

第4回 PC構造で使ってみよう(その2)

講師：小幡 泰弘*1・安田 昌宏*2

1. 定着部の検討

第3回では緊張力による構造物の全体的な挙動を解析するための手法を説明しました。

これまでの例題では定着部から離れたところの応力はきれいに分布していました。しかし、定着部では緊張材自体で釣り合っていた緊張力をコンクリートが集中的に受けもつことになり、腹圧力(偏向力)とは比較にならない応力が作用します。

また、本来プレストレス力は構造物に圧縮力を与えるための力ですが、定着部のように集中力が作用する部材には、ポアソン効果(物質に力を加えるとその方向の変形に伴い直交方向にも変形する)などにより無視することのできない引張力が発生します。

今回は、定着力による影響と定着部の構造が複雑であることによる応力集中を把握するための方法について説明します。

定着部の特徴としては、定着具によって多少の違いはありますが、次の事項が挙げられます。

- ① 定着力は支圧板を介して伝達する。
- ② 定着具(外套管)や緊張材の通るスペースがある。
- ③ 定着体が周囲の構造(床版やウェブ)から突出している。あるいは、周囲より窪んでいる。

これらが実際にどのように影響するのかを次の定着部の構造を例に説明します。

- ① 外ケーブルの定着部
- ② 内ケーブルの定着部
- ③ 単純T桁橋の端部定着部

1.1 外ケーブルの定着部

箱桁の張出し先端部で、図-1、2に示す定着構造に外ケーブルの定着力が及ぼす影響を次の方法で解析します。

(1) 解析条件

解析ケースの条件は次のとおりです。

定着力はケーブルをモデル化せずに、外力として載荷します。また、ケーブルは橋軸方向に配置されていて、定着体の内部で偏向しないこととします。

- ケース1：支圧板、シース管およびそのためのス

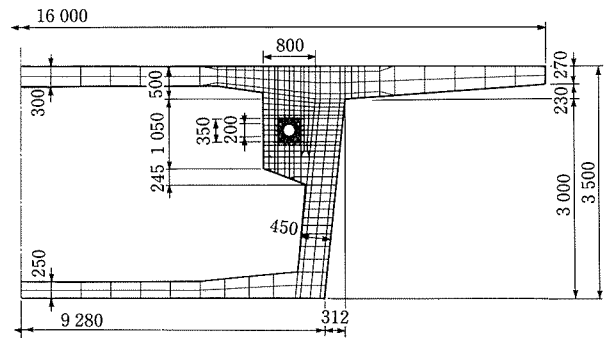


図-1 定着部断面図

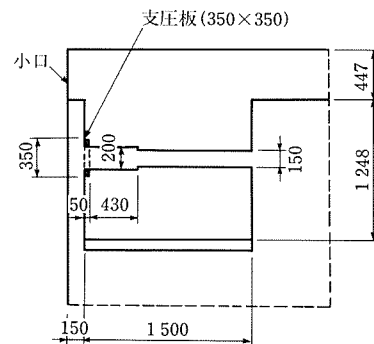


図-2 定着部平面図

ベースを無視し、コンクリートが充実しているモデルに集中荷重を載荷する(図-3(a))。

- ケース2：モデル化はケース1と同じで、支圧板の位置全面に分布荷重を載荷する(図-3(b))。
- ケース3：支圧板とシース管のスペースを考慮し、支圧板を介してコンクリートに定着力を載荷する。(図-3(c))

表-1 解析ケース

ケース	シース管開孔	支圧板	荷重載荷方法
1	無視	無視	集中荷重
2	無視	無視	支圧板範囲で分布載荷
3	考慮	考慮	定着ブロック範囲に分布載荷

*1 Yasuhiro OBATA：(株)CRC総合研究所 建設技術部 土木・橋梁課 課長
 *2 Masahiro YASUDA：(株)CRC総合研究所 建設技術部 土木・橋梁課

