

PC橋のせん断設計に関する調査検討

猪熊 康夫*1・本間 淳史*2

1. はじめに

第二東名高速道路の静岡建設局管内約146 kmの区間は、橋梁延長が全体の約1/3に達する構造物比率の高い路線となっているため、橋梁構造物の合理的な設計・施工の実現に向けて研究を進めている。

このような中で新技術・新工法の積極的採用はもちろんのこと、従来の設計手法そのものについても調査研究を行い、合理的な設計体系の確立を目指しているところであり、本稿では、その一つとしてウェブのせん断設計方法について調査検討を行ったので、その内容について研究成果を報告するものである。

わが国における道路橋の設計は、一般に「道路橋示方書」に準拠した許容応力度法によることを基本としており、せん断に対する設計では設計荷重時および終局荷重時に対する検討が規定されている。すなわち設計荷重時において斜引張応力度の検討を行うとともに終局荷重時においてせん断耐力、せん断補強鉄筋に対する検討および平均せん断応力度の最大値に対する検討等を行いウェブ厚が決定されることになる。

一方諸外国の規準等には、わが国と同様に許容応力度法に準拠したものもあるが、強度設計法あるいは限界状態設計法が採用されているもの、供用時における許容応力度に対する制限が用いられないものなどもある。さらに終局時におけるせん断耐力の算定に用いるせん断理論については、「道路橋示方書」が古典的トラス理論を用いた設計体系を基本としているのに対し、修正圧縮場理論を用いた設計体系を導入している規準もあるなど、せん断設計に用いる理論についても各国各規準で一致していないのが実状である。

このように諸外国のせん断設計については、制限値とともに設計思想そのものがわが国のそれと異なっている規準もある。そこで今回、諸外国におけるせん断に対する設計手法の調査を行い、せん断の設計思想および設計手法を整理することで、せん断ひび割れを発生させることなく、更なる合理的な部材設定が可能であるかという点に着目して整理検討を行った。さらに、調査した各国の規準に基づき、モデル橋を想定してせん断に対する試設計等を行っている。

なお本稿においては、道路橋に限定したはり部材のせん断設計について記述している。建築構造物に対するせん断設計、版部材のせん断や押抜きせん断等の設計については今回の調査の対象から除外していることをあらかじめお断りしておく。

2. 調査対象とした規準類

調査対象とした国内および欧米諸国の設計規準類を表-1に示す。調査は、これら設計規準類におけるせん断の設計手法について整理することとした。

2.1 国内における規準類およびせん断に関する規定

表-1に示す国内の設計規準について、せん断に関する規定をまとめたものを表-2に示す。

これら国内における代表的な規準等において、「道路橋示方書」(以下、道示)は許容応力度設計法であることに対して、「コンクリート標準示方書」(以下、標準示方書)および「鉄道構造物等設計標準」は限界状態設計法となっており、設計体系そのものが異なっているが、せん断に対する設計に関しては、いずれも設計荷重時あるいは使用限界状態、および終局荷重時あるいは終局限界状態に対する検討を基本としている点は同じである。

各規準において、いずれの規準も設計荷重時(使用限界状態)において斜引張応力度の検討を行い、終局荷重時(終局限界状態)においてせん断耐力あるいはせん断補強鉄筋の検討とともに平均せん断応力度の最大値もしくは斜め圧縮破壊に対する検討等を行うこととしている。しかしながら、それぞれの照査式や制限値には若干の相違がある。

せん断設計に大きく影響する規定の一つに斜引張応力度の許容値(制限値)があり、この許容値(制限値)の取り方如何によってウェブ厚の増加に伴う死荷重増あるいはせん断鋼材の配置を余儀なくされる。一例としてコンクリートの設計基準強度 $\sigma_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$ の場合、道示では 1.0 N/mm^2 であるのに対して、標準示方書の規定によれば 2.0 N/mm^2 という倍の値になっており、「鉄道構造物等設計標準」も標準示方書とほぼ同じ値であるが、PRC部材においてはさらに大きな値を示している点が最も特筆すべき点であると言える。

せん断ひび割れについては、道示の場合、そもそもせん断ひび割れの発生を許していないため規定はない。一方、

表-1 調査対象とした設計規準類

国名	規準類(発行年)
日本	道路橋示方書(1996)
	土木学会 コンクリート標準示方書(1996)
	鉄道構造物等設計標準(1992)
アメリカ	AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges (1992)
	AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (1998)
フランス	Regle BPEL91 (1992)
ドイツ	DIN 4227 (*)
イギリス	BS5400 (1990)

*DIN4227は部分改訂が重ねられているため、発行年を特定していない。

*1 Yasuo INOKUMA: 日本道路公団 静岡建設局 建設部 構造技術課長

*2 Atsushi HOMMA: 日本道路公団 静岡建設局 建設部 構造技術課長代理

表-2 国内の規準類によるせん断設計手法のまとめ

規 準 類	道路橋示方書	コンクリート標準示方書	鉄道構造物等設計標準	
設 計 法	許容応力度法	限界状態設計法		
供 用 時	斜引張応力度 ($\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$ 相当)	許容応力度 (1.0N/mm^2 相当)	①PC部材の場合 応力度制限値: $0.75f_{td}$ (2.0N/mm^2) ②PRC部材の場合 ——	①PC部材の場合 変動荷重用時の制限値: $0.7f_{td}$ (1.9N/mm^2) ②PRC部材の場合 永久荷重用時の制限値: f_{td} (2.7N/mm^2) 以下とするのがよい。
	せん断ひび割れ	——	①PC部材の場合 ②PRC部材の場合 $V_d \leq 0.7V_{cd}$: 照査不要 $V_d > 0.7V_{cd}$: せん断補強鉄筋の応力度照査 (永久荷重用時, 一般の環境: $\sigma_{wpd} \leq 120\text{N/mm}^2$)	
終 局 時	コンクリートの 受け持つせん断力	$S_c = k \tau_c b d$	$V_{cd} = \beta_a \beta_p \beta_n f_{vcd} b w d / \gamma_b$	
	せん断補強鉄筋の受 け持つせん断力	斜引張鉄筋の必要断 面積	$V_{sd} = A_w f_{wyd} / S_s$ (せん断補強鉄筋の配置角度が 90° の場合)	
	せん断耐力	$A_w = \frac{1.15 S'_h \alpha}{\sigma_s d (\sin \theta + \cos \theta)}$ $\sum S'_h = S_h - S_p - S_c$	設計せん断耐力 $V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{ped}$	
	斜め圧縮破壊耐力, 平均せん断応力度	平均せん断応力度 τ_m (5.2N/mm^2)	設計斜め圧縮破壊耐力 $V_{wcd} = f_{wcd} b w / \gamma_b$	

標準示方書等ではコンクリートのせん断耐力の70%以下の
ときにはせん断ひび割れの照査は不要としているものの、
せん断力はその値を超えた場合に対してひび割れの照査を
行うこととしている。しかしながら現時点では、直接的に
せん断ひび割れ幅の制御を規定するには至っておらず、永
久荷重用時にせん断補強鉄筋に生じる応力度増分を制御
することでひび割れに対する照査としている。

また道示では、終局荷重時の検討において有効高さの変
化の影響(S_h)を考慮することとしているが、設計荷重時す
なわち斜引張応力度の算出に用いるせん断応力度の計算に
おいてはこの影響を考慮していない。これに対して標準示
方書等では、終局限界状態の検討ではこの影響を考慮して
いるが、斜引張応力度の算定時に考慮するかについては触
れていない。

