

外ケーブルを用いたプレキャストセグメント桁のせん断耐力の評価提案式にもとづく試設計

新構造技術㈱	正会員	○若狭 忠雄
九州大学大学院工学研究院	正会員 工博	大塚 久哲
新構造技術㈱	正会員	篠原 輝之

1. はじめに

著者らは、外ケーブルを用いたセグメント桁に関するせん断耐力の検討を行っているが、これまで、中間支点付近を想定したせん断実験を行い外ケーブルと内ケーブル、セグメント桁と場所打ち桁とを比較し¹⁾、これに引き続いて、諸外国のセグメント桁のせん断耐力に関する研究や規準類を整理して実験結果と比較すると共に新たな評価式を提案した²⁾。

本稿では、この評価式等を用いて、全外ケーブルを用いたプレキャストセグメント橋の試設計を行い、せん断耐力に対する評価および対処法について検討した。

2. 既往の研究

我国におけるプレキャストセグメント桁に関するせん断耐力試験としては、伊藤ら³⁾、⁴⁾、西川ら⁵⁾および新津ら⁶⁾の研究がある。しかし、これらの実験は単純桁に対するものであり、連続桁の中間支点付近においては曲げ最大とせん断最大が同時に発生するため、単純桁とは異なった挙動を示すと考えられる。

プレキャストセグメント桁に対するせん断耐力の研究は欧米において活発に行われており、Michel Virlogeux⁷⁾や、Foure Bernard⁸⁾、Joef Eible⁹⁾が種々の実験結果に対する考察を行ない、また、Rombach¹⁰⁾は新しい実験式を提案している。この他、規準類については、国内において道路橋示方書の式¹¹⁾、土木学会の式¹²⁾、外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法設計施工規準(案)¹³⁾などがあり、海外ではAASHTOの式、German規定などがある。

これらの式の特徴については文献²⁾に記したのでここでは、実験値と比較的近似したRombachおよび著者らの提案式を用いて試設計におけるせん断耐力の検討を実施し、改善案を提案する。

3. 実験結果の総括¹⁾

実験概要および実験結果の詳細は文献¹⁾に譲るが、本実験供試体は全てせん断破壊であった。ひび割れ破壊機構は図-1のように考えることができる。同図のA領域は下縁部の圧縮・摩擦による破壊である。一方下縁部のキーおよび下縁部の鉄筋補強が十分であればB領域での破壊となり、このときの破壊耐力は、コンクリートのせん断抵抗+スターラップ(d/2以下)の抵抗となる。どちらで破壊するかは、目地の開き量に影響されると考えられる。

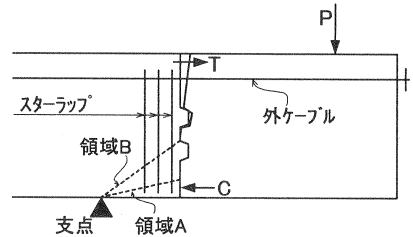


図-1 ひび割れ機構

4. プレキャストセグメント桁のせん断耐力の評価式

プレキャストセグメント桁のせん断耐力の式としては、①土木学会コンクリート標準示方書(設計せん断伝達耐力)、②AASHTO、③German規定、④Rombachの式、⑤外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法規準、⑥著者らの提案式等がある。ここでは、本稿で用いる④と⑥について記す。

(1) Rombachの式

$$V_{dj} = 1 / \gamma_F \cdot (\mu \cdot \sigma_n \cdot A_{joint} + f \cdot f_{ck} \cdot A_{key}) \quad (4.1)$$

ここに、 μ : 摩擦係数=0.65, γ_F : 安全係数=2.0, σ_n : 平均圧縮応力, A_{joint} : コンプレッションゾーンの面積, f_{ck} : コンクリート強度, b : ウェブ幅, f : ジョイントの固有係数=0.14, A_{key} : 破壊面における全てのキーのベースの最小面積

(2) 著者らの提案式

a) A 領域の場合 : $S_A = \mu \cdot \sigma_n \cdot A_c$ ----- (4.2)

ここに, μ : 摩擦係数 = 0.45, σ_n : 終局時の平均圧縮応力(N/mm²), A_c : コンプレッション領域の面積(mm²)

b) B 領域の場合 : $S_B = S_C + S_S \cdot 1/2 \cdot 0.9$ ----- (4.3)