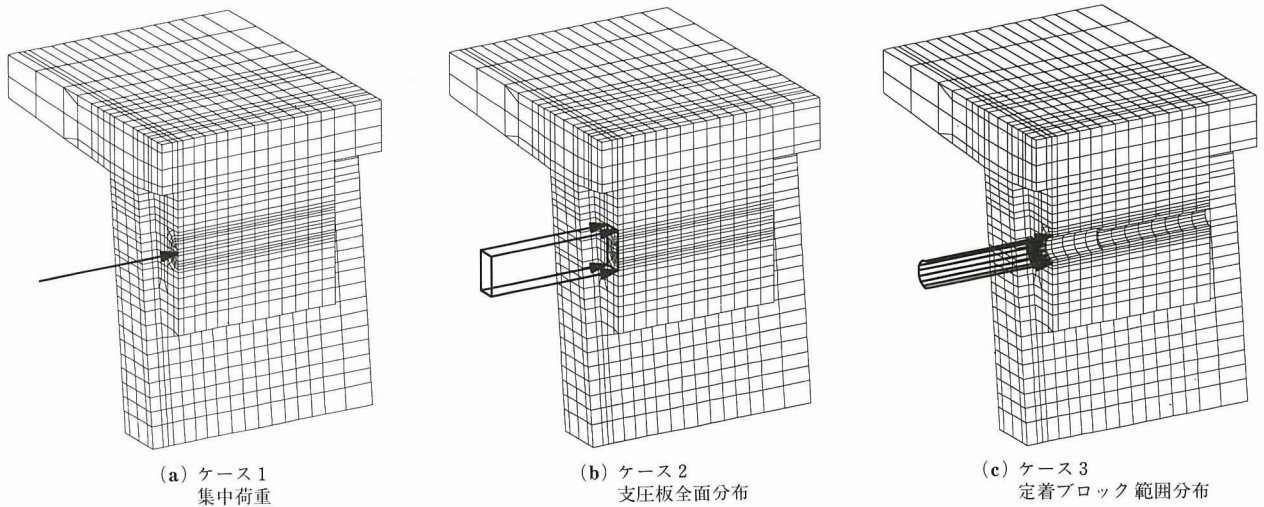


図-3 定着ブロックのモデル化および荷重載荷方法

解析に用いた諸元を次に示します。

- コンクリート ヤング率 $3.1 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$
ポアソン比 0.167
- 支 圧 板 ヤング率 $2.1 \times 10^8 \text{ KN/m}^2$
ポアソン比 0.3
- 定 着 力 3000 kN

(2) 支圧板の扱い(ケース3)

ケース3の場合は、支圧板をモデル化するためコンクリートとの結合条件が問題になります。実際には図-4の上側に示すように、支圧板は定着力によって圧接されているだけで、コンクリートとは結合されていません。さらに、定着力を伝える定着ブロックは支圧板の中心部に接しているだけなので、支圧板は外側に反り返り、コンクリートとは離れることも考えられます。

この現象を考慮するために、図-4の下側に示す非線形ばね要素(接触要素)を用いてモデル化します。接触要素には圧縮力のみを伝達し、引張力は伝達しない条件を与えます。

また、荷重は定着ブロックと接する範囲に分布荷重として載荷します。

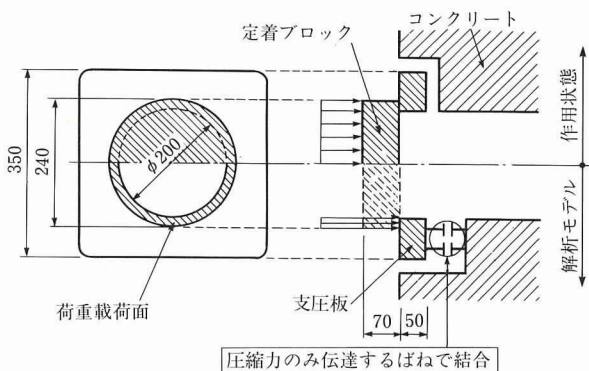


図-4 定着部のモデル化(ケース3)

(3) 解析結果

各ケースの最大主応力度を図-5~7に示します。

図-5, 6はケース3と比較するために、支圧板とシース

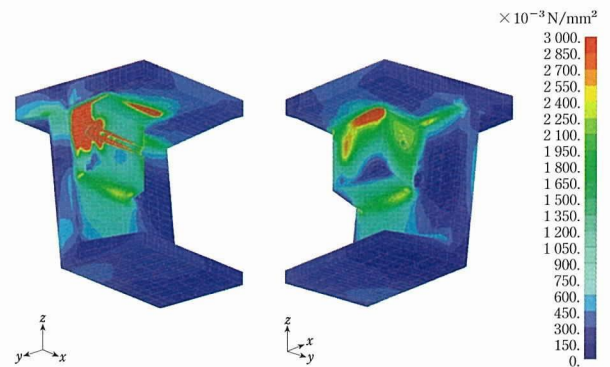


図-5 最大主応力度(ケース1)

