

(59) PCポステンT桁の横倒れ座屈に対する検討および補強方法

㈱安部工業所 技術本部技術部 ○正会員 棚橋 和夫
 同 上 正会員 松山 高広
 同 上 正会員 北園 英明
 同 上 正会員 西尾 浩志

1. はじめに

建設省土木構造物標準設計の改訂により、PCポステンションT桁の断面形状は、ストレート型に変更された。このストレート型のT桁は、同一桁高の従来の断面に比べて架設中の安定性の点ではやや劣り、桁高の高い場合は横方向の座屈に対する検討が必要である。

通常、T桁の架設中の横倒れ座屈に対する安全性の検討は、道路橋施工便覧¹⁾、プレストレストコンクリート²⁾およびPCI Journal³⁾などに検討方法が示されているが、検討方法は統一されていない。また、これらの方法を用いて横倒れ座屈の検討を行うと、支間40m以上では安全性を確保できない場合がある。さらに、安全性確保のための補強および架設が実施されているが、それらについては不明確な点や架設上の問題点が多い。

本論文では上記のことをふまえ、例題として支間48.91mのT桁について道路橋施工便覧¹⁾およびプレストレストコンクリート²⁾に基づき横倒れ座屈の検討を行う。また、安全対策として各種補強方法、架設方法を行った場合の安全性について検討を行い、その場合の不明確な点や問題点を提示することとした。さらに、PC鋼材を用いた補強方法について安全性の検討方法を提案する。

2. T桁の横倒れ座屈に対する安全性の検討

横倒れ座屈に対する安全性の検討方法として、ここでは通常用いられている道路橋施工便覧¹⁾およびプレストレストコンクリート²⁾の方法を用いることとする。その方法を以下に簡単に示す。

2.1 道路橋施工便覧およびプレストレストコンクリートの方法による横倒れ座屈に対する安全率の算出

桁が横倒れ座屈を起こす限界等分布荷重は、桁の横方向曲げ剛度、ねじれ剛度、支持条件、支間長によって次式のように近似的に決まる。また、安全率は次式で求める。

限界等分布荷重：

$$W_{cr} = m \cdot \frac{\sqrt{B \cdot C}}{L_L^3}$$

横倒れ座屈に対する安全率F：

$$F = W_{cr} / W_{do}$$

ここに、

m：桁の支持条件によって求まる定数 L_L：支持支間

B：横方向曲げ剛度 E_c · I_h

C：ねじり剛度 G · J (G = 0.43 E_c)

ここに、

W_{do}：主桁等分布荷重

架設中の安全性については、安全率Fにより表2-1のように示されている。

表2-1 横倒れ座屈に対する安全率

F ≥ 4	架設中常に安全である
4 > F ≥ 2.5	桁の架設中の傾きを想定し、上縁隅に引張応力が発生するようであれば、引張鉄筋等で十分に補強しておく必要がある
F < 2.5	断面性能を改善するかまたは架設中の安全対策を講ずるのがよい。

2.1.1 桁の両端の支持条件がねじりに対して完全固定の場合

桁の両端支持条件がねじりに対して完全固定の場合とは、桁の仮置き状態に相当する。その場合、定数mは表2-2の値を用いる。したがって、桁の仮置き時は、支持条件がねじりに対して固定で鉛直曲げに対し単純支持なので、 $m=28.3$ を用い限界等分布荷重 W_{cr} を求める。

表2-2 ねじりに対して完全固定の場合の定数m

桁の 支 承 条 件	ねじりに対して	固 定	
	横曲げに対して 鉛直曲げに対して	ヒンジ	固定
片持梁		12.8	—
両端単純支持		28.3	50
一端固定・他端単純支持		54	—
両端固定		98	137

2.1.2 桁の両端の支持条件がねじりに対して弾性固定の場合

桁の両端の支持条件がねじりに対して弾性固定の場合とは、図2-1のようにT桁が架設時に両端で吊られているような状態に相当する。この場合、ばね定数 $R_x(=PLe/2)$ より、拘束スプリング定数 $(L \cdot R_x/2C)$ を求めて図2-2から定数mを算出する。