2.2 諸外国における設計規準

(1) アメリカ

アメリカにおける道路橋の設計には、AASHTO
(American Association of State Highway and Transportation
Officials) による以下の2つの規準が用いられているよう
である。

- ① AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges
(以下AASHTO Standard)
- ② AASHTO LRFD Bridge Design Specifications
(以下AASHTO LRFD)

AASHTO Standardは、従来から使用されてきた道路橋に
関する設計規準であり、AASHTO LRFDは1994年に新たに制
定された、部分安全係数法に基づいた新しい設計規準であ
る。このため最近ではAASHTO LRFDに準拠した設計へと移
行してきているようである。

これらに加えて、ブロック施工を行う桁橋(プレキャスト
セグメントを含む)の設計・施工に関する規準として、
AASHTO Standardに準拠したAASHTO Guide Specifications
for Design and Construction of Segmental Concrete Bridges
が運用されている。さらに、カリフォルニア州における

CALTRANSなどに見られるように州独自の設計規準を出し
ているものもあるが、この場合AASHTOにおける規準を基
本としつつも、その州の規準等で特別に言及されている規
定が優先されることとなる。

一方、米国コンクリート工学協会(ACI: American Con
crete Institute) からBuilding Code Requirements for Structural
Concreteが発行されている。これはわが国の標準示方書と同
様、学術研究の成果を指針として反映したものであるが、
より実務的な内容であり、建築構造物の設計規準等として
広く用いられているようである。しかしながら法的な拘束
性はなく、橋梁に関する規準としては前述のAASHTOもし
くは州の規準によっているのが一般的である。

(2) フランス

フランスにおいてコンクリート構造物を設計する場合に
は、以下に示す示方書を使用するのが一般的である。

- ① Regle BPEL91 (プレストレストコンクリート構造対象)
- ② Regles BAEL91 (鉄筋コンクリート構造対象)

本規準は1983年に限界状態設計法によるものが制定さ
れ、1992年に若干の改訂が加えられ現在に至っている。制
定元は、日本の建設省にあたる「Ministre de l'equipement, de
logement, des transports et de l'espace」である。

(3) ドイツ

ドイツにおけるコンクリート橋の上部工に関する主な規
定としては、DIN(ドイツ工業規格)の以下の規準が用いら
れている。

- ① DIN1045: コンクリート構造物の設計・施工
- ② DIN1072: 道路橋の荷重規定
- ③ DIN1075: コンクリート橋の設計・施工指針
- ④ DIN4227: プレストレストコンクリートの設計・施工

これらを含めたDINはドイツにおける国家規格であり、
ドイツ規格協会で作成された規定や規格で構成されてい
る。しかしながらこれらはいずれも法律ではなく、一般の
場合についての指針を示したものとして位置づけられてい
る。したがって、構造物の安全性と使用性能等が保証され

れば、担当建設局の承認によりDINを無視してよい場合がある。また、そのほかにも国や各州および各種団体によってさまざまな特別規格が設けられている。

(4) イギリス

イギリスでは橋梁に関する規準として、一般にBS5400が用いられている。BS5400は、政府関係省庁および学術団体により構成された「鋼およびコンクリート橋梁標準委員会」により作成されたものであり、英国の建築構造物のうち、とくに橋梁の設計および施工に関する規準として位置づけられている。

BS5400はPart 1からPart 10までで構成されており、設計は限界状態設計法により行われ、このうちコンクリート橋の設計に関する規準はPart 4で規定されている。BS5400の構成を以下に示す。

【BS5400の構成】

- Part 1：一般事項
- Part 2：荷重
- Part 3：鋼橋の設計
- Part 4：コンクリート橋の設計
- Part 5：合成橋の設計

Part 6：鋼材料および施工に関する規準

Part 7：コンクリート、鉄筋およびPC鋼材の材料および施工に関する示方書

Part 8：コンクリート、鉄筋およびPC鋼材の材料および施工に関する勧告

Part 9：支 承

Part 10：疲 勞

その他、イギリスにおける鉄筋コンクリート構造およびプレストレストコンクリート構造に適用される規格としてBS8110があるが、これは建築物および構造物における構造コンクリートの使用について勧告するものであり、橋梁に関しては前述のBS5400が優先されることになる。

3. 諸外国の規準類におけるせん断の設計

本章では、欧米諸国における代表的な規準類のうち、PC橋に関する規準を対象として、せん断に対する設計方法の概要を述べる。

ここで、以下に記述する各国の規準類によるせん断設計の一覧を表-3に示しておく。なお表中の設計荷重時あるいは使用限界状態における斜引張応力度の許容値は、 $\sigma_{ck} = 40N/mm^2$

表-3 諸外国の規準類によるせん断設計手法のまとめ

規 準	AASHTO Standard	AASHTO LRFD	BPCL91	DIN4227	BS5400	
国 名	アメリカ	アメリカ	フランス	ドイツ	イギリス	
設 計 法	限界状態設計法	限界状態設計法	限界状態設計法	許容応力度法、強度設計法	限界状態設計法	
供 用 時	斜引張応力度、引張主応力度、圧縮主応力度の検討 ($\sigma_{ck} = 40N/mm^2$ 相当)	—	・引張主応力度の照査 *本文 3.2①,③式参照 ・圧縮主応力度の照査 *本文 3.2②式参照 ただし 1) ウェブ厚はウェブ鋼材のシース径を考慮して低減する 2) 供用時において桁高変化の影響を考慮する	斜引張主応力度の照査 ①フルプレストレスの場合 許容値：(0.9N/mm ²) ②制限プレストレスの場合 許容値：(2.6N/mm ²) 供用時において、桁高変化の影響を考慮してもよい	—	
終 局 時	せん断耐力、せん断応力度の検討	せん断耐力の照査 $\sum \eta_i \gamma_i Q_i \leq \phi R_n = R_r$ $\phi = 0.9$ V_n : the lesser of $V_n = V_c + V_s + V_p$ $V_n = 0.25 f'_c b_o d_o + V_p$ ウェブ厚はウェブ鋼材のシース径を考慮して低減する	せん断耐力の照査 せん断応力度： $\tau_u \leq \tau_{red,u}$ ウェブ厚はウェブ鋼材のシース径を考慮して低減する	せん断耐力の照査	せん断耐力の照査 $V \leq V_c + V_s - 0.4bd_t$	
	コンクリートの受け持つせん断力	V_c : the lesser of (V_{cw} , V_{ci}) ①ウェブせん断ひび割れ断面 $V_{cw} = (3.5 \sqrt{f'_c} + 0.3 f_{pc}) b'd + V_p$ ②曲げせん断ひび割れ断面 $V_{ci} = 0.6 \sqrt{f'_c} b'd + V_d + \frac{M_{cr}}{M_{max}} V_i$	$V_c = 0.083 \beta \sqrt{f'_c} b_o d_o$	$Q = (\text{せん断力}) \times \tan \theta$ ただし、圧縮斜材角度 ①領域 a $\tan \theta = \tan \theta_1 \left(1 - \frac{\Delta \tau}{\tau_u}\right) \geq 0.4$ ②領域 b $\tan \theta = 1 - \frac{\Delta \tau}{\tau_u} \geq 0.4$	V_c : the lesser of (V_{cw} , V_{cr}) ①曲げひび割れが生じない断面 $V_{cw} = 0.67bh \sqrt{f'_c} + f_{sp} f_t$ ②曲げひび割れが生じる断面 (1) Class 1, 2 部材 $V_{cr} = 0.037bh \sqrt{f_{cu}} + \frac{M_{cr}}{M} V$ (2) Class 3 部材 $V_{cr} = \left(1 - 0.55 \frac{f_{pc}}{f_{pu}}\right) v_c bd + M_o \frac{V}{M}$	
	せん断補強鉄筋の受け持つせん断力	$\frac{A_s}{s} \geq \frac{V_u / \phi - V_c}{f_y d}$	$V_s = \frac{A_s f_y d_o (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha}{s}$	コンクリートおよびせん断補強鉄筋の受け持つせん断応力度 $\tau_{red,u} = \left\{ \frac{A_s f_y}{b_n \cdot s f \cdot \gamma_s} \right\} \left\{ \frac{\sin(\alpha + \beta_u)}{\sin \beta_u} \right\} + \frac{f_{ty}}{3}$	(DIN1045) $A_s = \frac{Q \cdot s}{z \cdot \sin \beta \cdot (\cot \theta + \cot \beta) \cdot \sigma_s}$	$\frac{A_{sv}}{s_v} = \frac{V + 0.4bd_t - V_c}{0.87 f_{yv} d_t}$
	最大せん断応力度、主圧縮応力度の検討	—	—	$\tau_{red,u} \leq \frac{0.85 \cdot f_{cj} \cdot \sin 2\beta_u}{3 \cdot \gamma_b}$	主圧縮応力度、最大せん断応力度の照査 *表-6 参照	せん断応力度の最大値の照査 *表-9 参照