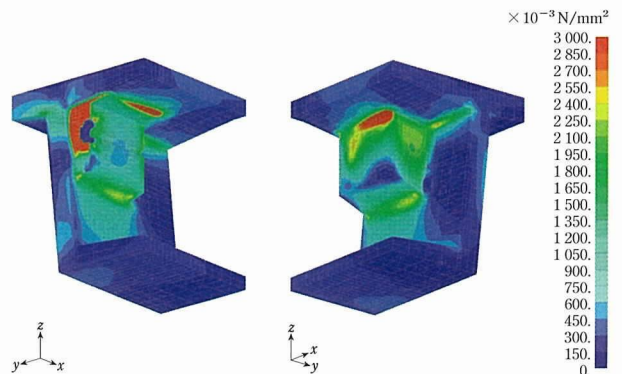


図-6 最大主応力度(ケース2)

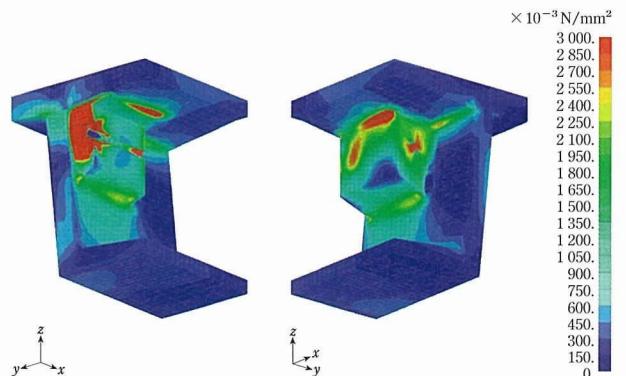


図-7 最大主応力度(ケース3)

管の空間を埋めている要素を省いて図示しています。

各図左側は定着体前面と内部を図示し、右側は背面を図示しています。

① 定着体前面

定着体の支圧側表面では、引張応力 3 N/mm^2 以上が発生している範囲はどのケースもほぼ同じですが、支圧板前面に分布荷重を載荷したケース 2 では、表面にしか発生していません。

ケース 1, 3 は定着体内部まで引張応力が発生していますが、ケース 1 は集中荷重を載荷したことにより局部的に大きな変形が生じたためです。

ケース 3 は支圧板を介して荷重を伝達していますが、定着力は図-4 のように中央部に載荷されるので、支圧板の厚さ方向ではそれほど広がることなく集中荷重として作用します。このことは図-8 の支圧板の応力分布で観察できます。

コンクリートの中央部の変形が大きくなり、支圧板端部が反り返り、コンクリートから離れている様子も見る事ができます。

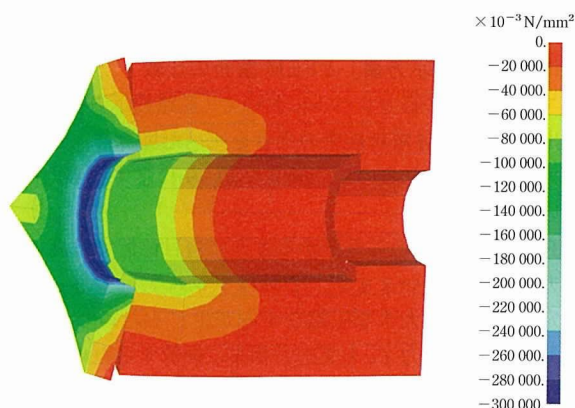


図-8 支圧板の変形および最小主応力度

② 定着体背面

一方、背面側のケーブル出口付近を見るとケース 1, 2 ではそれほど大きな応力は発生していませんが、ケース 3 では 3 N/mm^2 以上の応力が発生しています。

