

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

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(株)	正会員		若狭 忠雄
新構造技術(株)	正会員		篠原 輝之

1. はじめに

外ケーブルをプレキャストセグメント橋に初めて応用したのは Jean Muller であり、1980 年初期アフリカの Eugene Figg と共同でフロリダの Long Key 橋に適用し、同橋はプレキャストセグメントによるスパンバイスパン工法で架設された。さらに Seven Mile 橋 (1982 年, 橋長 10.93km), Mid Bay 橋 (1993 年, 橋長 5.87km) 等にもこの工法が採用された。フランスでもほぼ同時期に異なった形式の橋梁で応用され始めた。それ以来、欧米において急速に発展している。近年我が国でも日本道路公団を中心に採用されている。

外ケーブル構造の課題としては、内ケーブルの場合と比較して終局曲げ耐力の低下が挙げられるが、これまで場所打ちコンクリート桁に対しては、曲げおよびせん断耐力に関する実験的研究が活発に行われており、データも蓄積されている。しかし、全外ケーブルを用いたセグメント工法におけるせん断実験例は比較的少なく、特に曲げとせん断が最大となる中間支点付近での実験例は少ない。この支点付近においては垂直面せん断破壊が生じる恐れがあり、せん断耐力が大きく低下することが予想される。

この点に着目し、著者らは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た¹⁾。これに引き続いて本文では、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. 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^{2), 3)}、西川ら⁴⁾および新津ら⁵⁾の研究がある。しかし、これらの実験は単純桁におけるものであり、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の研究は欧米において活発に行われており、本題に関わる既往研究をレビューすると以下のものである。

Michel Virlogeux は、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について先駆的な理論的・実験的研究を行い、1990 年にハンブルグで開催された FIP Congress において、せん断キー形状、終局状態での挙動およびジョイント部を伝達するせん断力について報告している⁶⁾。それによれば、①曲げモーメントおよびせん断が最大となる支点付近において終局時にジョイントが開き、断面の下縁部に圧縮応力が集中し、特にボックス桁では下縁部のノードに圧縮応力が集中し、せん断キーはこのノード部に設置することが重要であること、②せん断力の伝達機構として、ストラット・タイモデルに従えば、スターラップはウェブのせん断力を上方まで伝達できるように配置されるべきであること、が示された。しかし、スターラップがその間に配置できない場合の問題があり、その場合には PC ケーブルの配置を十分に行えば、支点近くのジョイントは閉じ、せん断破壊を防ぐことができることも示されている。

その後、1993 年にフランスで開催された「外ケーブル構造の挙動に関するワークショップ」において以下の論文が発表されている。

- (1) Foure Bernard は文献⁷⁾において、内・外ケーブルにおけるせん断破壊メカニズムを比較する実験結果を発表している。これは場所打ちコンクリートの張出し桁のせん断試験であり、パラメータとしては、内・外ケーブル、ウェブ厚、スターラップ量およびコンクリート強度が考慮されている。内・外ケーブルのせん断耐力

の比較では、外ケーブルの方が10%小さくなっている。

(2) Joef Eible は文献⁸⁾において、曲げ、せん断およびねじりを受ける2径間連続外ケーブルプレキャストセグメント桁に対してFEM非線形ステップ解析(死活荷重の1.0倍から1.75倍まで増加)を実施している。解析結果によると支点近くの開いたジョイントにおいて、下スラブに高い軸圧縮応力とせん断応力が発生し、せん断耐力がクリティカルとなっている。これにより、プレストレスを増加させて支点近くのジョイントの開きを避けるべきであり、また支点近くの断面では、圧縮ゾーンの高さを2/3Hより多く、支間中央では1/3H以上残す必要があるとしている。

また、2002年に大阪で開催されたfib Congressにおいて、Rombach⁹⁾はフルスケールで実験を行って、新しい実験式を提案している。それによれば、せん断キーを有する接合面のせん断耐力は、ジョイントの接触面の摩擦とせん断キーの耐力との和で示されている。

その他、規準類については、国内において道路橋示方書の式¹⁰⁾、土木学会の式¹¹⁾、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)¹²⁾などがある。また、海外ではAASHTOの式、German規定などがある。

以上、プレキャストセグメントのせん断耐力に関する論文、規準等について概要を述べた。これらセグメント桁のせん断耐力式は、著者らの実験値との比較により評価を行うものとする。