mm²に対するものを記している。

3.1 AASHTOにおけるせん断設計

(1) AASHTO Standard

AASHTO Standardにおけるせん断設計の基本式は以下のとおりである。

$$V_u \leq \phi (V_c + V_s)$$

ここに V_u : 終局荷重時のせん断力

V_c : コンクリートの見かけのせん断強度

V_s : ウェブ鋼材の見かけのせん断強度

ϕ : 強度低減係数(せん断の場合 $\phi = 0.85$)

AASHTO Standardにおけるせん断に対する設計手順は図-1のように表現できる。AASHTO Standardでは、せん断に対する設計は終局限界状態における規定が記されているのみであり、使用限界状態に対する検討項目はとくに規定されていない。

終局限界状態におけるせん断の設計は、作用せん断力に対してせん断耐力を検討することを基本としており、せん断耐力はコンクリートとせん断鋼材がそれぞれ負担できるせん断力の合計に強度低減係数を乗じたものとして算出される。ここで、コンクリートが負担できるせん断力の算出には、古典トラス理論に基づいたACIの経験式が用いられている。

(2) AASHTO LRFD

AASHTO LRFDにおけるせん断設計の基本式は以下のとおりである。

$$\sum \gamma_i \gamma_i Q_i \leq \phi R_n = R_r$$

ここに γ_i : 荷重係数

ϕ : 抵抗係数

γ_i : 荷重修正係数

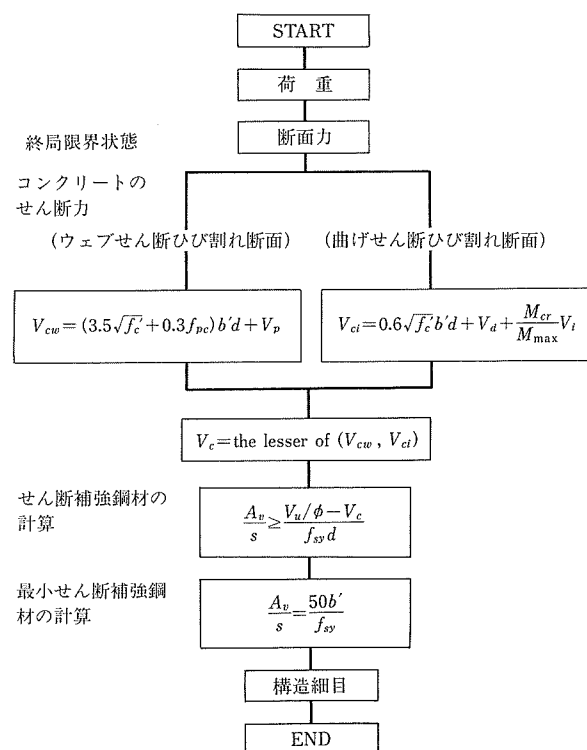


図-1 AASHTO Standardにおけるせん断設計フロー

Q_i : 荷重による断面力, 応力

R_n : 見かけの耐力

R_r : 抵抗係数倍された耐力 (= ϕR_n)

AASHTO LRFDにおけるせん断に対する設計手順を図-2に示す。AASHTO LRFDにおいてもAASHTO Standardと同様、せん断に対する設計は終局限界状態における規定が記されているのみであり、使用限界状態に対する検討項目はとくに規定されていない。

終局限界状態におけるせん断の設計は、AASHTO Standardと同様に作用せん断力に対してせん断耐力を検討することを基本としており、せん断耐力はコンクリートとせん断鋼材がそれぞれ負担できるせん断力の合計に抵抗低減係数を乗じたものとして算出される。しかしながら、その算出方法はAASHTO StandardとAASHTO LRFDで異なる。AASHTO Standardでは、コンクリートが負担できるせん断力の算出には古典トラス理論に基づいた方法が採られているが、AASHTO LRFDでは修正圧縮場理論に基づくせん断耐力算定方法が用いられており、適用しているせん断理論そのものが異なっている。

修正圧縮場理論によるせん断の設計では、力の釣合条件

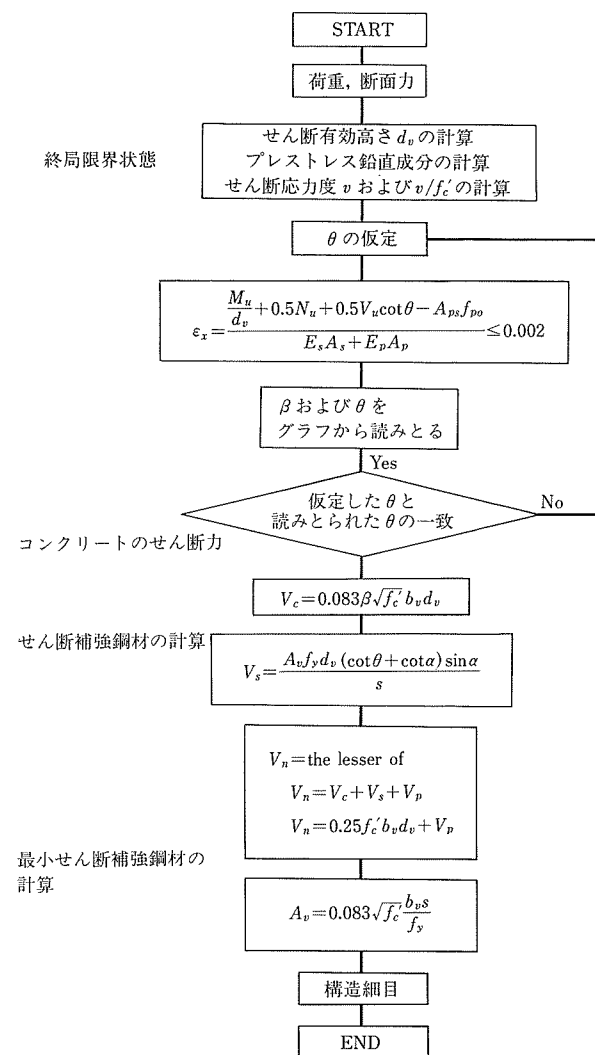


図-2 AASHTO LRFDにおけるせん断設計フロー

とともに適合条件および鉄筋と斜めひび割れを生じているコンクリートの応力-ひずみ関係を用いて斜め圧縮角度を求めているのが特徴的である。

なおAASHTO LRFDではせん断耐力の算出に用いるウェブ厚として、同一平面でのグラウトされていないシース径の総和、もしくはグラウトされたダクト径の半分の総和をウェブ厚から控除したものをウェブの有効幅としている。