これは、ケース 3 ではシース管による開孔部を考慮しているため、背面に生じている引張応力が開孔周辺に集中するためです。

③ 定着体側面および床版、ウェブとの付け根部

側面ではケース 3 の応力が大きく出っていますが、分布は他のケースとほぼ同じ傾向です。

付け根ではどのケースもほぼ同じ応力が発生しています。

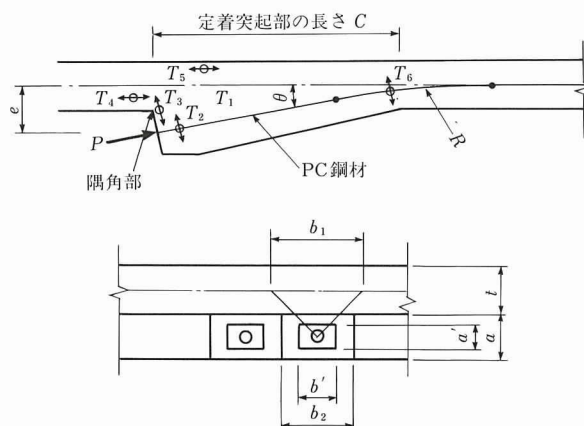
(4) ま と め

以上から、定着部近傍を検討する場合は、モデル化と荷重載荷方法が、結果に影響を与えるため重要であることが分かります。しかし、定着体そのものではなく、付け根部付近の検討を行う場合は、定着構造自体の詳細なモデル化は必要ないと言えます。

1.2 内ケーブルの定着部

「道路橋示方書」では PC 鋼材を突起部に定着させる場

合、定着部付近の図-9 に示される各位置に発生する引張力に対する補強について規定しています。ここでは、PC 箱桁橋に用いられる内ケーブル下床版定着突起について 2 次元平面モデルと 3 次元立体モデルによる FEM 解析を行い、「道路橋示方書」により算出される局部応力と比較します。



ここに、

- P : プレストレス力 (kN)
- e : プレストレスの偏心量 (mm)
- C : 定着突起部の長さ (mm)
- R : PC 鋼材の曲げ半径 (mm)
- θ : PC 鋼材の曲げ角度
- T_1 : 定着部背面 z 方向 (紙面直角方向) に生じる引張力 (kN)
 $= 0.25 P(a - a')/a$
- T_2 : 定着部背面 y 方向に生じる引張力 (kN) $= 0.25 P(b - b')/b$
- T_3 : 隅角部に生じる引張力 (kN) $= 0.1 P$
- T_4 : 定着部前面に生じる引張力 (kN) $= 0.5 P - \sigma_f(b \cdot t)$
- T_5 : プレストレスによる曲げモーメント ($M = P \cdot e$) によって生じる引張力 (kN)
- T_6 : PC 鋼材屈曲部に生じる引張力 (kN)
 $T_6 = P \cdot \sin \theta = P \cdot \theta = P \cdot e / C$

a, b : 定着部を切り出したときのコンクリートブロックの断面寸法
 a', b' : 支圧部分の寸法

σ_f : フランジに作用している橋軸方向平均応力度 (kN/mm²)

図-9 定着突起に発生する引張応力^{1), 2)}

(1) 定着突起部のモデル化について

図-10 に下床版定着突起部の構造寸法を示します。2次元モデルではウェブの拘束効果による影響を考慮するため 2 ケース (図-11 のモデル 1, 2) の解析を行い、3次元モデルでは上床版とウェブについてもモデル化 (図-11 のモデル 3) して解析します。

(2) 拘束条件

- モデル 1 : 図-10 に示す 1-1 断面近傍を想定し、片側 A 部のみを完全固定
- モデル 2 : ウェブ近傍を想定した拘束条件とするため片側 A 部をモデル 1 と同様に完全固定とし、下床版底面 (B 部) の鉛直方向を拘束
- モデル 3 : 半断面の対称モデルとし、定着部背面側のモデル端部を完全固定