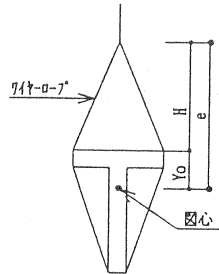


図2-1 両端で吊られたT桁

- $e : =y_0+H$
- y_0 : 桁上縁から図心までの距離
- H : 桁上縁から吊り位置までの距離

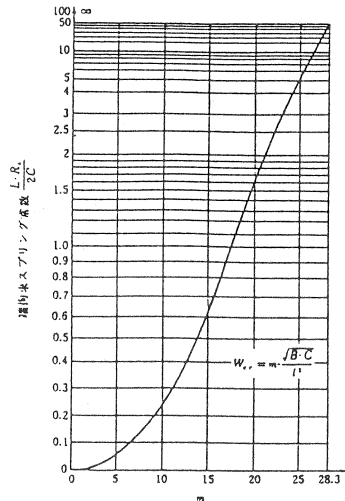


図2-2 拘束スプリング定数と定数mの関係

2.2 横倒れ座屈に対する安全対策

横倒れ座屈に対する安全率が $F < 2.5$ となる場合は断面性能を改善するか安全対策を講じなければならない。横倒れ座屈に対する安全対策は、以下に示す架設方法および補強方法がある。

(架設方法)

- ①桁の支持支間を短くする方法
- ②桁上縁から吊り点までの距離を大きくする方法

(補強方法)

- ③形鋼を上床版に取り付け横方向の剛性を上げる方法
- ④上床版にPC鋼材を張る方法

3. 横倒れ座屈に対する検討例

以下に2.1に示した方法による横倒れ座屈に対する安全性の検討例を示す。

3.1 検討条件

検討例に用いる実際に施工された桁高の高いストレートT桁の断面形状および検討条件を図3-1および表3-1に示す。なお、桁の支持支間は支間長とする。また、ここでは図3-2のような吊り装置を用い架設することとする。表3-1 検討条件

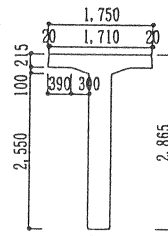


図3-1 断面形状

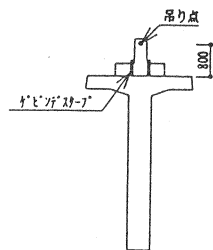


図3-2 吊り装置

桁長(L)	49.810m	桁吊り位置(H)	0.8m
支持支間長(L _s)	48.910m	横断面二次モーメント(I)	0.10655m ⁴
主桁断面積(A)	2.865m	ヤング係数(E _c)	3100000tf/m ²
主桁等分布荷重(W _{do})	3.456tf/m	横曲げ剛度(B)	330305
主桁図心(Y ₀)	1.127m	ねじり剛度(C)	574789

3.2 検討結果

表3-2に横倒れ座屈に対する安全性の検討結果を示す。表3-2 横倒れ座屈の安全性検討の結果

桁両端がねじりに対して固定の場合(桁の仮置き時)は、 $F=9.6 > 4.5$ となり横倒れ座屈に対して十分に安全である。しかし、桁両端がねじりに対して弾性固定の場合(桁両端吊り時)は $F=1.9 < 2.5$ となり、横倒れ座屈に対する安全性は確保されていない。したがって、弾性固定の場合

	桁端固定時 (桁仮置き時)	桁端弾性固定時 (桁両端吊り時)
図心から吊点距離 (e)	—	1.927m
バネ定数 (Rx)	—	165.8tf/m
拘束スプリング定数	—	0.071
m	28.3	5.5
限界等分布荷重 (W_{cr})	33.372 tf/m	6.477 tf/m
安全率 (F)	9.6	1.9

場合は、断面性状を改善するか架設中の安全対策を講じ横倒れ座屈に対する安全性を確保する必要がある。

4. 横倒れ座屈に対する安全対策の検討例

3.2の結果より桁両端がねじりに対して弾性固定の場合は断面性状を改善するか架設中の安全対策を講ずる必要がある。そこで、ここでは2.2に示した①桁の支持支間を短くする方法、②桁の上縁から吊り点までの距離を大きくする方法、③形鋼を上床版に取り付け横方向の剛性を上げる方法で架設または補強した場合の安全性の検討を行う。表4-1に横倒れ座屈に対する安全対策の検討条件を示す。

