

1. はじめに

今回の講座は,骨組解析の基礎知識と照査方法について です。骨組解析に必要な条件,モデル作成方法,結果の照 査方法について,具体的な解析事例を用いて解説します。

解析事例としては、PC3径間連続ラーメン箱桁橋(主 方向)を用います。荷重ケースごと、照査項目ごとに、結 果の傾向についても図示しますので、結果を評価するうえ での基礎知識として合わせて理解しておきましょう。

2. 骨組解析とは

骨組解析とは、構造物に荷重が作用した時、部材断面に 生じる断面力、変位、および反力を算出することです。

解析手法としては、一般的に微小変形理論が用いられて います。微小変形理論とは、構造物に外力が作用して変形 しても、変形量が微小であるため、外力が作用した状態で の力のつり合いは、外力が作用する前の形状ならびに状態 で成立するという仮定のことです。微小変形理論に基づい た変位法により、各節点におけるつり合い条件から求めた 変形量をもとに、断面力および反力を決定しています。な お、微小変形理論において、極端に短い部材を設けると、 解析精度が落ちるので注意が必要です。現在では、解析プ ログラムに後述の必要な条件を入力することにより、容易 に解析を行うことが可能です。

この骨組解析で算出された断面力を元に,応力度を求め, 許容値との比較や,部材のもつ耐力値との比較を行い,部 材の安全性を確認します。

3. モデル作成

3.1 解析モデル

解析モデルは道路橋示方書(以下道示)を参考に,連続 構造,曲線構造,ラーメン構造など対象となる構造物の特 性を考慮できる適切な解析モデルを設定します。

解析モデル軸線は,コンクリート全断面有効時の図心を 結ぶ線が原則ですが,断面変化に伴う軸線変化の影響が小 さいと考えられる場合,主桁の軸線を直線としても差し支 えありません。本講座では,箱桁の全断面を一つの梁と し,主桁の軸線を直線とする平面骨組みモデルで説明しま す (図 - 1)。



図 - 1 PC3径間連続ラーメン箱桁橋

張出し架設の場合は、架設段階を追った解析を行うため、 架設段階ごとに解析モデルが変化します。架設段階ごとの 断面力を合成し完成系の断面力となります(図-2)。



図-2 架設段階ごとの解析モデル図

3.2 節点位置の取り方

節点位置では,断面力,変位が算出されます。節点は曲 げ・せん断照査位置,剛域(部材厚さが十分に大きく部材 が変形しない区間のこと),支点,横桁,断面変化位置な どに設けます。また,張出し架設区間はブロック端,支保 工架設区間は解析精度が保たれる間隔で等分割位置に節点 を設けます。さらに,中央閉合部は支間中央付近にある場 合が多いので,正の曲げモーメント最大値を確認するた め,中間に節点を設けた方が良いでしょう。

橋脚は解析精度が保たれる間隔で等分割位置に節点を設けます。フーチングは下面に節点を設け、中間点は必要に応じて設ければ良いでしょう(図 - 3)。

3.3 支持条件

支承の支持条件は,鉛直方向は固定またはバネ値,水平 方向は固定,可動またはバネ値を考慮します。標準的に使 用されているゴム支承の場合,鉛直,水平ともに支承の性 状を表すバネ値を設定します。回転方向は,一般的に可動 とします。

* Akiko IDE: JIP テクノサイエンス (株)



図-3 解析モデル図と節点の設け方

基礎の支持条件は,地盤条件から算出したバネ定数を考慮します。なお,地震時の解析には地震時用のバネ定数を 考慮します。基礎のバネ定数算出方法については,参考文 献(H2 道示V p.170)を参照してください。

3.4 断面性能

構造解析や応力の照査を行うには、断面積(A)、断面2次モーメント(I)、図心(Y)、断面係数(Z)などが必要になります。断面性能は、断面形状によって決定します。 主桁の断面性能には、総断面(シース孔や PC 鋼材を無視した断面)、純断面(総断面からシース孔を除いた断面)、 PC 鋼材換算断面(純断面に PC 鋼材をコンクリート換算し加えた断面)があります。架設段階により、応力度を算出する断面性能は異なります。

3.5 使用材料

使用する材料を設定します。コンクリートの設計基準強 度 σ ck,ヤング係数Ec,せん断弾性係数Gc,線膨張係数 a,PC鋼材の材料特性(PC鋼材種類,セット量(PC鋼 材を緊張した後,定着具でコンクリートに固定するとき, PC鋼材が定着部で引き込まれる量),シース孔(コンクリ ート断面にPC鋼材を配置するための筒による孔),摩擦 係数(PC鋼材の延長に沿って起こる摩擦と湾曲によって 起こる角変化による摩擦がある),リラクセーション率 (PC鋼材を緊張した後,時間の経過とともに引張応力が減 少する性質のこと)),鉄筋の材料特性(鉄筋種類)などを 適切に設定します。