(3) 緊張導入力の載荷方法

緊張端導入力は PC 鋼材 1 本あたりを $p = 1\,000 \text{ kN}$ とし、定着部に水平方向と鉛直方向の分力で集中荷重として与えます。

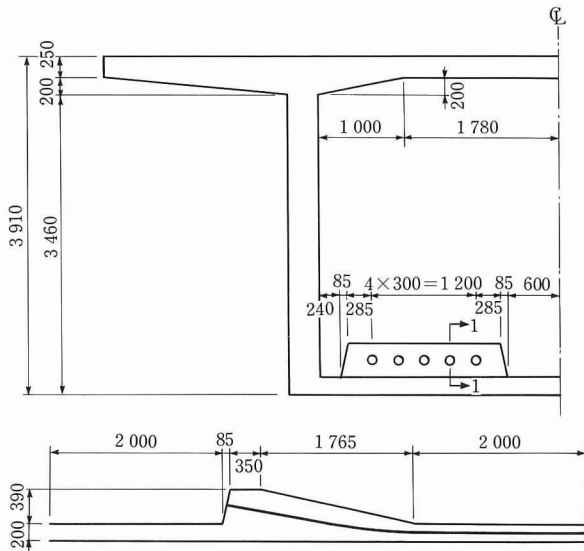


図 - 10 構造寸法図

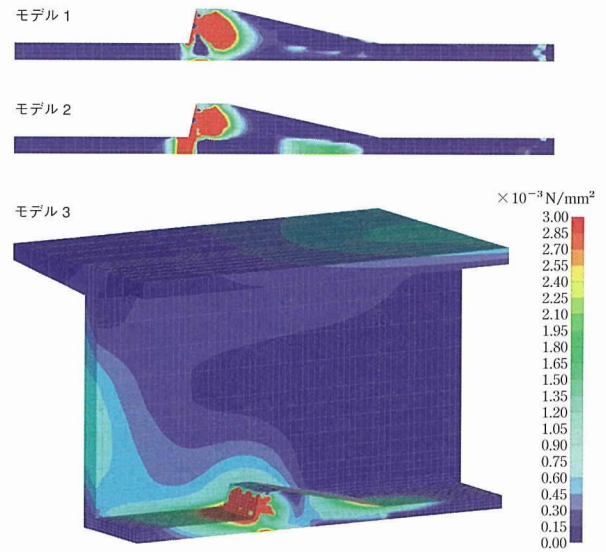


図 - 12 最大主応力度

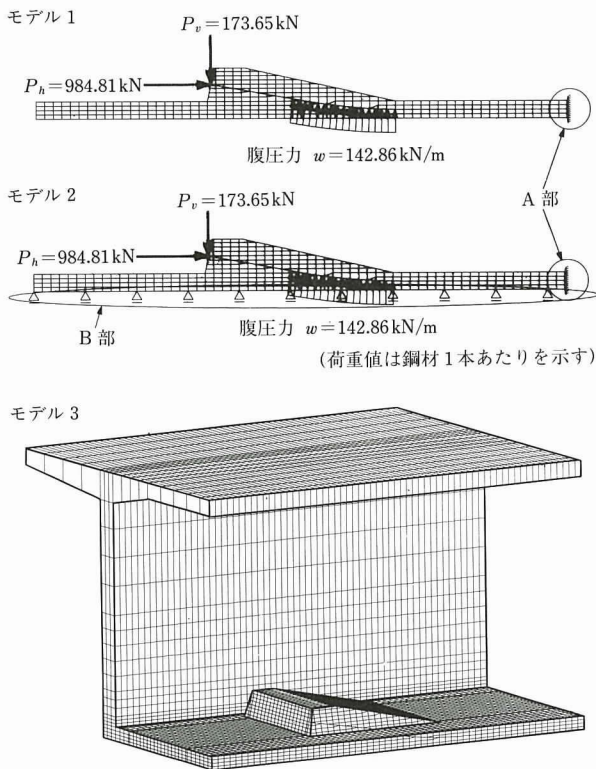


図 - 11 解析モデル図

PC鋼材の曲線配置 ($\theta = 10^\circ$, 曲げ半径 $R = 7\,000$ mm) による腹圧力 w は分布荷重として載荷します。また、緊張力の減少は無視し、全長にわたり同じ緊張力が働いているものとして、PC鋼材 1 本あたりの定着位置での作用力 P_v , P_h および腹圧力 w を次式に示します。

$$P_v = p \sin \theta = 1\,000 \times \sin 10^\circ = 173.65 \text{ kN/本}$$

$$P_h = p \cos \theta = 1\,000 \times \cos 10^\circ = 984.81 \text{ kN/本}$$

$$w = p/R = 1\,000/7 = 142.86 \text{ kN/m/本}$$

平面モデルでは奥行 1 m あたりの荷重を与えます。

(4) 解析結果

図 - 12 にモデル 1~3 の最大主応力のコンター図を示し

ます。定着部前面と定着部背面に大きな引張応力が発生していることがわかります。

(5) 「道路橋示方書」と FEM 解析の比較

では、実際の応力レベルにおいて「道路橋示方書」による算出方法と FEM 解析結果の両者を比べた場合に、どの位の応力差違が見られるのか、両者を図 - 9 に示す引張力 T_4 について比較します。

