

PC橋の架設時応力の評価における格子モデルの適用性の検討

三井住友建設(株) [元国総研交流研究員] 正会員 ○狩野 武
 (株)オリエンタルコンサルタンツ 正会員 工修 松沢 政和
 (株)オリエンタルコンサルタンツ 正会員 工修 水田 崇志
 国土交通省 国土技術政策総合研究所 工修 玉越 隆史

Abstract : It is of great difficulty to check detailed stress flows in concrete to prevent adverse cracking during the construction and in early years of service, because the beam theory that is used typically in design does not fully consider three-dimensional concrete behavior of shrinkage, thermal stresses, and geometric restraints from formworks and the bridge geometry. Accordingly, the present paper studies a practical design calculation model to simultaneously check nominal axial stresses in the bridge axis direction to compare with design strengths as well as shear flows to design structural details to prevent cracking in any directions. The proposed method is a two-phase model comprised of a 3D lattice analysis to obtain nominal stresses and a panel model to evaluate shear flows in plane in webs and flanges. In comparison with FEA using solid finite elements, the proposed method can yield shear flows in a PC bridge at a reasonable accuracy except for the stress distributions in massive end-cross beams.

Key words : Internal stresses , Two-phase model, 3D lattice model

1. 研究の背景と目的

PC橋では、図-1に概念的に示すように、コンクリートの打設から硬化、緊張力導入などの架設段階を経て最終系に至るまでの若材齢時に、温度やクリープ・乾燥収縮、鉄筋拘束および段階施工に伴う材令差などによって部材内部の応力状態は刻々と変化する。一方で通常的设计ではこの間の応力状態について時間を追っての詳細な評価は行われない。そのため、部材や構造の形式、架設方法によってはこの段階毎に変化する応力状態を適切に見積もって制御しなければ、応力超過によるひびわれが生じる可能性も否定できない。

図-2, 3に国が管理する道路橋の点検結果(2011年4月時点)の分析から得られたポステンPC桁のパターン別のひびわれ発生状況を示す¹⁾。例えば、(1), (4)番は供用後の過大な鉛直荷重による以外に、コンクリート硬化前の支保工沈下の影響が考えられる。また(11), (18)番のひびわれ発生はそれぞれコールドジョイントや架設時の拘束などが考えられ、実態からも架設時

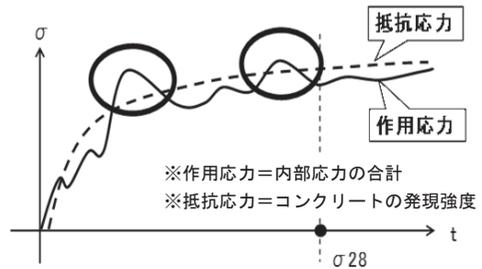


図-1 PC橋の作用力と抵抗力の関係(概念)



図-2 点検結果(ひびわれパターン毎)

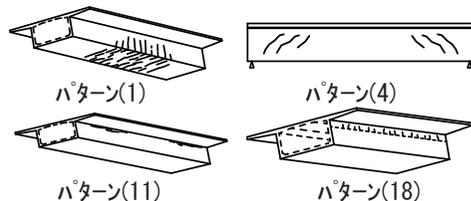


図-3 ひびわれパターン例(定期点検要領 H16)

から供用初期段階にひびわれが顕在化する可能性が少なくないことを示唆している。このような初期変状は耐久性の観点からも悪影響を及ぼすことが考えられ、設計において的確に制御してその発生リスクを小さくすることは耐久性の信頼性向上に有効な手段となろう。一方、これらの架設時の応力によるひびわれ発生リスクを正確に評価するには、棒解析を主体とした従来の設計手法では限界があり、高度なFEM解析に頼っているのが現状である。しかし、精緻なモデルによる三次元FEM解析を用いて時系列を追った照査を実務設計にて行うには簡便さや経済性の面で課題もある。本研究は、これらの背景を踏まえて、主に終局段階のせん断破壊耐力やそのメカニズムの評価手法に関する「コンクリート部材を格子状のトラスの集合体にモデル化する手法」²⁾などの既往の研究も参考に、PC橋の架設段階における部材各部の詳細な応力状態を簡便かつ実務設計に必要な精度で評価できる手法の検討を行ったものである。