3.2 BPEL91におけるせん断設計

BPEL91ではせん断に対する設計は限界状態設計法に基づき、使用限界状態および終局限界状態について検討を行う。

まず使用限界状態では、モールの応力円から導かれた以下に示す両式を満足することを基本としている。すなわち、

$$\tau^2 - \sigma_x \sigma_t \leq 0.4 f_{ij} \{ f_{ij} + 2(\sigma_x + \sigma_t)/3 \} \dots\dots\dots ①$$

$$\tau^2 - \sigma_x \sigma_t \leq 2(0.6 f_{cj} - \sigma_x - \sigma_t) \{ f_{ij} + 2(\sigma_x + \sigma_t)/3 \} f_{ij} / f_{cj} \dots\dots\dots ②$$

- ここに、 τ : コンクリートに対するせん断応力度
- σ_x : 斜引張応力度算出位置における軸方向応力度とせん断鋼棒のプレストレス力によって生じる軸方向応力度の合成応力度
- σ_t : せん断鋼棒のプレストレス力によって生じる鉛直方向応力度
- f_{cj} : コンクリートの圧縮強度
- f_{ij} : コンクリートの引張強度(=0.6+0.06 f_{cj})

①式は引張主応力に対する照査式、②式は圧縮主応力に対する照査式となっている。ここに、 $\sigma_x < 0$ の場合①式は次式に置き換えられる。

$$\tau^2 \leq 0.4 f_{ij} (f_{ij} + 2 \sigma_t / 3) \dots\dots\dots ③$$

なお本照査式では、使用限界状態における作用せん断力にプレストレスによる逆方向せん断力および桁高変化の影響によるせん断力が考慮されていることが特徴的である。このため桁高変化のある構造形式ではこの影響によりせん断力が見かけ上低減されることとなる。わが国の道示では、終局荷重時の検討ではこの影響が加えられているが、設計荷重時の検討ではこの影響は考慮されていない。

またBPEL91では、応力度算出に用いるウェブ厚の取り方について、同一平面に配置されたウェブ鋼材のシース外径の総和の1/2をウェブ厚から控除したものをせん断検討用のウェブ厚としていることも特徴的である。

終局限界状態では、コンクリートおよびせん断鋼材が負担するせん断力より求めたせん断耐力を検討することでせん断補強鋼材量を算出し、さらに最小鉄筋量およびコンクリートに対するせん断応力度について検討を行っている。

3.3 DIN4227におけるせん断設計

DIN4227におけるせん断に対する設計は、許容応力度法および強度設計法に基づき、使用状態および終局状態について検討を行う。なお、許容応力度はフルプレストレスの場合と制限プレストレスの場合で異なるが、ここではドイツで一般的に使用されていると思われる制限プレストレスについて記述する。

まず使用状態では、斜引張応力度を許容値以下とする許

容応力度法により検討を行う(表-4)。なおDIN4227においてもBPEL91と同様に、使用状態における斜引張応力度の検討において、プレストレスによる逆方向せん断および桁高変化の影響を考慮してもよいことになっている。

一方終局状態では、トラス理論を用いた強度設計法により、圧縮斜材の応力度および引張斜材に対する鉄筋量を検討する。DIN4227における特徴として、せん断領域を「曲げひび割れが発生せずにせん断ひび割れが発生する領域(領域a)」と「曲げひび割れ発生後にせん断ひび割れが発生する領域(領域b)」とに分類し、それぞれに対して異なる検討方法を用いていることが挙げられる。ここに領域aとは、終局状態で縁引張応力度が表-5の値以下となる断面であり、これを超えると領域bとなる。

検討にあたっては、領域a、領域bともに主圧縮応力度の照査を行うが、領域bではさらに最大せん断応力度に対する照査を行っている(表-6)。

また領域a、領域bともに、主引張応力度あるいはせん断応力度が表-7に示す応力度を超える場合、せん断補強鉄筋に対する検討を行うこととしているが、DIN4227では、具体的な鉄筋量の算出方法は明示されておらず、圧縮斜材角度の算出方法も領域aと領域bで若干異なっている。このため実際の鉄筋量の算出に関しては、DIN1045に示される算出方法を使用しているようである。

なお、DINにおけるこれらの検討方法では、プレストレス軸力によるせん断耐力の増加は明記されていない。しかしながらレオンハルト等はこれを考慮するよう提唱しており、実務レベルにおいては考慮されているものと推測される。

3.4 BS5400におけるせん断設計

BS5400におけるせん断に対する設計手順を図-3に示す。BS5400ではせん断に対する設計は、使用限界状態に関する規定がとくに設定されておらず、終局限界状態に対してのみ行われる。

表-4 許容斜引張応力度(制限プレストレスの場合)

(単位: N/mm²)

コンクリート強度	B25	B35	B45	B55
斜引張応力度	1.8	2.2	2.6	3.0

表-5 縁引張応力度の限界値

(単位: N/mm²)

コンクリート強度	B25	B35	B45	B55
縁引張応力度	2.5	2.8	3.2	3.5

表-6 許容主圧縮応力度およびせん断応力度の最大値

(単位: N/mm²)

コンクリート強度	B25	B35	B45	B55	適用
主圧縮応力度	11	16	20	25	領域 a, b
せん断応力度の最大値	5.5	7.0	8.0	9.0	領域 b

表-7 せん断補強が必要でない場合の制限値

(単位: N/mm²)

