、その傾きも梁理論より大きくなっている。さらに、実橋でのひずみは解析値に比べて、より大きな変動が観られる。

このように、2つの荷重から得られた結果から当然の結果として、複合荷重下でのひずみでも大きな変動が観られるが、応力度の評価については現在検討中である。

4. あとがき

本論文では集成材の鋼ジョイント近傍の応力分布性状を確認するために、軸引張荷重と曲げ荷重および両者の複合荷重による解析結果を提示した。得られた結論を要約すると、以下ようになる。

- (1) 鋼ジョイント近傍ではボルトの支圧によって、ひずみは変動するが、その影響範囲は小さい。
- (2) 応力度は各層ラミナの許容値を大幅に上回るものである。
- (3) 実橋は解析に比べて、さらに大きなひずみ変動となっている。

今回の解析では軸方向荷重は引張荷重のみを取り扱っているが、圧縮荷重下での解析も必要である。ここでの応力の突出は道路橋での疲労では問題となることが考えられ、その緩和法についての検討が必要となる。現在、実橋での樹脂充填法では鋼板と集成材の隙間に充填された樹脂があり、その効果は応力緩和から検討に値するものであるが、ボルト孔の先端にテーパを施すことも緩和に対して期待ができると思われ、これらの課題に取り組んでいる。

本解析を実施するにあたり、宮崎県木材技術利用センターの飯村豊氏には貴重なご意見をいただきましたことに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 渡辺浩志, 久保田努, 齋藤潔, 柴田直明: 日影入線木橋(長野県林道木橋標準設計)の施工, 第2回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, pp.41-45, 2003
- 2) 日本建築学会: 木質構造設計規準・同解説, 2003
- 3) 今井富士夫, 飯村豊, 入江達雄, 中澤隆雄: かりこぼらず大橋の材料および力学性状, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.865-872, 2004
- 4) JAS: 構造用集成材の日本農林規格, (社)日本合板検査会, pp.12-47, 1996

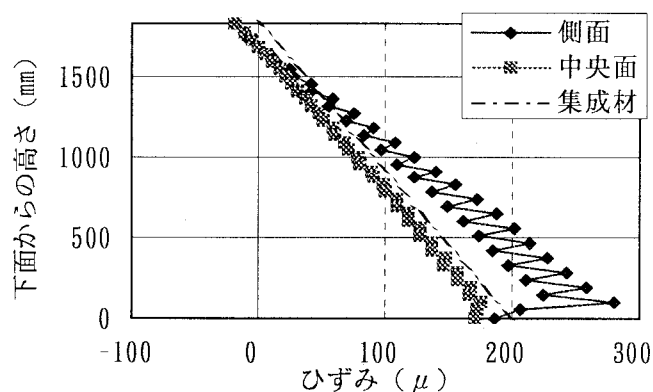


図-10 複合荷重下でのひずみ分布

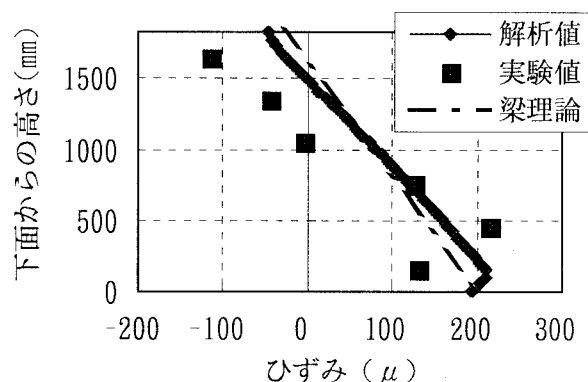


図-11 実験との比較