FEM 解析結果からも分かるように着目位置では高い引張応力が発生していますが、これはプレストレス p によって定着部付近に大きな圧縮ひずみが生じるためです。

以下に、引張力 T_4 を実応力相当に換算するための算出式を示します

$$T_4 = 0.5p - \sigma_f \cdot b \cdot t$$

$$= 0.5 \times 1\,000 - 0.0 \times 200 \times 300 = 500 \text{ kN}$$

(ここでは、平均軸圧縮応力 σ_f は考慮しないものとします)。

この引張力 T_4 が作用する有効断面積を A 、有効幅 b を図 - 13 に示す $b_1 = 590$ mm および $b_2 = 300$ mm としたときの 2 通りについて応力を求めます。

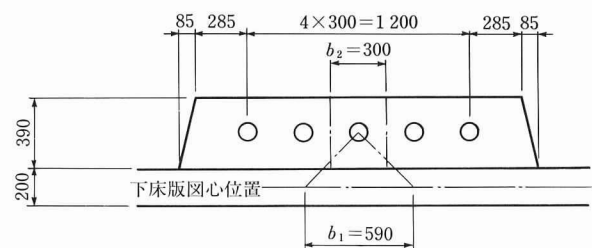


図 - 13 有効幅 b

① 有効幅 $b_1 = 590$ mm

$$\sigma_{T4} = T_4 / A = T_4 / (t \times b_1)$$

$$= 500 \times 10^3 / (200 \times 590) = 4.237 \text{ N/mm}^2$$

② 有効幅 $b_2 = 300$ mm

$$\sigma_{T4} = T_4 / A = T_4 / (t \times b_2)$$

$$= 500 \times 10^3 / (200 \times 300) = 8.333 \text{ N/mm}^2$$

FEM解析の図-14に示す着目要素と、「道路橋示方書」による直応力 σ_x の比較を図-15に示します。

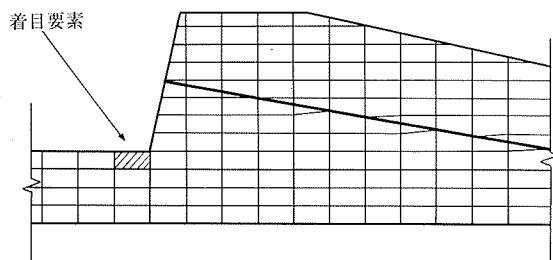


図-14 引張力 T_4 の着目要素

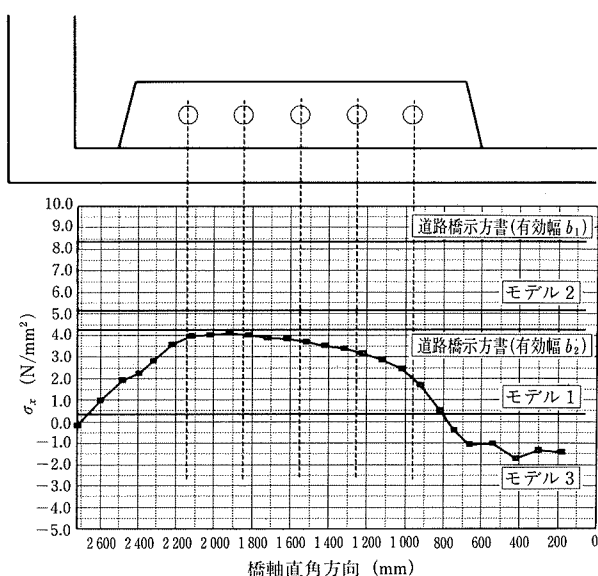


図-15 引張力 T_4 による引張応力の比較

(6) まとめ

以上の結果をまとめると次のことが言えます。

- ① 引張力 T_4 は有効幅 b の値により引張応力を緩和させることができます。したがって、鋼材間隔 b_1 を大きくするか、下床版を厚くすることにより、引張力 T_4 による応力を低く抑えることが可能となります。
- ② 定着部がウェブ近傍にある場合は、2次元モデルは下床版底面の鉛直方向を拘束することで3次元モデルでのウェブ近傍に近い値を得ることができます。
- ③ 定着突起付け根のような断面変化部では応力が集中するので、適切なモデル化(要素の大きさ等)を行うことが必要です。
- ④ FEM解析の結果を適切に用いることは、効果的に補強鉄筋を配置する方法の一つと言えます。

1.3 単純T桁橋の端部定着部

次に、ポストテンション方式単純T桁橋の主方向の緊張力が定着部近傍に及ぼす影響を調べることにします。

前節まで説明してきた定着部は床版やウェブから突出した構造になっていましたが、ここでは、図-16に示すT桁端部の定着部近傍の応力状態を、横桁横締め定着部の切欠きがある場合とない場合と比較します。