コンクリート強度	B25	B35	B45	B55	適用
主引張応力度, せん断応力度	1.4	1.8	2.0	2.2	領域 a, b

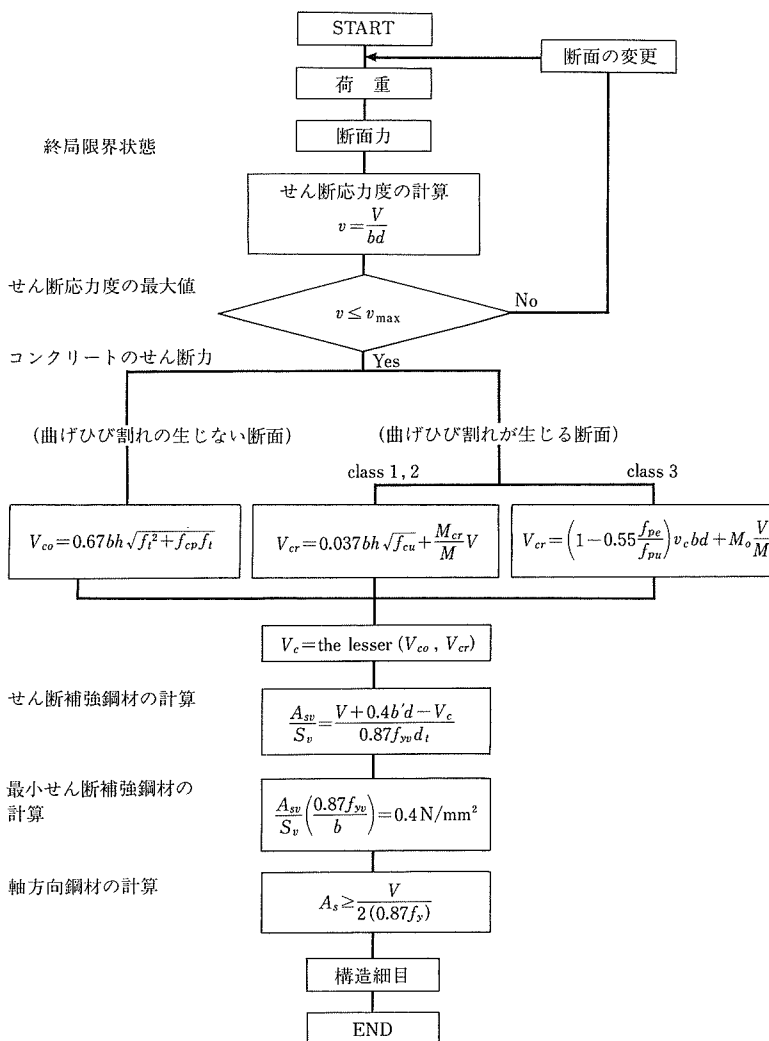


図-3 BS5400におけるせん断設計フロー

終局限界状態における設計は、トラス理論に基づくせん断耐力に対する検討および最大せん断応力度に対する検討を基本としている。せん断耐力の検討では、コンクリートが負担できるせん断力の算出は、AASHTO Standardと同様に以下の手順により行われる。すなわち、「曲げひび割れが生じていない断面におけるコンクリートのせん断耐力」と「曲げひび割れが生じている断面におけるコンクリートのせん断耐力」をそれぞれ算出し、その小さい方をコンクリートが負担できるせん断耐力としている。ただしBS5400ではコンクリート部材の種別は引張応力レベルにより3種類に分類さ

れており(表-8)、「曲げひび割れが生じている断面における終局せん断耐力」は、これらコンクリート部材の種別に応じて異なっている。終局限界状態におけるせん断応力度の最大値を表-9に示す。

4. モデル橋による試算

4.1 せん断に対する比較検討

国内外の規準類に準拠したせん断の設計方法を用いて、モデル橋(支間長85.5mを有するPC多径間連続桁橋、以下A橋とする)に対して試算を行った(図-4)。ここで、前記の規準類のほか、「日本道路公団設計要領」のPRC設計(方法A)についても、参考に加えている。

検討に際しては、荷重および荷重組合せは道示に従うこととし、中間支点近傍のせん断検討位置において、設計荷重時(使用限界状態)および終局荷重時(終局限界状態)についてそれぞれの応力度もしくは耐力を算出した。このとき、各規準による耐力等の評価の違いを比較するために、A橋の部材厚およびせん断補強鉄筋量は一定(D22 ctc125)としている。試算結果を表-10に示す。

表-10より、適用する規準類によって設計荷重時(使用限

表-8 コンクリート部材の種別

部材の種別	引張応力レベル
Class 1 部材	引張応力度なし
Class 2 部材	設計曲げ引張強度以下
Class 3 部材	ひび割れ幅制御

表-9 せん断応力度の最大値

(単位: N/mm²)

コンクリート強度	30	40	50	60以上
せん断応力度の最大値	4.1	4.7	5.3	5.8

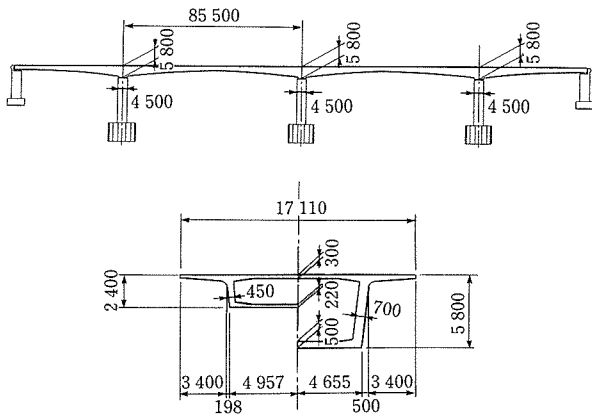


図-4 モデル橋 (A橋) 構造図

界状態)および終局荷重時(終局限界状態)において、作用応力度や断面力に対する具体的な制限値あるいは耐力が大きく異なっていることが分かる。

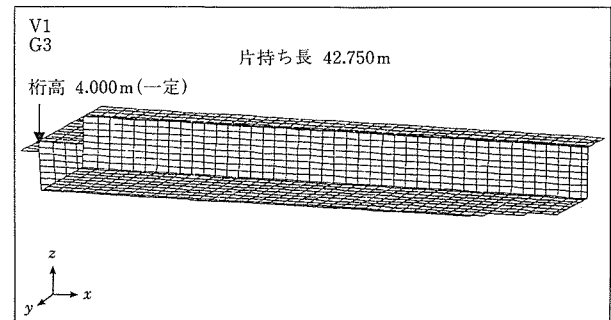
試算の結果、設計荷重時(使用限界状態)の検討において、もともと規定のないAASHTOおよびBS5400はもとより、その他の規準類においても制限値もしくは作用せん断力の算出方法の違い(桁高変化の影響考慮によるせん断力の低減)から、道示のみ許容値を満足していない結果となっている。

また終局荷重時(終局限界状態)では、欧米の規準類によるせん断耐力が日本のそれと比較して数値上大きい結果となっている。これらの結果は、せん断耐力の算定式もしくは設計に用いるせん断理論そのものの違いによるところが大きいと考えられる。わが国のせん断耐力算定式ではプレストレス、軸方向鉄筋、寸法効果等の影響は考慮されているが、AASHTO StandardおよびBS5400と同様、圧縮斜材角度45度の古典トラス理論に準拠した設計手法となっている。これに対してAASHTO LRFD, BPEL91およびDIN4227では耐力算定において、圧縮斜材角度に応じてせん断力の一部が圧縮斜材に負担されることを考慮している。

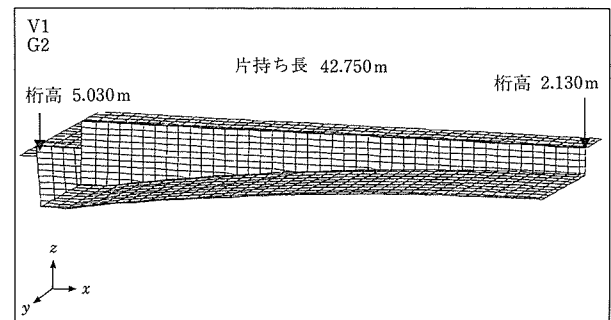
4.2 供用荷重作用時における桁高変化の影響

A橋のように支間にわたり桁高が変化する場合、桁高変化に沿って軸方向応力が流れるために鉛直方向に分力が生じる。道示およびその他わが国の規準等では、終局荷重作用時ではトラス理論に基づいて、この桁高変化の影響が考慮されているものの、設計荷重作用時においてはこの影響を考慮せずに設計を行うことが一般的である。しかしながら諸外国の規準類では、前章で概説したフランスおよびドイツの設計規準に見られるように、設計荷重作用時においてもその影響が考慮されているものもある。