3. 実験結果の総括

3.1 供試体実験の概要

本実験に用いた供試体はI型断面のPC桁で、曲げ破壊よりもせん断破壊が先行するよう断面を決定した。せん断耐力の実験として、張出し桁形式を用いて実施した。PCケーブルは、内・外ケーブル共に直線配置とし、載荷時のプレストレス力に関しては全供試体同一のプレストレス力 $P_e=600\text{kN}$ 、偏心量 $e_p=0.235\text{m}$ とした。使用材料、供試体形状・配筋図、載荷方法、測定項目および実験結果の詳細は文献¹⁾を参照されたい。

3.2 ひび割れ荷重およびせん断耐力

実験結果を表-1に示す。本実験は全てせん断破壊の挙動であった。各供試体のひび割れ図については文献¹⁾参照のこと。

表-1 実験結果

	供試体	製作方法	ケーブルの構造	せん断キーの有無	ひび割れ荷重 (kN)		せん断耐力 (kN)
					曲げひび割れ	斜めひび割れ	
①	S-1	場所打ち	内ケーブル	—	250	333	565
②	S-9	セグメント	内ケーブル	キ-2個	245	274	518
③	S-2	場所打ち	外ケーブル	—	260	295	500
④	S-6	セグメント	外ケーブル	キ-2個	250	260	380
⑤	S-7	セグメント	外ケーブル	キ-3個	250	250	340
⑥	S-3	セグメント	内ケーブル	キなし	245	245	340
⑦	S-8	セグメント	外ケーブル	キ-2個、補強	244	244	308
⑧	S-4	セグメント	外ケーブル	キなし	245	245	260
⑨	S-5	セグメント	外ケーブル	キ-3個、補強	176	186	(308)

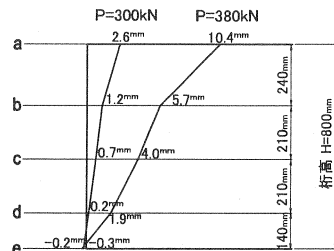


図-1 S-6 供試体目地部の開き量 (セグメント桁、外ケーブル、せん断キ-2個)

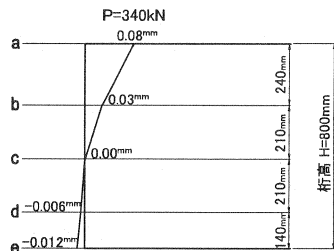


図-2 S-3 供試体目地部の開き量 (セグメント桁、内ケーブル、せん断キなし)

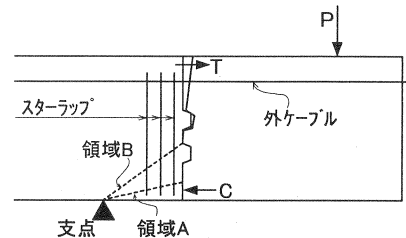


図-3 ひび割れ機構

3.3 目地部の開きと破壊機構

図-1 は、S-6 供試体(外ケーブル)における斜めひび割れ後(300kN)および破壊直前(380kN)のひび割れ開き量の断面内分布を示す。いずれの場合も開き量が大きく、下縁部のわずかな部分が圧縮・摩擦で抵抗していることが判る。

図-2 は S-3 供試体(内ケーブル) の事例で、破壊直前の荷重時における断面の開き量を示しているが、断面の約半分には圧縮が残っている。この場合はせん断キークがないため破壊耐力は上がらなかったが、内ケーブル、せん断キーク2 個の S-9 供試体においては 518kN まで耐力は上昇した。

以上より、外ケーブルの場合は目地部の開き量が非常に大きくなり、そのためせん断耐力が小さくなると考えられる。

破壊機構のまとめとして図-3 を示す。同図 A 領域は下縁部の圧縮・摩擦による破壊である。一方下縁のキーク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)以下となる。d/2 以下の根拠としては、次のように説明できる。通常、場所打ちの場合は、着目断面を中心に左右 d/2 幅(d:有効高)に配筋されるスターラップがせん断に抵抗するとして設計している。しかし、セグメントの外ケーブルの場合、実験によれば目地より支点側のみにひび割れが生じ、抵抗していることがわかった。従って、目地位置から支点側の約 d/2 のみのスターラップが抵抗することになる。

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。この目地の開き量および摩擦力の解析は、FEM 解析等により解析できると考えられるが今後の課題としたい。