ここに, S_C : コンクリートによるせん断耐力 = $\tau \cdot (h/\sin \theta) \cdot B \cdot \sin \theta = \tau \cdot h \cdot B$,
 h : 下縁からキーまでの高さ, θ : 支点と下段キーを結ぶ線と水平のなす角度, B : ウェブ幅,
 τ : 圧縮応力が作用している場合の抵抗せん断応力(N/mm²) = $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_1 \cdot \sigma_n}$,
 σ_1 : コンクリートの引張強度¹²⁾ = $0.23 f_{ck}^{2/3}$ (N/mm²),
 σ_n : 下段キー位置での圧縮応力度 (N/mm²), S_S : スターラップのせん断耐力,

5. 外ケーブルを使用したプレキャストセグメント橋の試設計

外ケーブルを使用したプレキャストセグメント橋の試設計を行い, Rombach 式および提案式を用いてせん断耐力を算定し, 道路橋示方書¹¹⁾および外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法規準¹²⁾等で設計したものと比較し評価を行う。

5.1 設計条件

設計条件としては下記の通りである。

- 形式 : 5 径間連続 PC 箱桁橋
- 方式 : 全外ケーブル方式スパンバイスパン・セグメント工法
- 支間長 : $L = 46.5 + 3@49.5 + 46.5m$
- 有効幅員 : 14.6m
- 活荷重 : B 活荷重
- 設計基準強度 : $\sigma_{ck} = 40N/mm^2$

検断断面は P2 支点上 (38 断面) とした。38 断面の断面諸元を表-1 に, 支間割りを図-2 に, せん断キー寸法を図-3 に, 外ケーブル配置図を図-4 に, 主桁断面図を図-5 に示す。また, 設計荷重時における 38 断面の断面力は, $M = -19850 kN \cdot m$, $S = 9660 kN$ である。

表-1 38 断面の諸元 (P2 中間支上断面)

H (m)	3.200
Ac (m ²)	9.358
lc (m)	12.649
yc' (m)	1.103
yc (m)	2.097
Zc' (m ³)	11.458
Zc (m ³)	6.032

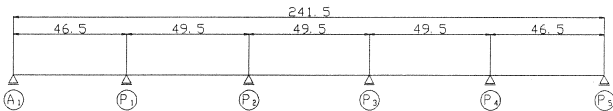


図-2 支間割り

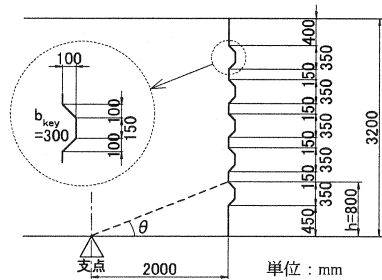


図-3 せん断キー

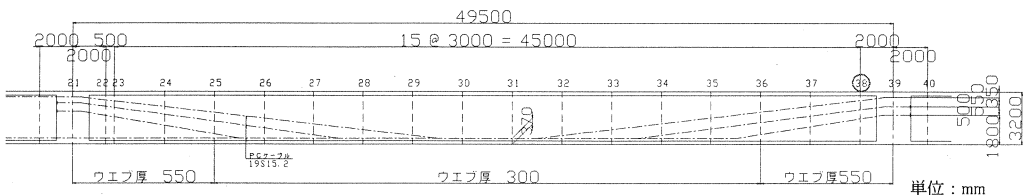


図-4 外ケーブル配置(第2径間)

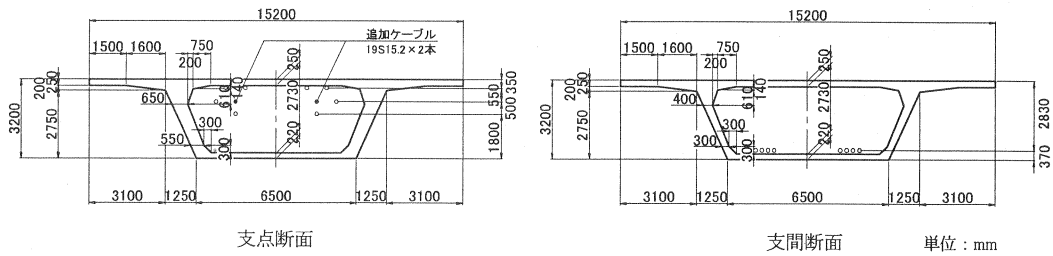


図-5 主桁断面図

5.2 主桁の設計

(1) 設計荷重時の曲げ応力度

a) 曲げ応力度

$$\sigma = -19850/11.458 = -1.73 \text{ N/mm}^2 \quad \text{および} \quad -19850/-6.032 = 3.29 \text{ N/mm}^2$$