2. 架設時を含めた初期応力を簡素に評価する解析手法の検証ならびに考察

2.1 格子モデル (二次元) を用いた簡易解析手法の概要と特徴

架設時応力や使用限界を対象とし、図-4 に示すような格子状のモデルを用いた骨組解析により検討する。床版やウェブは独立させたモデルとし、各部材の応答値が直接的に求まるよう工夫している。また、部材は離散化した梁要素と線要素で構成され、解析出力が特定された位置と向きに集約されたものとして表されている。このことから、力の伝達機構が明確化されるとともに、時刻や荷重条件の異なる解析結果相互の定量的な比較が容易になる可能性がある。加えて、各部材が独立しているため、部材ごとに目的に応じた荷重や作用を直接与えることもできる。たとえば、初期の材齢差に伴う体積変化の作用を段階的に着目部材に与えれば、打継目付近の初期の応力評価などが可能である。さらに、図-5 に示すように、一部のウェブを取出し、骨組解析で得られた変位を強制的に与えた FEM により解析することで、部分的に高精度なウェブの応力状態を導くこともできる。このように本解析モデルは、照査目的に合わせて簡便にも詳細にも応力状態を評価できる利点を有するよう配慮した。なお、

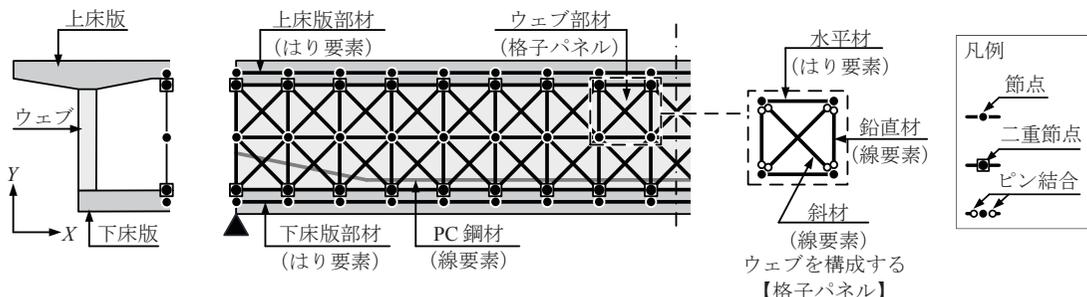


図-4 簡易解析手法に用いる解析モデル (二次元格子モデル)

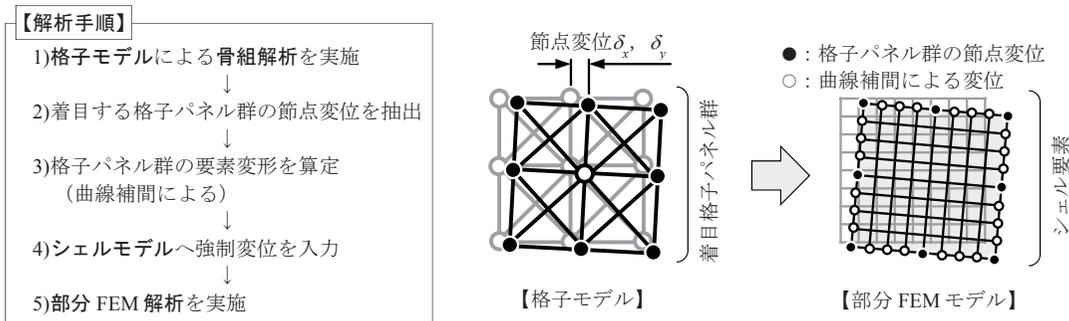


図-5 着目するウェブ (格子パネル群) に対する部分 FEM 解析の実行イメージ

モデル化の詳細については文献³⁾を参照されたい。また、格子モデルを用いた解析は最終的に初期材齢の段階的な応力評価を目的としているが、これに先立ち、本検討では格子モデルの妥当性を検証するため、最終系に着目した検討を実施した。

2.2 格子モデルの照査手法への適用に関する概略検討

(1) 検討対象橋梁の諸元

初期段階の応力評価を含めた照査手法への格子モデルの適用性について試算的に検討した。対象橋梁は、図-6に示す支間長 $l=50\text{m}$ の PC 単純箱桁橋とし、作用は自重、橋面荷重、プレストレス、床版温度差 (-5°C) の 4 ケースで、各単ケース毎に各部材の応答値を算出した。コンクリート強度は $36\text{N}/\text{mm}^2$ 、PC 鋼材には 12S15.2BL を使用して 1 ウェブあたり 10 本配置している。また、三次元弾性 FEM (ソリッド; 以下、3D-FEM と称す) 解析による応答値と比較することで、格子モデルの照査手法としての可能性を相対的に検討した。

