

PC 斜張橋およびエクストラードーズド橋における主桁断面に関する考察

(株) アンジェロセック 正会員 ○ 緒方純二
九州大学大学院工学研究院 正会員 工博 大塚久哲
(株) アンジェロセック 工修 陳 旭

1. はじめに

エクストラードーズド橋や斜張橋のような吊り形式の橋梁は、主桁を吊り上げる斜材張力を効率良くまたバランス良く主桁断面に伝える主桁形状を設定することが重要である。

本稿では、主桁断面形状の最適化を目的に、箱桁断面の特性をまとめ、最適化に必要な照査項目とその計算手法を検証する。

特に、国内では一般的に照査を行わないプレストレス力の伝達区間の検討が主桁断面の最適化に必要な照査項目であることを検証し、簡易な計算手法も紹介する。

2. 吊り形式と主桁断面形状

斜材吊り形式には1面吊り構造と2面吊り構造があり、それぞれの吊り構造に適した断面形状が考えられる。1面吊り構造と2面吊り構造の選択は多くの場合橋梁幅員構成によるが、1面吊り構造は2面吊り構造に比べ、主桁の見かけのねじり剛性が低下する。中央分離帯が存在する橋梁においても大幅員または小幅員の長支間橋梁の場合は、橋軸直角方向の構造性および耐風安定性の問題で1面吊り構造の選択は困難になる。

これまで、日本において採用されている標準的な主桁断面をまとめると箱桁、翼桁、端桁の3種類に大別できる¹⁾。翼桁構造(2主箱桁)と端桁構造(2主版桁)は2面吊り構造に限定された主桁形状であり、1面吊り構造での適用は難しい。一方、箱桁構造は1面吊りおよび2面吊りともに採用されてきた最も標準的な主桁形状である。

エクストラードーズド橋では鉛直力成分が小さいため斜材定着点に横桁を設けない構造が多いのに対して、国内のほとんどのPC斜張橋は、斜材定着点に横桁を配置し斜材鉛直力を主桁断面内に伝達する構造であり、これら斜材定着点横桁によって、主桁断面・斜材重量および、下部工・基礎工規模が増大することになる。

斜材張力を効率良く主桁に伝達する断面形状を選択することにより、横桁の必要性はなくなり、主桁重量が軽減され、経済的となる。

以上より、箱桁断面の主桁形状を選択するにあたり、横桁を設けない構造にすることは重要なポイントである。

3. トラス箱桁断面の特性

3.1 1面吊り構造における箱桁断面の特性

斜材定着部に横梁(上床版)を有する箱桁形状(図-1)では、横桁を設けない条件下では横梁に大きな曲げモーメントが発生することになる。更に、斜材定着体背面はプレストレス伝達領域であり、プレストレス伝達に伴う局部応力が発生し、密な補強鉄筋を必要とし、施工性等の問題が発生する恐れがある。

一方、トラス箱桁断面(図-2)は、斜材による鉛直力は直接ウェブへの軸力として伝達され床版に局部的な曲げモーメントは発生しない。

また、主桁がウェブで弾性支持されていると考えれば斜材鉛直力による主桁各部材に発生する軸力の釣り合いは図-1,2に示すようになる。

例えば、3室トラス箱桁断面の下床版はウェブの傾斜により引張力が発生するなど箱桁形状とは異なる

ってくる。この引張力は、橋面荷重や主桁自重作用では、圧縮力が作用するため、ウェブの傾斜角度を選択する上で一つのパラメータとなる。

3室トラス箱桁断面は、局部部材曲げモーメントの観点からは、斜材鉛直力を1面吊り構造で支えるには、合理的な構造であるといえる。

本形式については3.3以降に定量評価を行う。

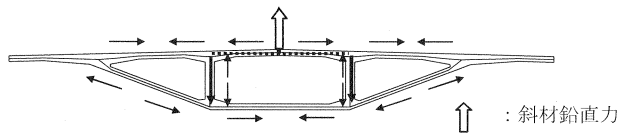


図-1 3室箱桁断面

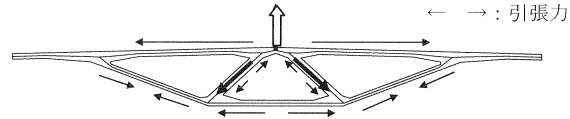


図-2 3室トラス箱桁断面

3.2 2面吊り構造における箱桁断面の特性

1面吊り構造と同様に2面吊り構造で3室箱桁断面と3室トラス箱桁断面の斜材鉛直力に対する特性を考える。

この場合、斜材鉛直力は箱桁の両端部に作用することになる。

斜材鉛直力は上床板のせん断力と外ウェブの軸力、せん断力に分担され伝達されると考えられるため、箱桁端部付近の部材形状が同じである両タイプでは、斜材鉛直力の伝達の面では相違は見られない。(図-3、図-4)