b) プレストレス $P = 19S15.2 \times 8 \text{ 本} = 275\text{kN} \times 8 = 2200 \text{ kN}$

$$\sigma = 2200/9.358 + 2200 \times 0.353/11.458 = 3.03 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{および} \quad 2200/9.358 - 2200 \times 0.353/6.032 = 1.06 \text{ N/mm}^2$$

c) 合成応力度

$$\sigma = -1.73 + 3.03 = 1.3 \text{ N/mm}^2 \quad \text{および} \quad 3.29 + 1.06 = 4.35 \text{ N/mm}^2$$

(2) 設計荷重時のせん断応力

支点付近 38 断面のせん断力は, $S = S_h - S_p = 9660 \text{ kN} - 2880 \text{ kN} = 6780\text{kN}$

せん断応力は, $\tau = (S \cdot Q)/(b \cdot I) = (5360 \text{ kN} \times 4.86 \text{ m}^3)/(1.1\text{m} \times 12.649\text{m}^4) = 1.87 \text{ N/mm}^2$

圧縮応力は, $\sigma_c = P/A = 22000/9.358 = 2.35 \text{ N/mm}^2$

斜引張応力度は, $\sigma_1 = 2.35/2 - 1/2 \sqrt{2.35^2 + 4 \times 1.87^2} = -1.03 \text{ N/mm}^2 > -2.0 \text{ N/mm}^2$

(3) 曲げ破壊安全度の検討

38 断面の終局荷重時曲げモーメント = 45114 kN・m となる。

安全度は $S = 70288/45114 = 1.56 > 1.0$

したがって、曲げ破壊に対する安全度は確保されている。

(4) 終局荷重時のせん断耐力

道示の設計方法によるスターラップの検討

$$S_h = S_{h0} - S_p$$

ここに, S_{h0} : 全作用せん断力 = 13020kN, S_p : ケーブルのせん断分力 = 2880kN

$$\therefore S_h = 13020 - 2880 = 10140\text{kN}$$

$$S_c = k \cdot \tau_c \cdot b \cdot d = 2.0 \times 0.55 \times 1100 \times 3000 = 3630\text{kN}$$

$$S_h' = 10140 - 3630 = 6510\text{kN}$$

$$\text{必要スターラップ } A_w = 1.15 \times 6510 \times 125 \times 1000 / (350 \times 3000 \times 4) = 2.228\text{cm}^2 \Rightarrow D19(2.865\text{cm}^2)$$

したがって、道示により設計した場合のスターラップは D19etc125 が必要となる。

5.3 外ケーブルを使用したプレキャストとしてのせん断耐力の計算

(1) Rombach による方法の場合

終局荷重時の曲げ応力度は、

a) 曲げ応力度

$$\sigma = -45114/11.458 = -3.94\text{N/mm}^2 \quad \text{および} \quad -45114/-6.032 = 7.48\text{N/mm}^2$$

b) プレストレス

$$\sigma = 2200/9.358 + 2200 \times 0.353/11.458 = 3.03 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{および} \quad 2200/9.358 - 2200 \times 0.353/6.032 = 1.06 \text{ N/mm}^2$$

c) 合成応力度

$$\sigma = -3.94 + 3.03 = -0.91 \text{ N/mm}^2 \quad \text{および} \quad 7.48 + 1.06 = 8.54 \text{ N/mm}^2$$

目地の抵抗せん断耐力は、

$$V_{dj} = 1 / \gamma (\mu \cdot \sigma_n \cdot A_{\text{joint}} + f \cdot f_{ck} \cdot A_{\text{key}})$$

$$= 1 / 2.0 (0.65 \times 4.270 \times 4209000 + 0.14 \times 40 \times 1050000) = 8781 \text{ kN} < 10140 \text{ kN}$$