そこでここでは、4.1項で用いたA橋(変断面片持ち梁)と、その断面検討位置の桁高を全支間にわたり一定とした



(1) Model-1: 等桁高モデル



(2) Model-2: 変断面モデル

図-5 比較検討FEM解析モデル

表-10 モデル橋に各規

適用規準類	AASHTO Standard	AASHTO LRFD	BPEL91	DIN4227	
国名	アメリカ	アメリカ	フランス	ドイツ	
設計法	限界状態設計法	限界状態設計法	限界状態設計法	許容応力度法, 強度設計法	
配置せん断鉄筋の仮定				スターラップ D22 ctc125mm	
設計荷重時・使用限界状態	斜引張応力度の照査	—	—	せん断応力度 $\tau = 1.4\text{N/mm}^2$ $\sigma_t = 0, \sigma_x = 5.2\text{N/mm}^2$ ($\tau_a = 2.7\text{N/mm}^2$)	斜引張応力度 $\sigma_y = -0.35\text{N/mm}^2$ (許容値 -2.6N/mm^2)
	永久荷重作用時における斜引張鉄筋の応力度照査	—	—	—	—
(使用限界状態必要斜引張鉄筋)	—	—	—	—	
設計荷重時・使用限界状態	最大せん断応力度, 斜め圧縮破壊耐力	—	—	せん断応力度 2.5N/mm^2 (制限値 3.2N/mm^2)	最大せん断応力度 1.5N/mm^2 (制限値 8.0N/mm^2)
	コンクリートの受け持つせん断力 (kN)	20 751	2 296	4 087	18 709
	斜引張鉄筋の受け持つせん断力 (kN)	16 335	24 248	69 427	22 235
	PC鋼材の鉛直分力 (kN)	—	450	—	500
せん断耐力	せん断耐力合計 (kN)	37 086	26 994	73 514	41 444

等桁高片持ち梁をモデル化して、桁高変化の影響を比較することとした(図-5)。両モデルとも3次元線形シェルモデルによる有限要素解析を行い、設計荷重作用時にウェブに作用する応力度を比較している。なお、着目断面においては、両モデルの桁高などの断面諸元を同一とし、また載荷荷重は支間全体にわたり等分布荷重を載荷した。

図-6は、断面図心位置およびウェブ付け根位置における両者の作用せん断応力度を比較したものである。等桁高モ

デルでは、すべての断面で棒理論によるせん断応力度の計算値がFEM解析値とおおむね一致しているが、変断面モデルの場合、棒解析による計算値は、桁高変化の影響を考慮しない場合に、支点付近の桁高変化部の中立軸から上側においてFEM解析結果よりもせん断応力度を大きく評価していることが分かる。