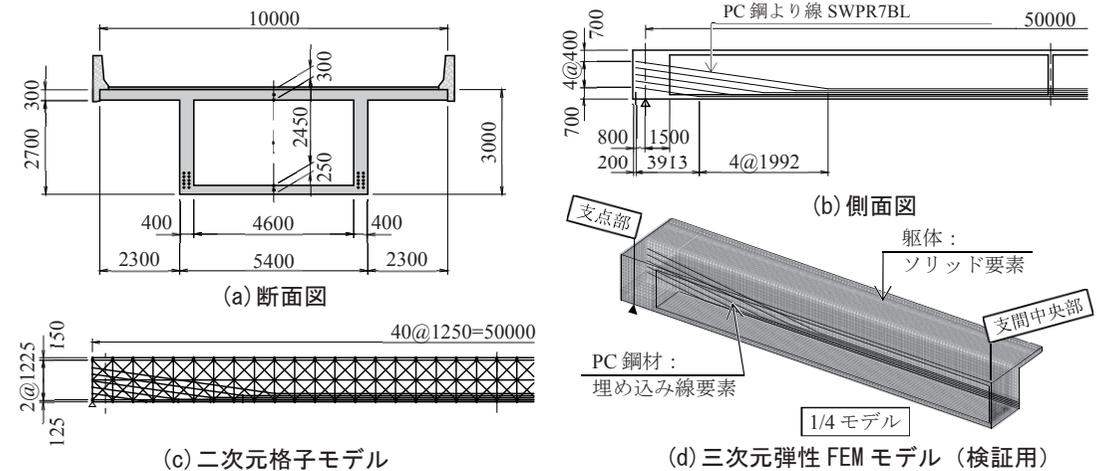


図-6 対象橋梁の構造諸元とモデル

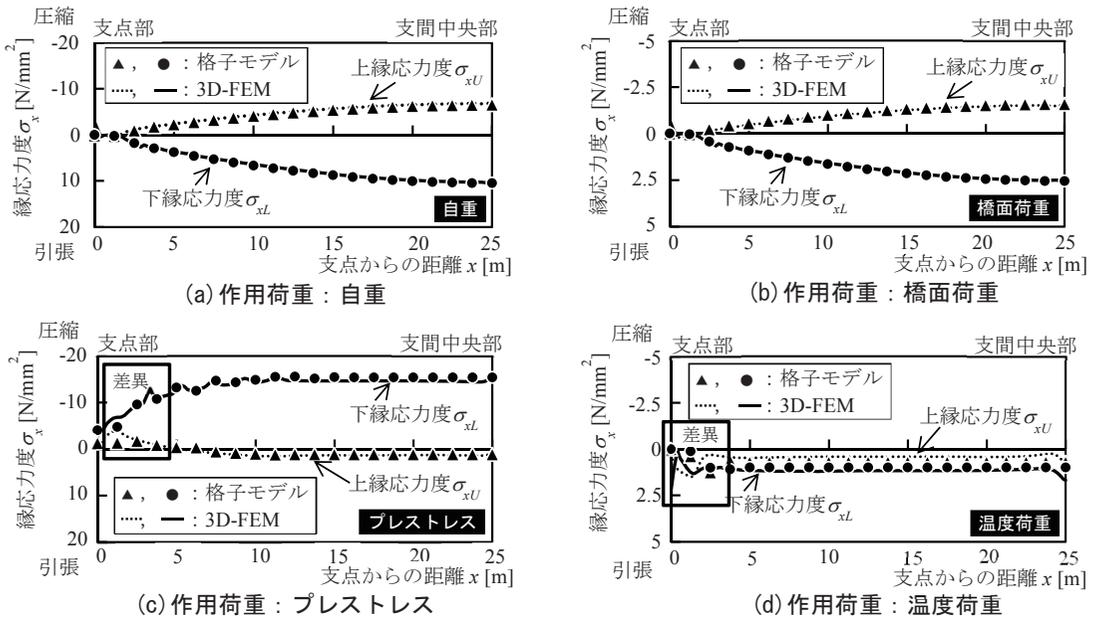


図-7 上・下縁応力度分布 (図示範囲:0.5L)