したがって、Rombach 式による安全度は $8781 \text{ kN} / 10140 \text{ kN} = 0.87$ となり、せん断耐力が不足することが解る。

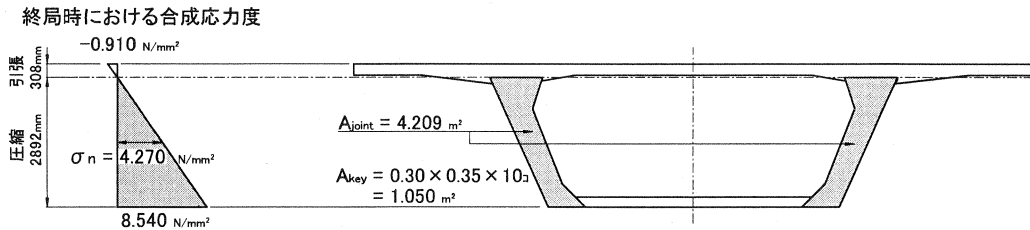


図-6 Rombach 式における σ_n および A_{joint}

(2) 著者らの提案式の場合

- ・領域 A の場合 (下縁の摩擦力のみ)

$$S_A = \mu \cdot \sigma_c \cdot A_c = 0.45 \times 4.270 \times 4209000 = 8088 \text{ kN} < 10140 \text{ kN}$$

終局荷重時のせん断力に対する安全度は $8088 \text{ kN} / 10140 \text{ kN} = 0.80$ となり、せん断耐力が大きく不足することが解る。

- ・領域 B の場合

$$\tau = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_1 \cdot \sigma_n} = \sqrt{2.7^2 + 2.7 \times 6.178} = 4.896 \text{ N/mm}^2, \quad \text{図-3 より } h=800 \text{ mm}$$

$$S_C = \tau \cdot h \cdot B = 4.896 \times 800 \times 1378 = 5397 \text{ kN}$$

$$S_S = 0.45 \cdot A_w \cdot \sigma_{sa} \cdot d / (1.15 \cdot a) = 0.45 \times 2.865 \times 10^{-4} \times 4 \times 35000 \times 3.0 / (1.15 \times 0.125)$$

$$= 3770 \text{ kN}$$

$$\therefore S_B = S_C + S_S = 5397 + 3770 = 9167 \text{ kN} < 10140 \text{ kN}$$

終局荷重時のせん断力に対する安全度は $9167 / 10140 = 0.90$ となり、せん断耐力が不足することが解る。

(3) 外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法規準(案)

同規準(案)では、以下の式で表されている。

$$V = (\tau_c \cdot A_c + V_k) / \gamma_b = (5.881 \times 4209000 + 4200000) / 1.3 = 22271 \text{ kN} > 10140 \text{ kN}$$

ここで、

$$\tau_c = -\mu \cdot f'_{cd}{}^{1/2} \cdot (\sigma_{nd})^{1/2} = 0.45 \times 40^{1/2} \times 4.270^{1/2} = 5.881 \text{ N/mm}^2$$

σ_{nd} : せん断面に垂直に作用する平均応力度, 圧縮の場合 $\sigma_{nd} = -\sigma'_{nd} / 2$

$$A_c = 4.209 \text{ m}^2, \quad \gamma_b = 1.3$$

$$V_k = 0.1 \cdot A_k \cdot f'_c = 0.1 \times 10500000 \times 40 = 4200 \text{ kN}$$

このように、同規準(案)のプレキャストセグメント式によるせん断耐力に対する安全度は、 $22271 \text{ kN} / 10140 \text{ kN} = 2.20$ となりかなり大きい値となるが、文献²⁾に示したように実験結果との比較によると実験値を大きく上回る値を示しており、この式によると危険側の評価になると思われる。したがって、この式は、ひび割れによる開きのない内ケーブルを用いたセグメント桁に対して適用される式と考えられる。

5.4 せん断耐力に対する改善策

以上, Rombach 式, 著者らの提案式により外ケーブルプレキャストセグメント桁としての耐力照査を行うと, せん断破壊が先行することが判った。せん断耐力不足に対して幾つかの方法が考えられるが, ここではプレストレス量を増やす方法により再照査を行う。