表4-1 安全対策の検討条件

方法	①支持支間を短縮する	②吊り点を高くする	③形構を上床版に取り付ける
条件	・支持支間を L_L から $L'_L = 0.85L_L$ に短くする。	・吊点の位置を $H=0.8m$ から $3.0m$ に高くする。	・上床版端部に溝形鋼(200*90*14)、ウェブに不等山形鋼(125*75*13)を取り付ける。

4.1 検討結果

表4-2に各種方法で安全対策を行った場合の横倒れ座屈に対する安全性の検討結果を示す。補強前の安全率 $F=1.9$ は①、②、③のそれぞれの方法を行うことにより $F=2.5$ 以上に改善することができた。

表4-2 各種方法の検討結果

	補強前	①	②	③
支持支間 (L_L)	48.91	41.57	48.91	48.91
主桁断面積 (A)	1.382	1.382	1.382	1.382
主桁等分布荷重 (W_{do})	3.456	3.456	3.456	3.578
図心位置 (Y_o)	1.127	1.127	1.127	1.127
吊点高さ (H)	0.8	0.8	3.0	0.8
$e=Y_o+H$	1.927	1.927	4.127	1.927
バネ定数 (Rx)	165.8	165.8	355.2	178.5
拘束スプリング定数 ($L_L \cdot R_x \cdot e/2$)	0.701	0.060	0.151	0.076
横方向断面二次モーメント (I)	0.10655	0.10655	0.10655	0.16745
ヤング係数 (E_c)	3100000	3100000	3100000	3100000
横方向曲げ剛度 (B)	330305	330305	330305	519095
ねじり剛度 (C)	57479	57479	57479	※57479
m	5.5	4.9	7.5	6.1
限界等分布荷重 (W_{cr})	6.477	9.399	8.832	9.006
安全率 (F)	1.9	2.7	2.6	2.5

4.2 各種方法による安全対策の問題点

4.1の結果より各種方法により横倒れ座屈に対する安全性は向上される結果となったが、これらの方法を行う上での問題点や不明確な点も多い。そこで、これらの方法を行う上での問題点や不明確な点を以下に

示す。

4.2.1 支持支間を短くする方法

例題では2.1の検討方法により、支持支間を短くすることで安全性を向上できることが確認できた。支持支間を短くする方法は、他と比較すると簡単な方法であり有効な手段であると考えられる。しかし、この方法では、支持支間を短くした場合の桁内応力の照査を行わなければならない。したがって、支持支間を短くした場合の桁内応力が許容値を満足しない場合は用いることが出来ない。また、ワイヤーを桁に大回しにしてクレーンで架設する場合は、桁がワイヤー内で回転しないような方法を行う必要があるが比較的簡単に有効な方法である。しかし、門構等の架設機材を用いる場合は支持支間を短くするのが困難な場合が多い。

4.2.2 桁上縁から吊り点までの距離を大きくする方法

この方法も安全性を向上できることが2.1の検討方法により確認できた。この方法は、図4-1のようにワイヤーを桁に大回しにしてクレーンで架設する場合は、比較的容易な方法である。また、ワイヤーを用い架設する場合の吊り点の位置については、参考文献¹⁾等で明確に示されている。しかし、図4-2のような吊り装置を用いた場合の吊り点位置は文献等で明確に示されていない。この場合は、桁と一体で剛な金具の吊り位置を吊り点とすることができると考えられる。この考え方が正しいとして数例検討を行うと、吊り点は桁上縁から最低約2~3m程度の高さが必要となる。その場合は、吊り点が3m程度となるような吊り金具を製作し、門構を通常より高くする必要がありコストアップとなる。