一方図-7は、変断面モデルの設計荷重時において、桁高変化の影響を考慮した場合としない場合の違いによる斜引

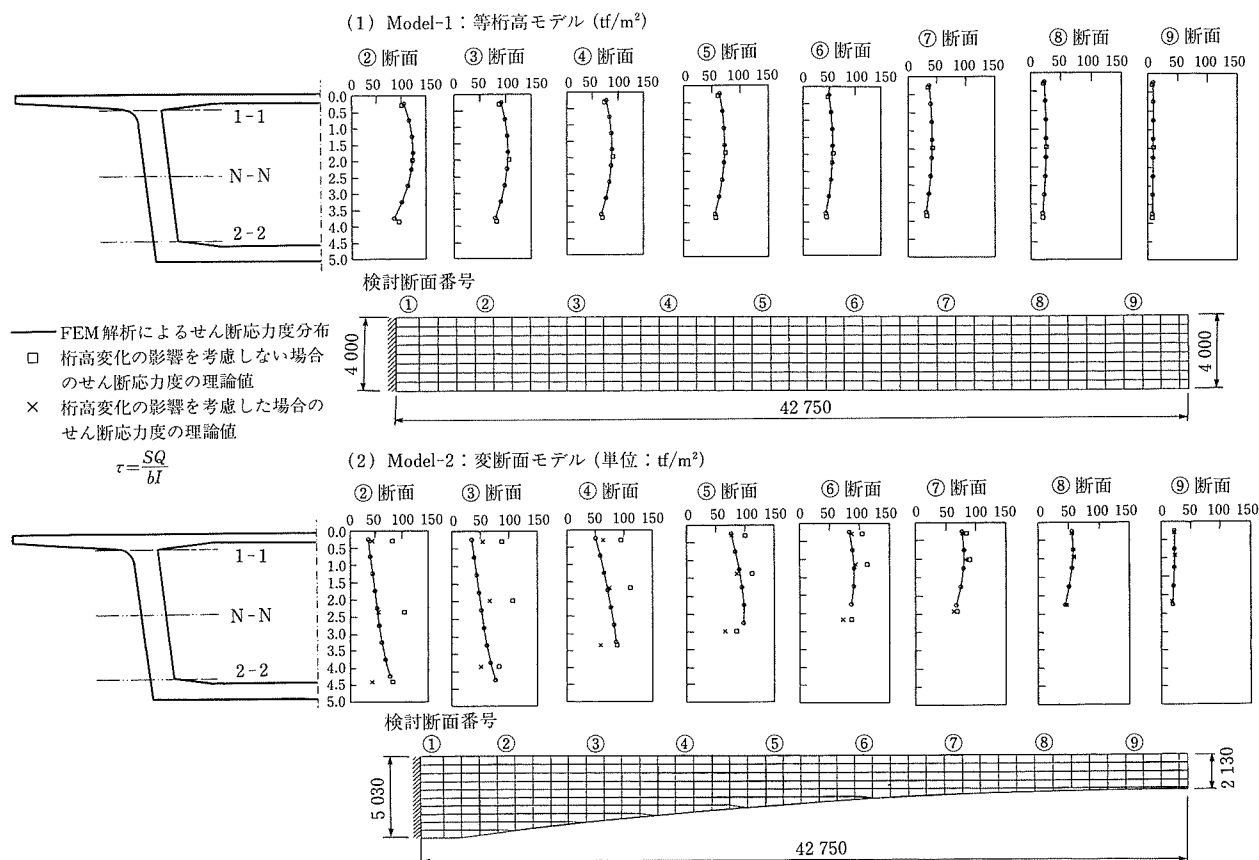


図-6 作用せん断応力度の比較

準類を適用した試算結果

BS5400	道路橋示方書	コンクリート標準示方書(PC)	鉄道設計標準 (PRC)	JH設計要領 (方法A)
イギリス	日本	日本	日本	日本
限界状態設計法	許容応力度法, 強度設計法	限界状態設計法	限界状態設計法	許容応力度法, 強度設計法
1組/ウェブ				
—	斜引張応力度 $\sigma_t = -1.7\text{N/mm}^2$ (許容値 -1.0N/mm^2)	斜引張応力度 $\sigma_t = -1.7\text{N/mm}^2$ (制限値 -2.0N/mm^2)	斜引張応力度 $\sigma_t = -1.7\text{N/mm}^2$ (永久荷重作用時 制限値 -2.7N/mm^2)	仮想斜引張応力度 $\sigma_t = -1.7\text{N/mm}^2$ 制限値 (-2.0N/mm^2)
—	—	—	永久荷重作用時 せん断補強鉄筋応力度 $\sigma_{wpd} = 229\text{N/mm}^2$ (制限値 120N/mm^2)	永久荷重作用時 斜引張鉄筋の応力度 $\sigma_{wpd} = 229\text{N/mm}^2$ (制限値 120N/mm^2)
—	—	—	(D32ctc125mm)	(D32ctc125mm)
最大せん断応力度 3.2N/mm^2 (制限値 4.7N/mm^2)	平均せん断応力度 3.2N/mm^2 (最大値 5.2N/mm^2)	斜め圧縮破壊耐力 36 245kN	斜め圧縮破壊耐力 36 245kN	平均せん断応力度 3.2N/mm^2 (最大値 5.2N/mm^2)
13 901	7 237	4 521	4 521	7 237
16 711	16 711	14 533	14 533	16 711
—	500	500	500	500
36 012	24 448	19 554	19 554	24 448

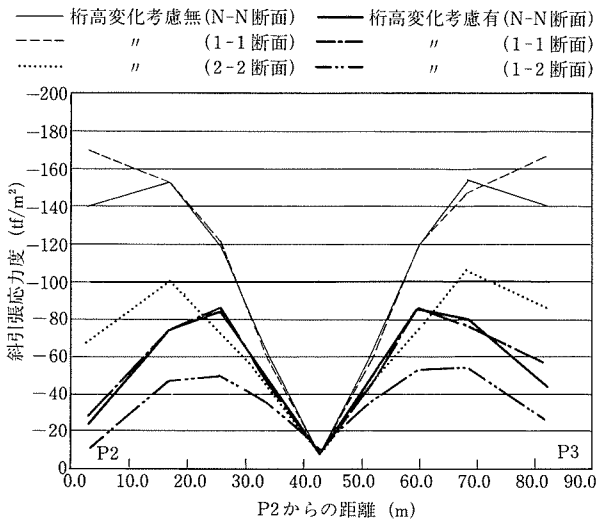


図-7 斜引張応力度の比較

張応力度の算出結果を全支間にわたり示したものである。これによれば、桁高変化の影響を考慮した場合、支点近傍で作用斜引張応力度が大きく低減されており、現在の断面(ウェブ厚)で道示の斜引張応力度の許容値(1.0N/mm²)を満足することが分かる。

5. 設計規準の違いによる影響検討

これまで述べてきた設計規準の違いが橋梁設計に与える影響について検討するために、別のモデル橋(最大支間115mを有するPC3径間連続ラーメン橋、以下B橋とする)に対して、フランスの規準を例に概略の比較検討を行った(図-8)。

検討にあたっては、荷重条件、コンクリートの設計基準強度、移動作業車の能力、および幅員および桁高については同じとし、それ以外はすべてそれぞれの設計規準および計算手法によるものとした。ここで、日本の設計規準による設計とは、道示および日本道路公団設計要領に基づくものであり、基本設計(工事発注設計)レベルである。また道示の設計は許容応力度設計法であるが、フランスは限界状態設計法である。

この検討方法では、制限値や諸係数の違いから一概に比較は難しいが、試設計の結果では、日本の規準ではウェブ厚が支点上100cm、支間中央部55cmとなるのに対して、フランスの設計では55cmで一定となり、その他の部材厚の減少も併せて上部工全体でコンクリート量(m³)が約15%減少した。一方PC鋼材量についても、引張応力の制限値の違いおよび死荷重の軽減から、全体で約10%減の結果となった(ブロック長も伸びたため定着具数も減っている)。

本検討結果はあくまでも参考であるものの、設計規準の違いから、荷重条件や使用材料が同じでも、まったく違った構造物になり得る点で非常に興味深い結果と言えよう。

ここで上記の結果を踏まえて、本稿の趣旨であるせん断設計について、さらに考察を加えることとする。

図-9は、コンクリートの設計基準強度40N/mm²の場合のBPEL91(フランス)および道示における軸圧縮応力度とせん断

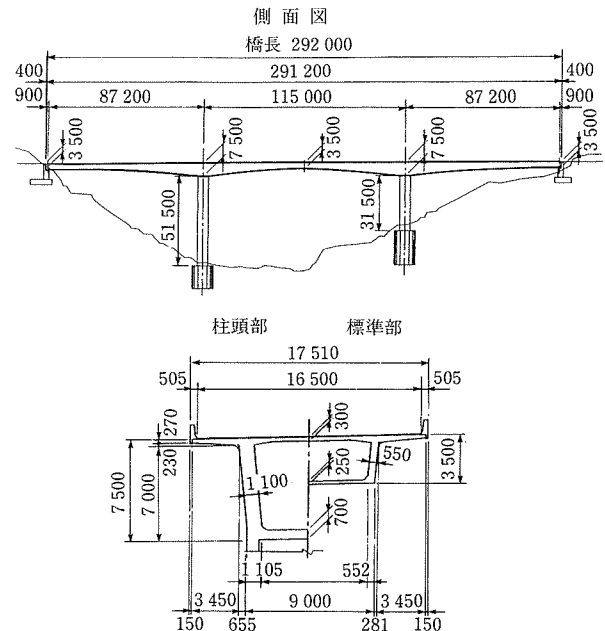


図-8 モデル橋(B橋)構造図

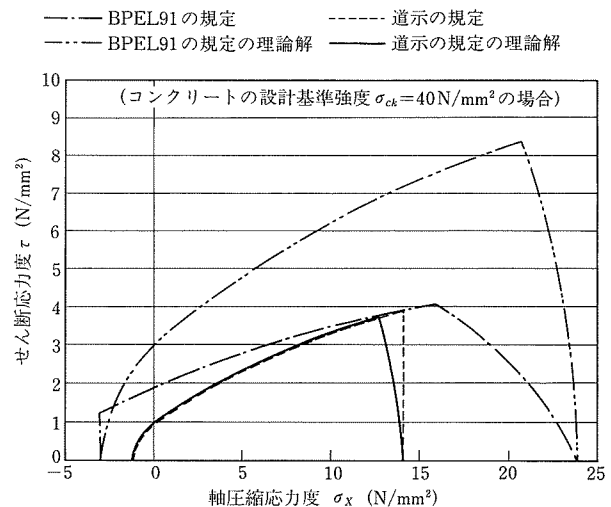


図-9 BPEL91と道示の応力線図比較

断応力度に関する理論値と規定値の応力線図を示したものである。

ここに示す理論値はいずれもモールの応力円に基づくものであるが、道示の場合、理論値と規定値がほぼ一致している。また、軸圧縮応力度 $\sigma_x=0\text{N/mm}^2$ のとき、せん断応力度 $\tau=1.0\text{N/mm}^2$ となっており、これが斜引張応力度の規定値に相当することが分かる。