(2) 曲げ応答値に関する格子モデルの適用性

図-7 に試算による上床版上縁と下床版下縁の応力値を示す。ここで実線と破線は 3D-FEM による解析値、●印と▲印は格子モデルによるものである。なお、二次元格子モデルを用いたため、三次元モデルである 3D-FEM とは、作用条件や応答値の抽出位置、方法が異なり、本検討における両者の対比はあくまでも応力の分布や大きさ等の相対的な比較になる。

図-7 より格子モデルの応力値は自重、橋面荷重、プレストレス、床版温度差とも 3D-FEM の応答値の傾向を全体的に捉えていることがわかる。ただし、プレストレス力や床版温度差のような部材軸に対して軸力と曲げモーメントが作用する条件では、端支点部周辺の P C 鋼材の偏向箇所への応答値が、両者の解析で差異が広がる傾向がみられる。これらの差異は、3D-FEM では端支点部横桁の断面急変部やプレストレス力の変化点などに生じる局所的な応力集中が直接的に評価されるのに対し、格子モデルではこのような局所的な影響を評価できないことが推察され、今後の課題である。しかし、棒解析を主体とした主方向の現照手法でも横桁剛性は無視されて荷重のみ考慮されていることから、実務上は大きな問題とはならないと考えられる。加えて、この差異が生じる影響範囲も局部に留まることから、格子モデルによる曲げ応力度の評価に関しては、ある一定の精度を有する結果が得られることが期待できる。一方で、差異が大きい箇所では、部材の剛度設定方法などモデルに改良の余地もあると考えられる。

(3) せん断 (最大主応力度) 応答値に関する格子モデルの適用性

次に、コンクリートウェブのせん断応答値に着目する。代表として自重作用下における格子モデルと 3D-FEM の支点部と支間中央の最大主応力コンターおよびベクトル図を図-8 に示す。この格子モデルにおける最大主応力度は、上述の図-5 中の【解析手順】により導いている。これより、格子モデルは支間中央部における最大主応力度やその応力方向は、3D-FEM の傾向を捉えていることがわかる。これに対し、端支点付近の応力分布には差異が見られる。3D-FEM では横桁の影響が解析モデルに考慮され、変形は実挙動により近い性状を示していると考えられるのに対して、骨組解析から変形を導く格子モデルでは、横桁などの剛部材の変形挙動が表現されないことが要因と考えられる。このように、部位によっては 3D-FEM との差異はあるものの、本検討結果は、段階施工毎の構造変化や材齢差に起因する拘束力などを評価すべき設計であっても、骨組解析から変形を取り出し、それを部分 FEM 解析に強制変位として与えることでコンクリートウェブの主応力やその方向を算出できる。すなわち、実務において格子モデルを照査手法として用いれば、比較的容易に P C 橋の架設時の複雑な応力状態を、必要な精度で得られる可能性があるものとする。

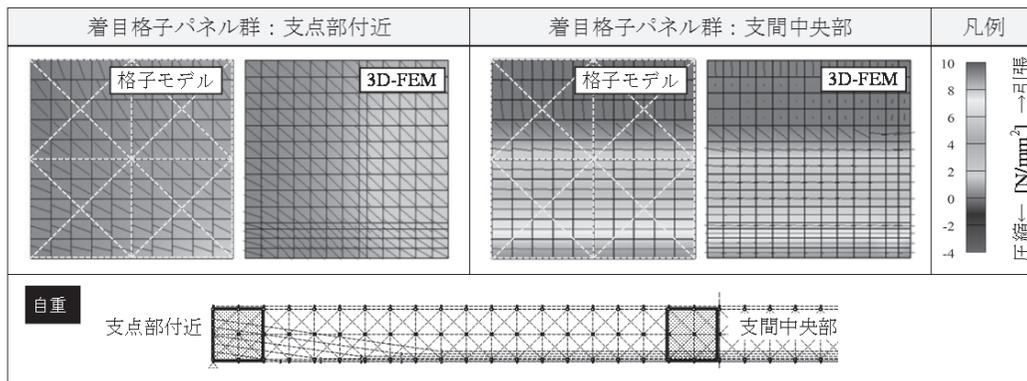


図-8 格子モデルおよび 3D-FEM の着目ウェブ最大主応力分布 (作用荷重 : 自重)