3.6 荷 重

PC橋梁に作用する一般的な荷重は,主荷重として死荷 重,活荷重,クリープ,乾燥収縮,プレストレス,従荷重 として温度変化,温度差,地震荷重,その他必要に応じ て,雪荷重(主荷重)などを考慮します。各荷重の特徴に ついては次章で詳しく説明します。

3.7 架設工法

本講座では張出し架設を想定していますが、その他代表 的なものとして、一括架設、分割架設などがあります。

4. 解析結果

ここでは、一般的な荷重について、載荷方法、変位、断

面力,曲げ応力度の状態を解説していきます。なお,説明 図での変位,断面力のスケールは各荷重ごとに設定してい ますが,曲げ応力度については,全体に対する影響度を理 解してもらうために,各荷重すべて同じスケールで表示し ています。

曲げ応力度は、桁の上縁と下縁の応力度で照査を行いま す。上縁と下縁が圧縮と引張の一番大きい応力度となるた め、その部材の安全性を評価することができます(図 - 4)。



4.1 死 荷 重

自重(構造物自体の重さ),橋面荷重などです。張出し 架設の場合は架設機材荷重を一時的に考慮します(図 - 5)。



図-5 死荷重による解析結果

死荷重の妥当性評価は、中間支点上で負、支間中央では 正の曲げモーメントが発生していることと、反力の合計 が、総重量と一致していることを確認します。

4.2 活荷重

活荷重は構造物上を移動する荷重で,自動車荷重,歩行 者による群集荷重があります。自動車荷重には,T荷重と L荷重がありますが,一般に支間長が15m以上の場合は, 部材に対し不利な荷重となるL荷重が適用されます(表 -1)。

L荷重は2種類の等分布荷重 P1, P2 からなり, P1 荷 重は大型車両, P2 荷重はその他の車両を想定しています。

活荷重は部材に対しもっとも不利な状態での載荷を行う ため影響線載荷を用います。影響線とは、モデル上の任意 位置に作用する荷重の移動によって、反力や断面力がどの ように変化するかを表した線図です。影響値に荷重値を乗

| | | | | | | L | :支間長 (m) |
|-------|----------------|-------|--------------------|-------------------------|-------------------|-------|----------|
| 荷重 | 主載荷荷重(幅 5.5 m) | | | | | | |
| | 等分布荷重 P1 | | | 等分布荷重 P2 | | | |
| | | 荷重(k | N/m ²) | 荷重 (kN/m ²) | | | 従載荷荷 |
| | 載荷長 D | 曲げモーメ | せん断力 | | | | 重 |
| | (m) | ントを算出 | を算出す | $L \leq 80$ | $80 < L \leq 130$ | L>130 | |
| | | する場合 | る場合 | | | | |
| A 活荷重 | 6 | 10 | 12 | 3.5 | 4.3-0.01 L | 3.0 | 主載荷荷 |
| B 活荷重 | 10 | | | | | | 重の 50 % |

表 - 1 L 荷 重

じることにより,断面力・変位・反力を算出します。 さらに,橋面の凸凹,車両の加速や減速などの要因によ る衝撃係数(i)を考慮する必要があります(図-6)。



図-6 活荷重による解析結果

活荷重の妥当性評価は,MAX時には正の曲げモーメントのみが発生し,MIN時には負の曲げモーメントのみ発 生していることと,MAX時では支間中央,MIN時では中 間支点で曲げモーメントが卓越していることを確認しま す。

4.3 クリープ

コンクリートがもつ特有の性質で,一定な持続荷重(自 重・橋面荷重・プレストレス・乾燥収縮)のもとで,時間 の経過とともにおきる塑性変形(部材に作用している荷重 を撤去しても完全に元に戻らない変形)のことです。一定



図-7 クリープによる解析結果

の持続荷重のもとで、変形が大きくなっていきますが、永 遠に大きくなっていくことはなく、ある程度時間が経過す ると変形量が一定量となります。クリープ断面力は、架設 中の構造系と架設後の構造系に変化がある場合、クリープ 変形が拘束されることにより発生します。一括架設のよう に、構造に変化がない場合には、クリープ断面力は発生し ません。クリープ係数とは、弾性変形に対するクリープ変 形量の比率で、道示に基づき算出します(図-7)。

クリープの妥当性評価は,一般的に死荷重と同様の変位 形状であることを確認します。

4.4 乾燥収縮

コンクリートが外気にさらされることによって乾燥して 水分が抜け、時間の経過とともに縮むものと、セメントの 水和により、コンクリート中の水分が消費することによっ て生じる自己収縮のことです。コンクリートの打設日、乾 燥収縮度算出日、コンクリートの温度、環境条件より道示 に基づき乾燥収縮度を算出します(図-8)。