(1) Rombach 式による場合

a) 終局荷重時のせん断耐力

改善方法として, 支点付近において PC ケーブルを 2 本増やして 10 本配置とする (図-5 参照のこと)。

$$S_h = S_{h0} - S_p$$

$$S_{h0} = 13020 \text{ kN}, S_p = 3625 \text{ kN} \quad \therefore S_h = 13020 - 3625 = 9395 \text{ kN}$$

b) 終局荷重時の曲げ応力度

$$\sigma = 45114/11.458 = -3.94 \text{ N/mm}^2 \quad \text{および} \quad 45114/6.032 = 7.48 \text{ N/mm}^2$$

c) プレストレス $P = 19S15.2 \times 10 \text{ 本} = 275 \text{ kN} \times 10 = 2750 \text{ kN}$

$$\sigma = 2750/9.358 + 2750 \times 0.203/11.458 = 3.43 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{および} \quad 2750/9.358 - 2750 \times 0.203/6.032 = 2.01 \text{ N/mm}^2$$

d) 合成応力度

$$\sigma = -3.94 + 3.43 = -0.51 \text{ N/mm}^2 \quad \text{および} \quad 7.48 + 2.01 = 9.49 \text{ N/mm}^2$$

目地の抵抗せん断耐力は,

$$V_{dj} = 1/\gamma (\mu \cdot \sigma_n \cdot A_{joint} + f \cdot f_{ck} \cdot A_{key})$$

$$= 1/2.0 \times (0.65 \times 4.750 \times 4734000 + 0.14 \times 40 \times 1050000) = 10248 \text{ kN} > 9395 \text{ kN}$$

したがって, Rombach 式では安全度は $10248 \text{ kN} / 9395 \text{ kN} = 1.09$ となり, せん断耐力が満足することが解る。

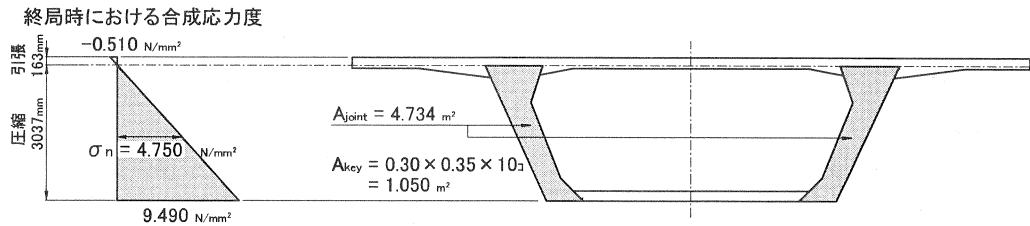


図-7 Rombach 式における σ_n および A_{joint} (プレストレス増加後)

(2) 著者らの提案式の場合

・領域 A の場合 (下縁の摩擦力のみ)

$$S_A = \mu \cdot \sigma_c \cdot A_c = 0.45 \times 4.750 \times 4734000 = 10119 \text{ kN} > 9395 \text{ kN}$$

終局荷重時のせん断力に対する安全度は $10119 \text{ kN} / 9395 \text{ kN} = 1.08$ となり, せん断耐力が満足することが解る。

・領域 B の場合

$$\tau = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_1 \cdot \sigma_n} = \sqrt{2.7^2 + 2.7 \times 6.99} = 5.115 \text{ N/mm}^2, \text{ 図-3 より } h=800 \text{ mm}$$

$$S_C = \tau \cdot h \cdot B = 5.115 \times 800 \times 1378 = 5639 \text{ kN}$$

$$S_S = 0.45 \cdot A_w \cdot \sigma_{st} \cdot d / (1.15 \times a) = 0.45 \times 2.865 \times 10^{-4} \times 4 \times 35000 \times 3.0 / (1.15 \times 0.125) = 3770 \text{ kN}$$