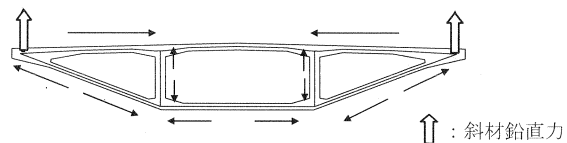


図-3 3室箱桁断面

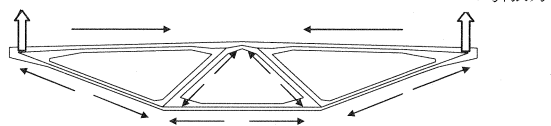


図-4 3室トラス箱桁断面

上床板の支間割の観点からウェブの傾斜を考慮することは考えられるが、2面吊り構造に3室トラス箱桁断面を採用する有効性は斜材鉛直力の伝達の観点からは見出せない。

3.3 1面吊り構造における橋軸直角方向の挙動

ここで、1面吊り構造の橋軸直角方向について検討する。横桁を設けない構造として、2次元フレームモデルに斜材張力による鉛直力を直接載荷する。比較する断面形状は図-5から図-7に示す3ケースとする。

(1) 死荷重状態(斜材張力含む)の曲げモーメント比較

斜材張力鉛直成分を主桁および橋面荷重の死荷重と釣り合わせるものとして、単位m当りの斜材鉛直分力を450kN/mと仮定する。図-8に死荷重と斜材鉛直力による曲げモーメントを示す。

斜材鉛直力によって床板に発生する曲げモーメントは、CASE 1の箱桁断面と比べるとCASE 2のトラス箱桁断面では約30パーセントと極端に小さい。これは、内ウェブが斜材の鉛直力に対して上床版を介さずに直接働いていることを意味し、斜材鉛直力を効率よくウェブに伝達しているためである。

CASE 3の3室トラス箱桁断面は、内ウェブの傾斜をCASE 2に比べて小さくし、斜材定着部の上床版部に短い横梁を持つ構造である。主桁架設に使用するワーゲンの支持構造を考慮した場合、CASE 3断面のような不完全トラス箱桁断面の採用を余儀なくされるケースもある。

CASE 3で得られた曲げモーメント値はCASE 1の3室箱桁断面と同等であるが、この上床版と内ウェブの交差点は、実際には定着ブロック、ハンチなどにより、マッシブな部材で構成されることになり、鉄筋量はCASE 1に比べると少なくなる。CASE 1～CASE 3の曲げモーメントに着目すれば、斜材鉛直力に対す