図-8 乾燥収縮による解析結果

乾燥収縮の妥当性評価は,桁の変位が縮んでいること, 軸力は引張(収縮を変形拘束するため)となることを確認 します。

4.5 プレストレス

PC 鋼材を緊張しコンクリートに圧縮力を与えることで す。コンクリートに作用する引張力に対し、プレストレス は有効に作用するので、支点上では上縁、支間中央では下 縁に配置します。本数の決定方法については、5.1(1)~ (4)を参照してください(図-9)。



プレストレス力は,各種要因により,時間とともに減少 していきます。そのため,解析上はプレストレッシング直 後のプレストレス力と,有効プレストレス力に分けられま す。プレストレッシング直後のプレストレスは、初期緊張 力からコンクリートの弾性変形、セット量と摩擦による減 少量を考慮したプレストレス力で、架設時の照査に用いら れます。有効プレストレス力で、架設時の照査に用いら れます。有効プレストレスは、コンクリートのクリープ、 乾燥収縮、PC 鋼材のリラクセーションによる減少量を考 慮した最終段階のプレストレス力です。この断面力をプレ ストレス1次力といいます。不静定構造物に上述のプレス トレス1次力(軸力・偏心モーメント)を載荷すること で、その変形を拘束するような断面力が発生します。この 断面力をプレストレス2次力といいます。単純桁のような 静定構造物の場合、この断面力は生じません。なお、断面 力図は2次力のみの値を図示し、曲げ応力度図は1次力+ 2次力の値を図示しています(図-10)。



図 - 10 プレストレスによる解析結果

プレストレス力の妥当性評価は,中間支点上縁と支間中 央下縁の曲げ圧縮応力度が死荷重で発生する応力度を打ち 消していることで確認します。

4.6 温度変化

コンクリート構造全体の温度変化を考慮する場合の温度 昇降は、一般に±15℃とします。コンクリート部材に温 度変化が生じ、これによる変形が拘束される場合には、不 静定力が発生するので、この影響を考慮します(図 -11)。



図 - 11 温度変化による解析結果

温度変化の妥当性評価は、桁の変位が、+15℃では伸び、-15℃では縮んでいることで確認します。

4.7 温 度 差

直射日光による影響を考慮したもので、床版とその他の 部材の相対的な温度差は5℃を標準としています。直射日 光などの影響を受ける床版の図心が荷重作用位置になるの で、荷重は軸力と偏心モーメントとなります(図 - 12, 13)。



図 - 12 温度差による曲げ応力度



図 - 13 温度差による解析結果

温度差の妥当性評価は,支間中央下縁に曲げ引張応力度 が発生していることで確認します。

5. 部材の照査

照査には,設計荷重作用時の照査と終局荷重作用時の照 査があります。

設計荷重作用時の照査は,実際に載荷される荷重の組合 せの最大・最小値に対して部材が安全であることを確認し ます。照査項目には,曲げ応力度照査,PC 鋼材応力度照 査,斜引張応力度照査などがあります。

終局荷重作用時の照査は,実際に載荷される荷重を割増 して,コンクリートが破壊しないことを確認します。

以下の各応力度図の許容値は $\sigma ck = 40[N/mm^2]$ のときを示します。

5.1 曲げ応力度の照査

コンクリートに発生する応力度が許容応力度以内である ことを照査します。許容応力度は、コンクリートの設計基 準強度より決まり、組合せによって割増係数を考慮しま す。照査は、架設時、死荷重時、設計荷重作用時、温度荷 重作用時について行います。

(1) 架 設 時

架設時の照査は, 張出し架設時の各ブロックのコンクリ ート打設直後, PC 鋼材を緊張する前の片持ち状態で, 架 設機材荷重(特殊荷重)を考慮して行います。これは中間 支点付近の上縁にもっとも不利な引張応力度が発生する状 態です(図-14)。



死荷重の中間支点上縁の曲げ引張応力度が引張許容値を 満たすような内ケーブル(張出しケーブル)本数を配置し ます。

(2) 死荷重時(クリープ終了時)

死荷重時の照査は、橋梁が完成しクリープおよび乾燥収 縮が終了した状態で行います(図-15)。



図 - 15 クリープ終了時の合成曲げ応力度

支間中央下縁に曲げ引張応力度が引張を発生させないような外ケーブル本数を配置します。

(3) 設計荷重作用時

設計荷重作用時の照査は、クリープ終了時の死荷重(D) と活荷重(L)を組み合わせた状態で行います。活荷重に は軸力、曲げモーメント、せん断力、それぞれに最大値・ 最小値があり、各断面力に対する組合せはD+L(MAX)、 D+L(MIN)となります(図 - 16)。