3. 格子モデルの展望

次に、主桁のねじりモーメントや、段階施工に伴う架設時の初期応力を把握するには、床版に対するプレストレスのせん断遅れや同一断面内の分割施工により生じる拘束の影響等を評価するには二次元モデルでは限界がある。そこで、二次元格子モデルの三次元化への展開を概略的に検討した。

検討に用いる橋梁は、実在するPC単純箱桁橋(橋長 $L=40.9\text{m}$)とし、構造諸元を図-9に示す。三次元化は、上述の二次元モデルに対して、ウェブ部材と同様に格子パネルによりモデル化した上床版、下床版を設けることにより実行した。上・下床版の剛度設定については、概略検討のためウェブと同様に設定し、加えて、格子パネルのはり要素には面外方向曲げ剛性も与えた。また、比較検証には三次元FEM(ソリッド)モデル(以下、三次元FEMと称す)を用いた。

まず、図-10に示す段階施工(Step1~3)を考慮した三次元FEMによる温度応力解析を実施し、端支点横桁近傍における最大主応力の時刻歴応答と応力度分布を求めた結果をそれぞれ図-11、12(b)に示す。これより、第二リフト打設後の最大主応力 σ_1 (2.48N/mm^2)が卓越していることがわかる。これが、本検討で着目する架設時応力の一つであり、第二リフト打設後の上床版の硬化に伴う水平方向収縮変

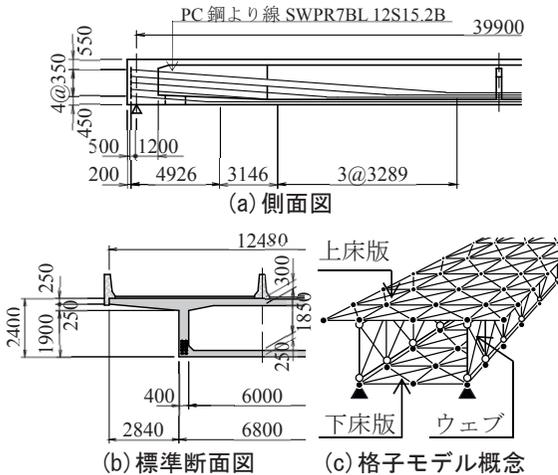


図-9 対象橋梁の構造諸元と三次元格子モデル

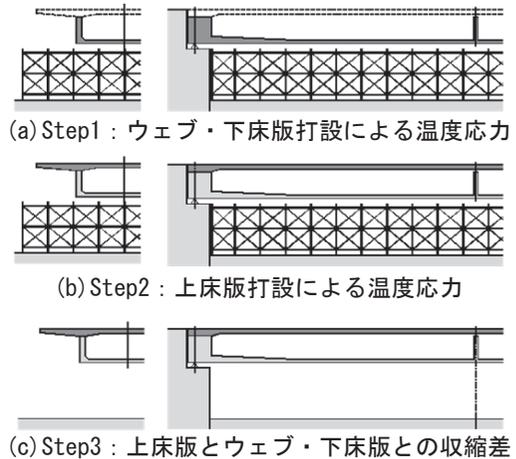


図-10 支保工架設の施工ステップ(分割施工)

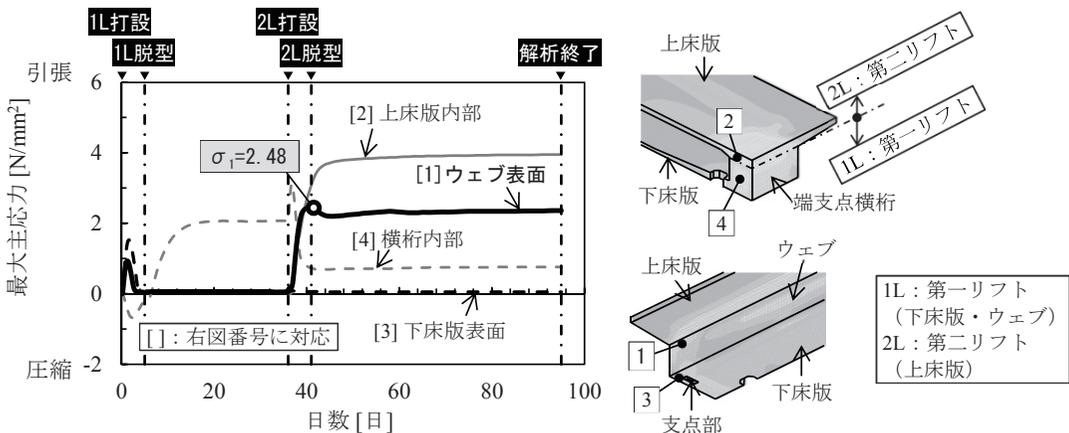


図-11 三次元FEMによる温度応力解析結果(最大主応力時刻歴)