る最適な断面形状は CASE 2 のような完全トラス箱桁断面である。

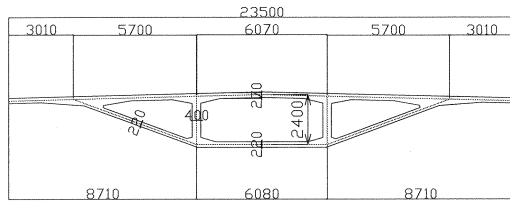


図-5 CASE 1 3室箱桁断面

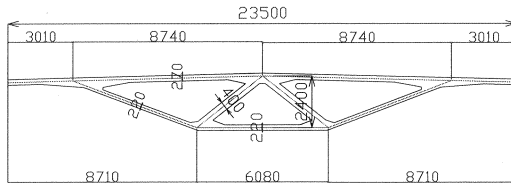


図-6 CASE 2 3室トラス箱桁断面

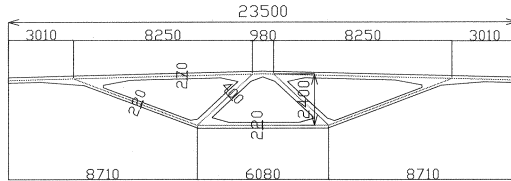


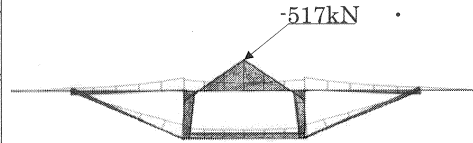
図-7 CASE 3 3室トラス箱桁断面

(2) 活荷重載荷による床版曲げモーメント比較

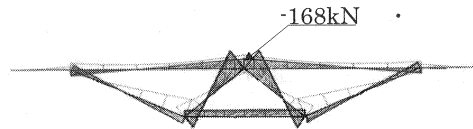
活荷重による床版曲げモーメントは、版理論により求められるものである。ここでは、ウェブと上床版の固定度（ウェブの拘束度）を考慮し、PUCHER の図表²⁾より「2方向単純版」「2方向両端固定版」の2ケースの曲げモーメントを算出し、支点部曲げモーメントと床版支間の中央曲げモーメントの最大値を求める。参考として道路橋示方書にある床版の設計曲げモーメント値も示すがこの値は PUCHER の図表で算出した値より支間、支点のいずれの曲げモーメントとも小さくなっている。図-9 に最大正曲げモーメント算出時の T 荷重載荷状態を示す。

表-1 にまとめた T 荷重による床版曲げモーメントは、図-8 中に示した死荷重・斜材鉛直力による床版曲げモーメントの最大値に比べると小さな値である。1 面吊り断面の橋軸直角方向に着目した場合、床版支間長が多少大きくなっても完全トラス箱桁断面を実現することが断面形状の最適化につながると言える。

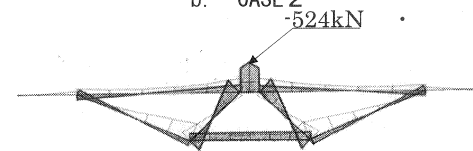
3.4 1 面吊り構造における橋軸方向の挙動



a. CASE 1



b. CASE 2



c. CASE 3

■ : 斜材鉛直力
□ : 死荷重

図-8 死荷重・斜材鉛直力による曲げモーメント

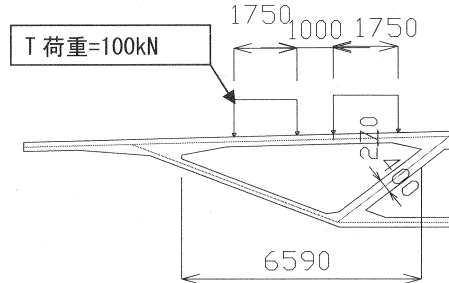


図-9 CASE 3 の T 荷重載荷状態 (最大正曲げモーメント)

表-1 床版曲げモーメント (kN・m / m)

		単純版	両端固定版	道示式
CASE1	支間	64.3	44.5	59.6
	支点	-	-83.4	-74.5
CASE2	支間	83.5	52.4	89.1
	支点	-	-109.1	-111.4
CASE3	支間	81	50.6	84.6
	支点	-	-107.5	-105.8

橋軸方向の解析モデルとして、図-10 に示すエクストラードード橋の最大張出時を検討する。

ここでは、特に各部材でのせん断応力度に着目する。

(1) 各部材でのせん断応力度

断面形状を最適化するためには、断面に発生する応力度を的確に把握し、照査する必要がある。

主桁断面には、死荷重、活荷重、PC鋼材によりせん断応力度が発生する。よって、PC鋼材の配置によっては主桁断面に補強が必要になる。

ここでは、フランスにおいて一般的に実施される照査手法³⁾である、せん断流理論を用いたせん断力分担の計算手法を取り入れ、各部材でのせん断応力度を算出し次項の(2)におけるプレストレスの伝達領域の応力度に重ね合わせる方法を検討する。

各部材のせん断力算出はフランス設備省の道路・高速道路技術研究室 (SETRA) の断面照査プログラム CDS を使用する。

これより図心での単位せん断力に対する各部材の単位m当りのせん断力FZ(表-2)を求め、死荷重と斜材鉛直力による各部材節点(図-11)のせん断応力度を算出する。(表-2)