$$\therefore S_B = S_C + S_S = 5639 + 3770 = 9409 \text{ kN} > 9395 \text{ kN}$$

終局荷重時のせん断力に対する安全度は $9409 \text{ kN} / 9395 \text{ kN} = 1.00$ となり, せん断耐力が一応満足する。

このように不足したせん断耐力に対する 1 つの方法として, プレストレスを増加することによりクリアできる。

6. まとめ

6.1 試設計のまとめ

5径間連続PC箱桁橋(全外ケーブル方式スパンバイスパン・セグメント工法 $L=46.5+3@49.2+46.5\text{m}$)について試設計を実施した。この中間支点断面に対して、実験に基づいたRombach式および著者らの提案した支点付近における曲げモーメントによるジョイントの開きを考慮したせん断耐力式により照査を行った。その結果、支点付近目地位置での終局荷重時のせん断力に対する安全度は、 $S=0.80\sim 0.90$ となり、プレキャストセグメント工法の中間支点に対する実験結果を基にした提案式を用いた場合せん断耐力が不足することがわかった。

次に、プレストレス量を増やす方法により再照査を行った。その結果、終局荷重時のせん断力に対する安全度は $S=1.00\sim 1.09$ となった。

6.2 外ケーブルのセグメント桁に対する提案事項

外ケーブルのセグメント桁の場合、支点付近の目地において、せん断耐力が低下すると思われるが、これに対する対処法としては次の様な方法が考えられる。

- 1) 支点付近では、内ケーブルと外ケーブルとを併用する。
- 2) 終局時に支点付近の目地に開きを生じさせないことが重要であり、プレストレス量を多くする方法がある。
- 3) PCケーブルによるせん断分力を増やし、逆せん断を作用させる。
- 4) 目地位置を支点から離すことにより、目地位置のせん断力を下げる。
- 5) 本稿ではせん断耐力不足を補う方法として、プレストレスを増やす方法で対処したが、各構造の条件によって経済性が異なるため、十分な検討が必要であると思われる。

謝辞

本研究を行うにあたり、fib 名誉会長 M.Virlogeux 博士および(株)エスイー森元峯夫博士には貴重な御助言を多々賜った。深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大塚久哲・若狭忠雄他：外ケーブルを用いたプレキャストセグメント桁のせん断耐力に関する実験的研究，プレストレストコンクリート，Vol.45 No. 3, pp. 44-56, Sep. 2003
- 2) 大塚久哲・若狭忠雄・篠原輝之：外ケーブルを用いたプレキャストセグメント桁のせん断耐力の評価に関する研究，第13回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム(投稿中)，2004年10月
- 3) 伊藤忠彦・山口隆裕・池田尚治：プレキャストセグメント構造の終局せん断耐力について，プレストレストコンクリート技術協会 第4回シンポジウム論文集，pp. 45-50, 1994年10月
- 4) 伊藤忠彦・山口隆裕・池田尚治：プレキャストセグメントはりの曲げせん断特性に関する実験的研究，プレストレストコンクリート，Vol. 39, No. 1, pp. 83-96, Jan. 1997
- 5) 西川和廣・廣松新・鈴木素彦・伊藤公彦：外ケーブルを適用したPC桁の曲げ・せん断挙動に関する研究，プレストレストコンクリート，Vol. 42, No. 5, pp. 25-36, Sep. 2000
- 6) 新津正義・睦好宏史・佐野正・殿川康：外ケーブルを用いたRC梁のせん断補強効果に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 21, No. 3, pp. 949-954, 1999
- 7) M. VIRLOGEUX: Shear strength of beams made of precast segments, The French Technology of Prestressed Concrete, Eleventh FIP Congress, Hamburg, 1990
- 8) B. FOURE, L. H. HOANG, Y. BOUAFIA, R. SOUBRET, F. BELALLOUI: Shear strength of externally prestressed beams, Proceedings of the Workshop on Behaviour of External Prestressing in Structures, Saint-Remy-les-Chevreuse, France, June 9-12, 1993
- 9) Jie HUANG and Josef EIBL: Design of segmental bridges under combined bending, shear and torsion FE-study, Proceedings of the Workshop on Behaviour of External Prestressing in Structures, Saint-Remy-les-Chevreuse, France, June 9-12, 1993
- 10) G. ROMBACH, A. SPECKER: Design of joints in segmental hollow box girder bridges, FIB Osaka 2002, Session 2
- 11) 日本道路協会，道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編，2003. 3
- 12) 土木学会，コンクリート標準示方書・構造性能照査編，2002. 3
- 13) プレストレストコンクリート技術協会：外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法設計施工規準(案)，1996. 3