一方BPEL91の場合、軸圧縮応力度の制限値が道示より大きい($-3.0 \leq \sigma \leq 24.0\text{N/mm}^2$)ため、理論値は大きな円となっているが、規定値は実験結果や経験をもとに安全側の値を採用している。このとき、せん断応力度の制限値は、軸圧縮応力度が道示の最大値となる $\sigma=14.0\text{N/mm}^2$ 付近では、ほぼ道示と同じ値となるが、引張領域では道示より大きな値となっているため、これがせん断設計における大きな違いとなると推察される。

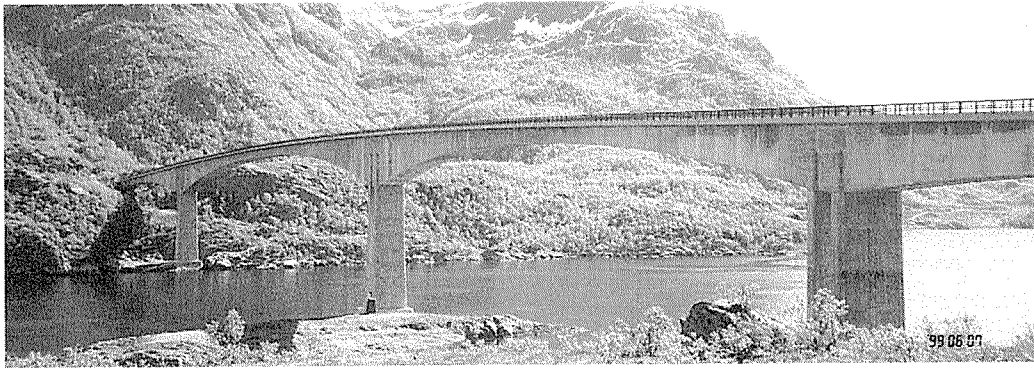


写真-1 ラフトズンド橋

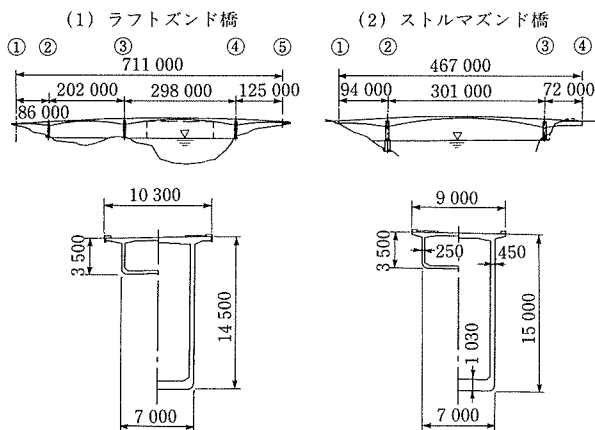


図-10 ラフトズンド橋、ストルマズンド橋構造諸元

6. おわりに

本検討結果より、諸外国のせん断設計については、設計理論および設計に用いる制限値がわが国のそれと異なっている規準類もあり、各規準ごとにその国の研究成果や設計思想に応じて独自の設計体系を構築していることが窺える。

実際にそれを裏付けるかのように、各国で独自の設計体系のもと、特徴ある構造物が建設され注目されている。

写真-1および図-10は、1998年にノルウェーで相次いで建設された、コンクリート桁橋としては世界最大支間 ($L_{max}=301\text{m}$) であるStolmasundet (ストルマズンド) 橋、および第2位の支間長 ($L_{max}=298\text{m}$) であるRaftsundet (ラフトズンド) 橋である。これらはいずれも最大桁高が14mを超えているにもかかわらず、ストルマズンド橋の柱頭部ウェブ厚が450mmと極めて薄い設計となっており、なおかつせん断補強PC鋼材は使用されていない。このノルウェー公共道路局では、過去40年間に100橋以上の片持ち架設によるPC箱桁橋の実績があるが、いずれもせん断PC鋼材を使用していないばかりか、主ケーブルについても上下床版のみでウェブ内にPC鋼材は配置されていないようである。上記2橋が中央径間の一部に軽量コンクリートを使用しているという点を考慮しても、ノルウェーにおけるこれらの実績も興味深い事例として挙げられる。

ところで諸外国の設計手法を調査する場合、とくにその制限値の取り方に関しては、その国の安全率に関する考え

方を踏まえうえて議論する必要がある、そのためには作用断面力の算出に用いる設計荷重についても言及する必要がある。ここに述べた各国の規準や規定は、各国の設計思想、交通事情、社会情勢等の上に独自に成立されたものであることは言うまでもなく、したがって本稿で記した各国の条文、制限値等について、それらを安易に採用することは避けなければならない。また検討を行った試設計についても、あくまで耐力および制限値等を各国の設計規準に準拠して適用した場合の一比較検討であることは、十分ご理解いただきたい。

第二東名高速道路における橋梁の建設は、今後最盛期を迎えることとなるが、完成した構造物そのものでなく、それらの設計施工の過程で得られたさまざまな検討結果や知見も21世紀の財産となるよう努力していく所存である。

最後に、本検討にあたっては(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会の「第二東名神調査委員会」と議論を重ねた。本稿はその成果を反映し取りまとめたものであることを付記しておく。

参考文献

- 1) 第二東名高速道路の橋梁概要—静岡建設局—, プレストレストコンクリート, Vol.41, No.2, pp.19~26, 1999
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編, III コンクリート橋編, 1996
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書, 設計編, 1996
- 4) 運輸省鉄道局: 鉄道構造物等設計標準・同解説, コンクリート構造物, 1992
- 5) American Association of State Highway Transportation Officials: AASHTO Standard Specifications for highway bridges, 15th Ed., 1992
- 6) American Association of State Highway and Transportation Officials: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 2nd Ed., 1998
- 7) American Association of State Highway and Transportation Officials: AASHTO Guide Specifications for Design and Construction of Segmental Concrete Bridges, 2nd Ed., 1999
- 8) American Concrete Institute: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-95) and Commentary (ACI 318R-95), 1995
- 9) Regle BPEL91, Regles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en beton precontraint suivant la methode des etats limites, 1992
- 10) DIN4227
- 11) Brucken aus Stahlbeton und Spannbeton, Beton Kalender, Ernst&Sohn, 1997
- 12) F・レオンハルト: プレストレストコンクリート, レオンハルトのコンクリート講座⑤, 鹿島出版会, 1984
- 13) BS5400, Steel, concrete and composite bridges, 1990
- 14) 土木学会: RC・PC構造物の設計に関する現状と今後の展望, コンクリート技術シリーズ, No. 22, 1997
- 15) ACI-ASCE 445, Shear & Torsion, State of the Art Report, コンクリート構造のせん断設計への新しいアプローチ

◆ 報文 ◆

- 16) 土木学会：鉄筋コンクリート終局強度理論の参考，コンクリートライブラリー第34号，1972
Norway, Structural Engineering International, Vol. 2, pp.96～99, 1999
- 17) フランスの設計基準を用いた橋梁の試設計検討，第23回日本道路会議一般論文集(B)，日本道路協会，1999
19) Ingebrigtsen, T. : Storma Bridge, Norway, Structural Engineering International, Vol. 2, pp. 100～102, 1999
- 18) Fergestad, S., Rambjør, S., K. : Raftsundet Bridge in Lofoten,

【1999年11月16日受付】

◀ 刊行物案内 ▶

PC構造物の耐震設計の現状

— 第27回PC技術講習会 —

(平成11年2月)

頒布価格：5 000円 (送料 500円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会