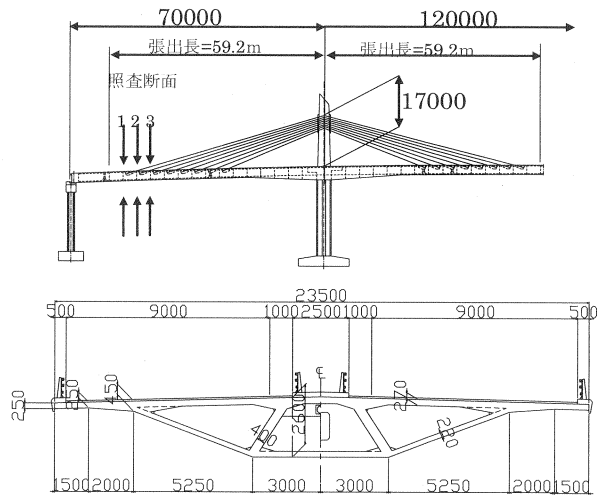


図-10 解析モデル構造図

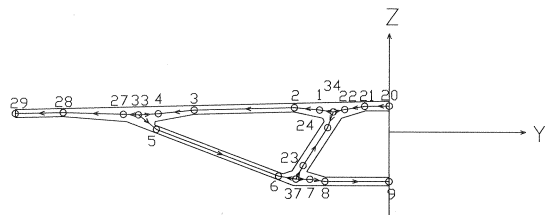


図-11 部材節点

表-2 部材節点ごとのせん断応力度

節点番号	CDS結果 FZ	部材厚 (m)	照査断面 1		照査断面 2		照査断面 3	
			せん断力(kN)	せん断応力度(N/mm ²)	せん断力(kN)	せん断応力度(N/mm ²)	せん断力(kN)	せん断応力度(N/mm ²)
2	0.07554	0.270	1300	0.36	1400	1460	0.41	
3	0.01407	0.271		0.07			0.08	
4	-0.01104	0.446		-0.03			-0.04	
5	-0.09926	0.220		-0.59			-0.66	
6	-0.03838	0.220		-0.23			-0.25	
8	-0.08399	0.265		-0.41			-0.46	
23	0.13606	0.400		0.44			0.50	
24	0.16260	0.400		0.53			0.59	
27	0.05798	0.440		0.17			0.19	

(2) プレストレスの伝達

PC鋼材定着体の背面では、端部表面のすぐ近く、各定着体の背面に発生するかつ裂力等に対しては、応力度の照査を行うとともに補強筋を配置している。

一方、図-12 に示すように斜材を含むPC鋼材定着体の背面は、プレストレスによる応力の調整領域であり、この調整領域とは、主応力度の不連続から連続分布への移行領域である (ナビエの法則)。この調

整領域 SA-SR 間には応力度 τ_x と σ_t が発生する。この応力度は、主方向の設計で得られた応力度と重ねあわせて部材を照査する必要があるが、国内では通常照査されていない。しかし、主桁断面部材の最適化を行うためには必要な照査項目と思われる。

よって、本稿ではフランスのプレストレストコンクリートの示方書 (BPEL) ^{4) 5)} に示されている調整領域 SA-SR 間における照査を適用してみる。

この調整領域内では、全ての部分での断面力の釣合いを保証しなければならない。例えば、図-13 において切断面 BC を持つ ABCD 領域を考えるとこの領域の釣合いは、以下より得られる。

BC 面上の作用力 V_x 、 N_t 、 M_t は、

$$V_x = F_1 \cos \alpha_1 - X, \quad N_t = F_1 \sin \alpha_1 - T$$

$$M_t = F_1 \cos \alpha_1 (t - C_1) - X\alpha + (T - F_1 \sin \alpha_1) e / 2$$

ここで、 $X = \int_{AB} -\sigma (F_j) e' dt$
 $T = \int_{AB} -\tau (F_j) e' dt$

この作用力は、BC 面上の応力を生み出し、次式のように表現される。 $\tau d = 2 V_x / (e' \times e)$

このせん断応力度を (1) で算出した主方向解析結果のせん断応力度と重ね合わせることで最大せん断応力度を算出する。

$$\tau_{max} = \tau d + \tau (\text{主方向})$$

上記の算出式により P C 鋼材および斜材張力によるプレストレスの伝達調整領域の応力度を伝達長間で重ね合わせることで算出したせん断応力度 τ_{max} の結果を表-3 に示す。このプレストレスの伝達に関しては、水平方向と鉛直方向の伝達が考えられる。3室トラス箱桁断面のような断面では、上床版に関し