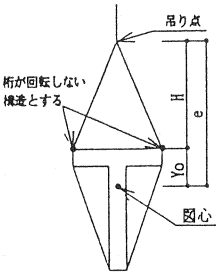


図4-1 ワイヤ架設

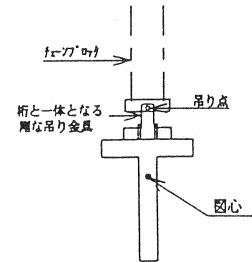


図4-2 吊り装置

4.2.3 形鋼を上床版に取り付け横方向の剛性を上げる工法

例題では上床版およびウェブに形鋼を取り付け横方向曲げ剛度を大きくすることで安全性を向上できることが2.1の方法で確認できた。しかし、この方法は事前に形鋼取付けのためのインサート等の取付けを桁製作時に行わなければならない非常に手間がかかる方法である。また、形鋼は重量物であるため、手作業の取付けは困難である。

5. PC鋼材を用いた補強方法についての安全性の検討方法

参考文献⁴⁾より図5-1のように等曲げを受ける両端単純支持ばりがスパン中央で弾性拘束された場合の座屈強度を図5-2に示す。これは弾性拘束として梁の横たわみを拘束するばね定数 k を有する場合である。実線で示すようにばね定数 k の増加とともに限界座屈モーメントも上昇し、 k がある限界値に達すると、はりはスパン中央で節点を持つ2次モードで座屈する。この様に曲げを受けるはりの座屈荷重は支間中央で弾性拘束することにより大きくなる。PC鋼材で図5-3のように補強したはりは、この様なスパン中央が弾性支持されたはりと考えることができる。しかし、支間中央が弾性支持された曲げを受けるはりの横倒れ座屈荷重を算出する式が明記されておらず、支間中央を弾性支持した場合の座屈荷重を的確に評価することができない。

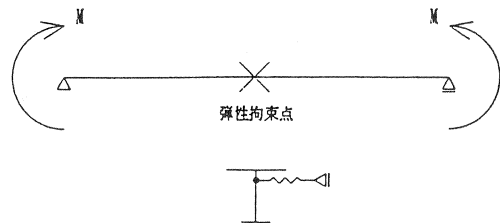


図5-1 弾性拘束された等曲げを受けるはり

そこでPC鋼材を用いた安全対策を行った場合の横倒れ座屈に対する安全性について、上記の考えに基づく安全率算出方法を提案する。桁が図5-1の様に曲げを受けている場合、上フランジには圧縮力が作用する。ウェブのねじれに対する抵抗性を無視すると、圧縮フランジは単独で側方に座屈し、その時の限界荷重は軸力を受ける柱と同様にオイラーの座屈荷重 (P_{ocr}) より求まる⁹⁾。

$$P_{ocr} = \frac{\pi^2 E_c I_r}{l^2} \quad (\text{式5-1})$$

ここに、
 l : 部材長
 I_r : 圧縮フランジの垂直軸まわりの断面2次モーメント
 E_c : コンクリートのヤング係数

また、PC鋼材により支間中央で弾性拘束された圧縮力を受ける上フランジの座屈荷重 (P_{cr}) は、図5-4の様に支間中央が弾性支持された軸力を受ける柱として次のように算出できる⁹⁾。

$$k \geq \frac{16\pi EI}{l^3} \quad \text{の場合}$$

スパン中央で節点を持つ2次モードとしてよい。

$$k < \frac{16\pi EI}{l^3} \quad \text{の場合}$$

座屈荷重は次式の最小根として求まる。

$$\tan \frac{\alpha l}{2} + \frac{\alpha l}{2} \left(\frac{4P_{cr}}{kl} + 1 \right) = 0 \quad (\text{式5-2})$$

ここに、

$$\alpha = \sqrt{\frac{P_{cr}}{EI}}$$

k : ばね定数

これにより支間中央が弾性支持された圧縮力を受ける上フランジの座屈荷重増加率 n を次式で求める。

$$n = \frac{P_{cr}}{P_{ocr}} \quad (\text{式5-3})$$

また、安全対策を行う前の桁の横倒れ座屈に対する限界等分布荷重 (W_{ocr}) を2.1の方法で算出する。図5-3の様にPC鋼材で支間中央が弾性支持された場合の桁の横倒れ座屈に対する限界等分布荷重 (W_{cr}) は、先の曲げによる圧縮を受ける上フランジを軸力を受ける柱として求めた座屈荷重増加率 n を用い次式で算出する。