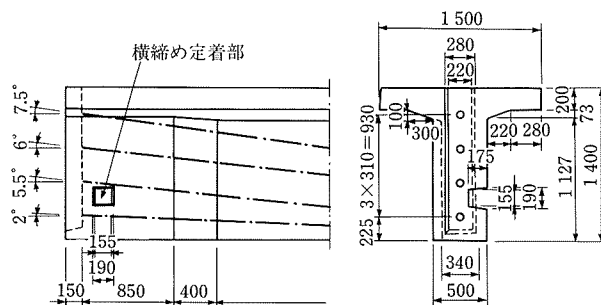


図-16 T桁端部構造図

(1) 解析条件

主方向の緊張材4本に緊張力が導入されている場合を解析します。ただし、このときのT桁の自重は無視します。

解析ケースは次の2ケースとします。

- ケース1：横締め定着部切欠きがない場合
- ケース2：横締め定着部切欠きがある場合

作用荷重は2ケースともに次の緊張力を作用させることとします。

PC鋼材はSWPR7B 7S12.7を使用するものとして、緊張作業時の応力を 1350 N/mm^2 とします。

ここで、PC鋼材の断面積は 690.97 mm^2 ですから、各鋼材の緊張力は 932.8 kN となります。

また、緊張力の減少は無視することとします。

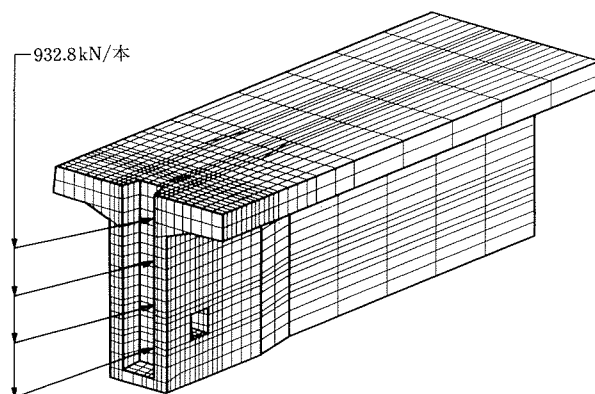


図-17 解析モデルおよび荷重載荷図

(2) 解析結果

各ケースの引張応力の分布を図-18に示します。各図の右側は、横締めの定着面の断面図です。

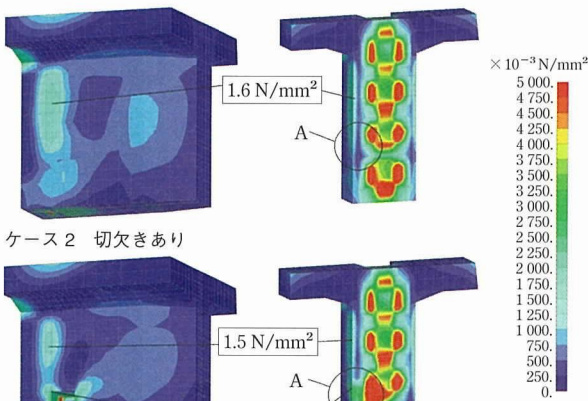
切欠きのない部分の表面を見ると、ケース1では最大 1.6 N/mm^2 の引張応力が発生しています。ケース2のほぼ同じ位置の応力は 1.5 N/mm^2 となっています。引張応力の大きさとしては同程度ですが、 1.0 N/mm^2 以上の引張応力は、ケース1の方が少し広い領域で発生しています。

一方、切欠きの角部ではケース2で最大 3.3 N/mm^2 の引張応力が発生しています。

同様に断面A部を見ると、横締め切欠きの断面欠損の影響により、ケース2では高レベルの引張応力がケース1より広範囲に分布していることが分かります。

実際には、定着部背面には鉄筋が密に配置され補強され

ケース1 切欠きなし



ケース2 切欠きあり

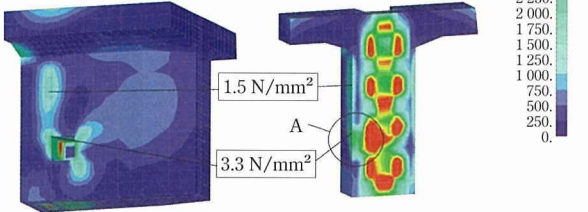


図-18 最大主応力図

ていますが、通常よりも多くの横桁横締めを配置する場合には注意が必要です。また、切欠き部は他の部分より大きい応力が発生することが分かります。

1.4 定着部解析のまとめ

これまでの解析例でも分かるように、FEM解析は局所の応力を把握するのに有効な手段であることが分かりますが、モデル化や荷重の載荷方法によって解析結果が変わってしまうことも事実です。適切なモデル化と載荷方法を選定し、得られた結果にも十分な検討を行ったうえで設計に反映することが重要となります。また、今回は主に最大主応力（最大引張応力）で説明をしてきましたが、補強鉄筋量を算出するにあたっては、応力の方向を把握して慎重に行うことが大切です。