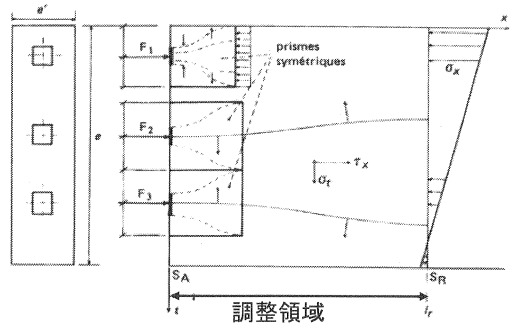


図-12 定着体背面の応力度

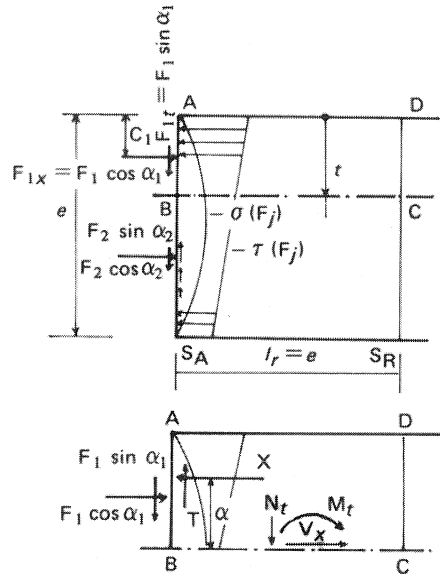


図-13 調整領域の釣合い

表-3 せん断応力度計算結果

	照査断面 1 座標:55.40m 単位: N/mm ²													
	水平伝達							鉛直伝達						
	27	4	3	2	5	6	8	23	24	5	6	8	23	24
架設ケーブル	0.16	-0.45	-0.66	-0.43	-0.06	0.04	-0.02	0.01	0.06	-0.53	0.34	-0.15	0.04	0.50
斜材	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RDM*	0.17	-0.03	0.07	0.36	-0.59	-0.23	-0.41	0.44	0.53	-0.59	-0.23	-0.41	0.44	0.53
合計	0.33	-0.48	-0.59	-0.07	-0.65	-0.19	-0.43	0.45	0.59	-1.12	0.11	-0.56	0.48	1.03

	照査断面 2 座標:51.60m 単位: N/mm ²													
	水平伝達							鉛直伝達						
	27	4	3	2	5	6	8	23	24	5	6	8	23	24
架設ケーブル	0.33	-0.90	-1.32	-0.86	-0.12	0.08	-0.03	0.09	0.11	-0.53	0.34	-0.15	0.04	0.49
斜材	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RDM*	0.18	-0.03	0.07	0.39	-0.63	-0.24	-0.44	0.48	0.57	-0.63	-0.24	-0.44	0.48	0.57
合計	0.51	-0.93	-1.25	-0.47	-0.75	-0.17	-0.48	0.57	0.68	-1.16	0.09	-0.59	0.52	1.06

	照査断面 3 座標:47.80m 単位: N/mm ²													
	水平伝達							鉛直伝達						
	27	4	3	2	5	6	8	23	24	5	6	8	23	24
架設ケーブル	0.65	-1.79	-2.62	-1.70	-0.23	0.15	-0.07	0.02	0.22	-0.52	0.34	-0.15	0.04	0.49
斜材	0.18	0.26	0.33	0.48	0.01	0.12	0.04	0.21	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RDM*	0.19	-0.04	0.08	0.08	-0.66	-0.25	-0.46	0.50	0.59	-0.66	-0.25	-0.46	0.50	0.59
合計	1.02	-1.57	-2.21	-1.14	-0.88	0.02	-0.49	0.73	1.11	-1.18	0.09	-0.61	0.54	1.08

* 主方向解析結果によるせん断応力度

ては水平方向伝達と明確に考慮できるが、外ウェブなどの伝達が水平伝達か鉛直伝達かは明確ではない。よって、外ウェブ、内ウェブ、下床版に関して、水平伝達と鉛直伝達のいずれについても検討する。水平方向の伝達長は橋梁幅員 (23.5m) , 鉛直方向の伝達長は桁高 (2.6m) とした。