図 - 16 設計荷重時の合成曲げ応力度

主桁閉合時に外ケーブルを用いる場合は,中間支点上縁の曲げ引張応力度と支間中央下縁の曲げ引張応力度が引張 許容値を満たすような外ケーブル本数を配置します。なお,一般的に中間支点上縁は,引張を発生させません。

(4) 温度荷重作用時

温度荷重作用時の照査は,設計荷重作用時での組合せ に,温度変化(T)と温度差(TF)を組み合わせた状態で 行います。組合せは,D+L(MAX)+T(±),D+L (MIN)+T(±),D+L(MAX)+T(±)+TF,D+L (MIN)+T(±)+TFとなります。圧縮許容値は、割増係 数1.15を考慮します。温度荷重作用時の組合せより最大・ 最小を抽出した応力度図を示します(図-17)。

設計荷重作用時と同様に許容応力度を満たすような外ケ



図 - 17 温度時の合成曲げ応力度

ーブルを配置します。一般的に, D + L (MAX) + T (-)
+ TF の組合せにおいて支間中央下縁の引張応力度が厳しくなります。

5.2 PC 鋼材応力度の照査

PC 鋼材応力度がプレストレッシング中, プレストレッシン グ直後, 設計荷重作用時において, 許容引張応力度以下で あることを照査します。ここでは, 一般的に応力度が厳し い設計荷重作用時の応力度図を示します(図 - 18, 19)。





図 - 19 PC 鋼材応力度(外ケーブル)

5.3 斜引張応力度照查

コンクリートに斜めひび割れを生じさせないため,コン クリートの斜引張応力度の照査を行います。斜引張応力度 は、断面内の位置により値が変化しますが、一般的に断面 図心位置とウェブ幅のもっとも薄い位置で照査を行いま す。死荷重時と設計荷重作用時・温度荷重作用時は許容値 が異なるため、それぞれの応力度図を示します。なお、設 計荷重作用時・温度荷重作用時は、組合せのなかからもっ とも厳しい結果を抽出した応力度図です(図-20)。



図 - 20 斜引張応力度

斜引張応力度が満足しない場合は、ウェブ厚を厚くする か、せん断力作用方向の分力を増やすため PC 鋼材配置形 状を変更し許容応力度を満足させます。

5.4 曲げ破壊安全度

終局荷重時組合せの曲げモーメントが破壊抵抗曲げモー メント以下であることを照査します。破壊抵抗曲げモーメ ントは、断面のひずみ分布、コンクリート応力度分布および PC 鋼材の図心の応力度を用いて算出します(図 - 21)。



図 - 21 曲げ破壊安全度

PC 鋼材のみで曲げ破壊安全度が満足できない場合には, 引張鉄筋を配置したり PC 鋼材を増やしたりして対処しま す。

5.5 ウェブ圧壊耐力照査

終局荷重時組合せのせん断力がウェブコンクリートの圧 壊耐力以下であることを照査します(図-22)。



図-22 圧壊耐力

ウェブ圧壊耐力を満足しない場合は、ウェブ厚を厚くす るか、せん断力作用方向の分力を増やすために PC 鋼材配 置形状を変更して耐力を上げます。

5.6 斜引張破壞耐力照查

終局荷重時組合せのせん断力が斜引張破壊耐力以下であることを照査します(図 - 23)。



図 - 23 斜引張破壊耐力

斜引張破壊耐力を満足しない場合は,ウェブ圧壊耐力と 同様の措置か,スターラップ(図-24)の配置鉄筋量を 増やして耐力を上げます。



6. おわりに

今回の講座における解析事例については、設計プログラム(PCBOX-II PC・PRC橋の詳細設計システム(JIP テクノサイエンス(㈱))を用いて作成しましたが、このような設計プログラムを使用することで、断面力や応力度を容易に算出することができます。しかしながら、解析結果を適

切に評価できるようになるためには,解析手法や,荷重の 性質について十分理解しておく必要があります。

今回は2次元の骨組解析について解説しましたが,将来的にはCIM 構想の推進とともに,2次元の設計計算から3次元モデリングシステム(例:BeCIM (JIP テクノサイエンス(株)))を用いて3次元モデルを作成し可視化することで,鉄筋の干渉チェックや鋼材配置など施工および維持管理との連携を行い,適切な設計や施工計画にフィードバックすることも可能となります(図-25~28)。そのなかでも,骨組解析のような基本をしっかり理解しておくことが大切です。今回の講座が,そのためのお役に立てればと思います。



図 - 25 全体 CIM モデル



図 - 26 柱頭部 CIM モデル



図 - 27 細部 CIM モデル

検査孔補強筋

仮固定 PC 鋼棒



図 - 28 CIM モデルによる PC 鋼材と鉄筋の干渉チェック

参考文献

日本道路協会:道路橋示方書・同解説 H24 年 3 月
日本道路協会:道路橋示方書・同解説 H 2 年 2 月

【2014年12月26日受付】