形をウェブ(端支点横桁)が拘束してウェブ上縁に圧縮力が作用し、ポアソン効果で鉛直方向に引張りが生じる現象である。

次に、三次元 FEM 解析モデルの上床版のみに任意の温度変化(線膨張係数 10×10^{-6})を与え、この着目節点での最大主応力 σ_1 と同等になる上床版温度変化を検証した結果、その値は -16°C であった。

そこで、三次元格子モデルの上

床版にこの温度変化を作用させ、部分 FEM により得られるウェブの応力状態を図-12(a)に示す。これより、格子モデルの最大主応力は 2.94N/mm^2 となり、三次元 FEM 解析(2.48N/mm^2)の傾向を捉えていることがわかる。

今後、三次元格子モデルの精度を高める検討を進めていく余地はあるものの、例えば、床版温度差(-5°)の照査のように、初期材齢時の段階施工に伴う上床版の収縮に対するウェブや横桁の拘束の影響を上床版のひずみ量(温度変化)として適切に設定できれば、これを上床版に作用として与えた三次元格子モデルの手法を用いることで初期材齢時の段階的な応力を比較的容易な解析により検証できる可能性があるものと考ええる。

4. まとめ

本研究では、せん断破壊耐力やそのメカニズムを格子モデルにより評価する既往研究²⁾をもとに、この格子モデルを用いて弾性域におけるPC橋の架設段階における応力状態を簡便かつ実務設計において必要な精度で照査できる手法について検討した。結果を以下にまとめる。

- [1] 格子モデルと部分 FEM を組み合わせることによって、従来の棒解析だけでは評価困難なPC部材の初期段階の応力状態を再現できる可能性を示した。
- [2] 格子モデルは、はり要素で構成され、部材ごとの応答値が直接得られる。また、骨組解析を用いた各部材の応答値から応力を算出するため、道路橋示方書などの技術基準に定められた許容値(安全率)を適用できると考えられる。
- [3] 格子モデルは二次元、三次元 FEM に比べるとモデルが簡素であり、実務上大きな負担となることなく架設時の時系列を追った応力状態の確認などの照査手法になる可能性がある。
- [4] 端支点部横桁の断面急変部やプレストレス力の変化点などの局所的な応答値は 3D-FEM と傾向が異なることから、モデリングや各部材の剛性評価の設定、さらには、解析精度の観点から格子モデルの適用範囲を見極めていく必要がある。

参考文献

- 1) 玉越, 横井 他: 全国規模の点検データに基づく道路橋のコンクリート部材の劣化の特徴, コンクリート工学論文集第 25 巻, 167-180, 2014 年
- 2) 例えば, 二羽淳一郎 他: 鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷機構に関する解析的研究, 土木学会論文集, No. 508/V-26, pp. 79-88, 1995. 2.
- 3) 原田, 岡田 他: 格子モデルを用いたPC橋の解析手法についての一考察, 第 24 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム

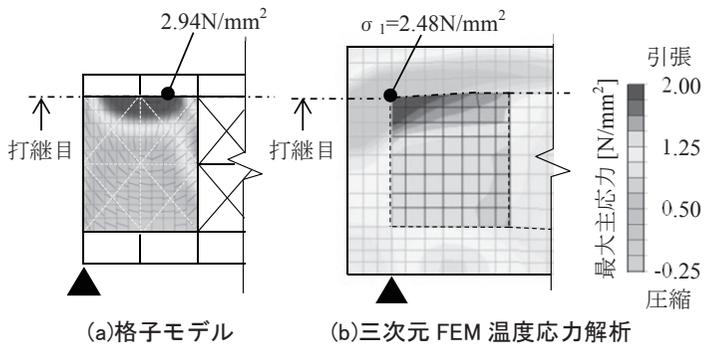


図-12 ウェブの最大主応力分布