表-3 に示めされるように P C 鋼材および斜材の軸方向力の伝達によって主桁部材の上床版、外ウェブ、内ウェブ、下床版の各部材に応力の均衡を保つためのせん断応力度が発生し、特に照査断面 3 における上床版には 2 N/mm^2 をこえる最大応力度が発生している。制限値 3 N/mm^2 (BPEL : $f_{tj}=0.6+0.06\times f_c=3\text{ N/mm}^2$) を考慮すれば決して無視すべき応力度ではない。

P C 鋼材の配置によっては、断面部材にひび割れを誘発するようなせん断応力度が発生することになる。このプレストレス調整領域の検討は、斜材および P C 鋼材の配置と断面形状を最適化するには不可欠な検討であるといえることができる。

4. 3次元モデル (FEM 解析) による検証

前項の調整領域におけるせん断応力度を検証するために、3次元シェルモデルによる有限要素解析を実施した。解析は、59.2m+59.2mの半橋をモデル化して最大張出し時に関する解析を行った結果を前項の結果と合わせて表-4 に示す。

前項の計算と FEM 解析の結果を比較してみると、その差異は照査断面 1-照査断面 2-照査断面 3 の順に大きくなる。これは、前項の計算における伝達長の設定に寄与するものと思われる。各部材、各 P C 鋼材に的確な伝達長を決定する必要があることを示唆している。ただし、応力度の発生レベルを把握する簡易計算としては十分使用性があると考えられる。橋梁計画設計の段階で、前項による計算を実施し、詳細設計時に FEM 解析により照査することが必要であると思われる。

表-4 せん断応力度比較

単位 : N/mm^2

		27 張出床板	4 上床板	3 上床板	2 上床板	5 外ウェブ上	6 外ウェブ下	8 下床板	23 内ウェブ下	24 内ウェブ上
照査断面 1	水平伝達	0.33	-0.48	-0.59	-0.07	-0.65	-0.19	-0.43	0.45	0.59
	鉛直伝達	-	-	-	-	-1.12	0.11	-0.56	0.48	1.03
	FEM結果	1.95	-0.73	-0.84	-0.28	-1.10	-0.18	-0.28	0.41	0.52
照査断面 2	水平伝達	0.51	-0.93	-1.25	-0.47	-0.75	-0.17	-0.48	0.57	0.68
	鉛直伝達	-	-	-	-	-1.16	0.09	-0.59	0.52	1.06
	FEM結果	2.67	-0.52	-0.59	-0.01	-0.92	-0.24	-0.42	0.47	0.63
照査断面 3	水平伝達	1.02	-1.57	-2.21	-1.14	-0.88	0.02	-0.49	0.73	1.11
	鉛直伝達	-	-	-	-	-1.18	0.09	-0.61	0.54	1.08
	FEM結果	-0.17	-0.12	-0.17	0.20	-0.61	-0.12	-0.45	0.59	0.74

5. まとめ

本稿では、吊り構造の箱桁断面としてのトラス箱桁断面の構造合理性を検証するとともに、断面部材の最適化に必要なプレストレスの調整領域におけるせん断応力度の照査に関して検討し、その照査の必要性を提案することができた。

国内の橋梁においても主桁断面の軽量化への関心は高い、しかし、未だ欧州で採用されている主桁断面構成に比べると構造合理性に欠けるものが多く見受けられる。

断面の合理性を見出すには、断面に発生する応力を的確に捉える必要がありその分析が必要であると思われる。そのためにも、まずは簡易な方法で発生する応力を推定し、詳細な FEM 解析による照査というステップが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) PC 斜張橋・エクストラードゾド橋設計施工基準 (案) 平成 12 年 11 月 (社) プレストレストコンクリート技術協会
- 2) Influence Surfaces of Elastic Plates Adolf Pucher 1973
- 3) Calcul des sections Notice d'emploi du programme CDS
- 4) Fascicule No 62 - Titre 1 - Section 2 (BPEL91 revise99) METL
- 5) Guide d'emploi du reglement francais de betonprecontraint aux etats-limite BPEL83 SETRA