2. 非線形FEM解析について

本講座の第1回からこれまでは、線形解析としてFEM解析を説明してきました。「線形」とは簡単に言えば、構造物に作用している荷重が除かれたときに、その荷重が作用する前の状態に戻るといことです。すなわち、応力（荷重）とひずみ（変位）の関係が図-19(a)のように1次の方程式（直線）で表されていることを意味します。しかし、実現象では線形の範囲で説明できないことは珍しくありません。身近な例としてコンクリートが挙げられます。コンクリートは圧縮力には強度を発揮しますが、引張力に関しては圧縮力に比べてほとんど強度はないと言えます。圧縮力に対しても限界を超えると圧壊を起こし、また、引張力に対してはひび割れが発生します。鋼材もある応力を超えると、ひずみと応力（荷重）の関係は直線では成り立たなくなります。このような性質を材料非線形と呼びます。

線形解析では、その物質の性質のほんの一部を用いて解析しているにすぎません。

一般に物質の線形範囲を弾性と呼び、その範囲を超え荷重を除いてもひずみが残る状態を塑性と呼びます。

今までの構造物の設計では材料が弾性の範囲で行い、塑性化しないように設計していました。しかし、近年は許容

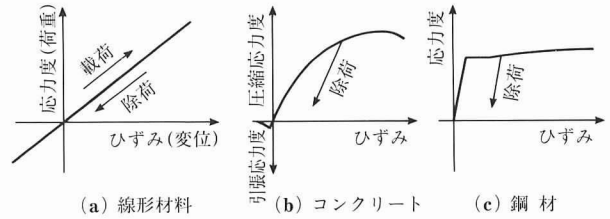


図-19 応力-ひずみ関係

応力度設計法に代わり、限界状態設計法のように弾性の範囲を超えた設計が行われています。そのためには、非線形解析が必要になる場合があります。

また、材料そのものの性質による非線形性以外にもその材料の置かれている状態による非線形性も存在します。例としては、吊橋などにおける幾何学的な非線形性が挙げられます。

通常解析では、力の釣合いを変形前の形状で考える（微小変形解析）方法で行いますが、幾何学的非線形解析（大変形解析、有限変形解析）では、変形後の形状で力の釣合いを考える解析方法です。吊橋など変形が大きく、無視できないような構造物の解析に対して用いられています。

また、構造物の安定問題（座屈）を解析する手段でもあります。幾何学的非線形は、構造物に作用している力と材質の変化の関係ではなく、力と剛性（座屈）の関係を解析するとも言えます。

1章で説明した接触要素も非線形解析の一つです。通常は一つの要素が物質としての剛性をもつのですが、接触要素は物質ではなく物質と物質との接続状態を表す要素とも言えます。

これらの非線形解析は理論としては古くから導かれており、金属材料の分野では実績も多く積まれています。しかし、コンクリートは複合材料という不均一な物質であり、かつ非線形性の高い物質であることから、解析面ではこれからの材料とも言えます。近年、いろいろな手法に基づいたソフトが開発されていますが、適用範囲はまだ狭いと言えます。

コンピュータが目覚ましく発達している現在、非線形解析はより身近に行うことができるようになってきました。さまざまな分野でソフトが開発され、実験などと比較しても良い結果が得られています。しかし、解析ソフトは万能ではありません。モデルを作って材料定数と荷重を与えれば結果が出る線形解析とは違い、非線形解析はデータをそろえれば結果が得られるというわけではありません。同じモデルでも荷重状態が違っただけで解析結果が得られなくなることは珍しくありません。また、これは線形解析にも当てはまりますが、結果が得られたとしても、結果に対しての検討は十分行うことが必要なのは言うまでもありません。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書Ⅲ，p.188，1996.12
- 2) 日本道路協会：コンクリート道路橋設計便覧，p.187，1994.2
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の設計にFEM解析を適用するためのガイドライン，p.121，1989.3