$$W_{cr} = n \cdot W_{ocr} \quad (\text{式5-4})$$

この様にPC鋼材で支間中央が弾性支持されたT桁の横倒れ座屈に対する限界等分布荷重は、曲げによる圧

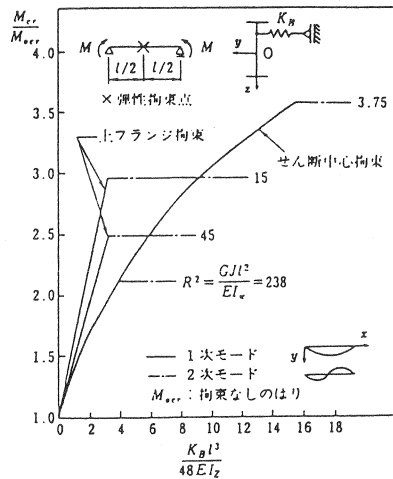


図5-2 sl^2 中央で弾性拘束されたはりの座屈強度

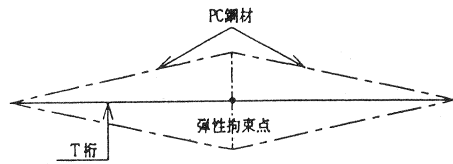


図5-3 PC鋼材で補強されたはり

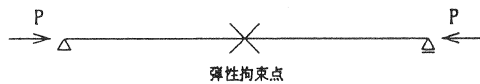


図5-4 弾性拘束された軸力を受ける柱

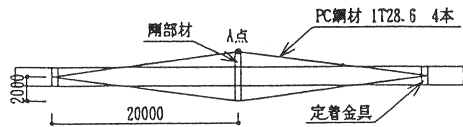


図5-5 PC鋼材を用いた補強

縮を受ける上フランジを軸力を受ける柱として求めた座屈荷重増加率 n を考慮することによって求めることができる。

3. に示した例に対し、図5-5のようにPC鋼材を用いて補強した場合、ここに提案した検討方法を適用した検討結果を表5-1に示す。なお、ばね定数 k は、図5-5中のA点が単位長さ橋軸直角方向に変位したときの、PC鋼材により同方向に作用する力として算出した。

この結果より、補強前の安全率 $F=1.9$ をPC鋼材で補強することにより安全率 $F=2.6$ に改善できた。

また、PC鋼材を用いて補強した場合、ここに提案した方法で横倒れ座屈に対する安全性を安全率で確認できると考える。

6. まとめ

2.1の方法により支間48.91mのT桁の横倒れ座屈に対する安全性の検討を行った。さらに各種補強方法を行った場合の安全性の検討を行い、その問題点および不明確な点を提示した。また、PC鋼材を用いた補強方法について安全性算出方法を提案した。

この方法は、ウェブ等を含んだ桁全体の影響を考慮したものではない。また、補強された桁の横倒れ座屈荷重が座屈理論から得られる基本的座屈荷重であるオイラーの座屈荷重に対する、支間中央が弾性拘束された場合の座屈荷重増加率 n をかけたものとして、桁両端の支持条件も含めて表わせると仮定している。今後はさらに検討を進め、PC鋼材を用いた補強方法のよりの確かな評価法を確立する必要がある。

表5-1 PC鋼材による補強の検討結果

	補強前	PC鋼材補強
P_{ocr} (式5-1)	—	1218.5 tf
k	—	50.4 tf/m
P_{cr} (式5-2)	—	1716 tf
n (式5-3)	—	1.408
W_{ocr}	—	6.477 tf/m
W_{cr} (式5-4)	6.477 tf/m	9.120 tf/m
W_{do}	3.456 tf/m	3.456 tf/m
$F = W_{cr}/W_{ocr}$	1.9	2.6

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：コンクリート道路橋施工便覧，P40～P43，1984.2
- 2) 猪俣俊司：プレキャストPC桁の架設作業時における横方向安定性，プレストレストコンクリート，Vol14，No6
- 3) Arthur R. Anderson：PCI Journal，1971
- 4) (社)土木学会：鋼構造シリーズ2 座屈設計ガイドライン，P119～P120
- 5) 倉西 茂：鋼構造，P66～P70，1974