4. 既往のせん断耐力の評価式

4.1 場所打ちコンクリート桁のせん断耐力

道路橋示方書およびコンクリート標準示方書によるせん断耐力の計算式があり、場所打ちコンクリートに採用される。文献¹⁰⁾、¹¹⁾参照のこと。

4.2 プレキャストセグメント桁のせん断耐力

プレキャストセグメント桁のせん断耐力の式として次の5つの式があり、本節ではこれらを総括して示す。具体的な数値解析結果は表-2 に示す。

(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)

$$V_{cnd} = \{ (\tau_c + P \cdot \tau_s \cdot \sin 2\theta - \alpha \cdot P \cdot f_{qd} \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta) \cdot A_c + V_k \} / \gamma_b \quad \text{----- (4.1)}$$

ここに、記号については文献¹¹⁾参照のこと。

(2) AASHTO

$$V_j = A_{key} \cdot \sqrt{6.792 \cdot 10^{-3} \cdot f_{ck} (12 + 2.466 \cdot \sigma_n)} + 0.6 \cdot A_{sm} \cdot \sigma_n \quad \text{----- (4.2)}$$

ここに、 A_{key} :破壊面におけるすべてのキークの最小面積、 f_{ck} :コンクリート強度、 A_{sm} :破壊面の平滑表面間の接触面積、 σ_n :ジョイントの平均圧縮応力度

(3) German 規定

German 規定によるせん断耐力は、次式で表され、摩擦力のみが考慮される。

$$V_j = \mu \cdot \sigma_n \cdot A_c \quad \text{----- (4.3)}$$

ここに、 μ :摩擦係数=0.6、 σ_n :平均圧縮応力、 A_c :有効せん断面積

(4) Rombach の式⁹⁾

$$\text{ドライジョイントの場合: } V_{d,j} = 1 / \gamma_F \cdot (\mu \cdot \sigma_n \cdot A_{yoint} + f \cdot f_{ck} \cdot A_{key}) \quad \text{----- (4.4)}$$

ここに、 γ_F :安全係数=2.0、 μ :摩擦係数=0.65、 σ_n :平均圧縮応力、 A_{yoint} :コンプレッションゾーンの面積、 f :ジョイントの固有係数=0.14、 f_{ck} :コンクリート強度、 A_{key} :破壊面における全てのキークの内の最小面積(多段キークの場合)

(5) 外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法規準¹²⁾

せん断キークのある場合は、軸力による摩擦力に加え、せん断キークの耐力も考慮している。

$$V = (\tau_c \cdot A_c + V_k) / \gamma_b \quad \text{----- (4.5)}$$

5. せん断耐力評価式の提案 (外ケーブルを使用したプレキャストセグメントの場合の提案式)

本論文で提案する2つのせん断耐力式を示す。

(1) A領域の場合 (目地の開きが大きい場合)

式(5.1)は下縁の摩擦で抵抗する場合であり, “摩擦抵抗力 = せん断耐力” とする考えである。

$$S_A = \mu \cdot \sigma_n \cdot A_c \quad \text{----- (5.1)}$$

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)

例えば S-6 供試体について計算すると, 終局時直前の 曲げ応力 + プレストレス は上縁 -3.89N/mm², 下縁 16.18N/mm² であり, 圧縮部の平均応力は 8.09N/mm² となる。その場合の圧縮部の断面積は 99,920mm² であるから,

$$S_A = 0.45 \times 8.09 \times 99920 = 364 \text{ kN}$$

(2) B領域の場合 (目地の開きが比較的少なく, スターラップも抵抗する場合)

これは下縁部キーからせん断破壊する形態で, 下縁部を鉄筋で補強した場合であり, 式(5.2)で表される。

$$S_B = S_C + S_S \cdot 1/2 \cdot 0.9 \quad \text{----- (5.2)}$$

ここに, S_C : コンクリートによるせん断耐力, S_S : スターラップのせん断耐力,

$$S_C = \tau \cdot (h/\sin \theta) \cdot B \cdot \sin \theta = \tau \cdot h \cdot B$$

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 = $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_1 \cdot \sigma_n}$ (N/mm²),

σ_1 : コンクリートの引張強度¹¹⁾ = 0.23f_{ck}^{2/3} (N/mm²), σ_n : 下段キー位置での圧縮応力 (N/mm²)

S-6 供試体について計算すると

$$\tau = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_1 \cdot \sigma_n} = \sqrt{2.7^2 + 2.7 \times 11.92} = 6.28 \text{ N/mm}^2, \text{ したがって, せん断耐力は}$$

$$S_C = 6.28 \times 120 \times 340 = 256224 \text{ N} = 256 \text{ kN}, \quad S_S \times 1/2 \times 0.9 = 274 \times 1/2 \times 0.9 = 123 \text{ kN},$$

$$S_B = 256 + 123 = 379 \text{ kN}$$

ゆえに, S-6 供試体のせん断耐力の採用値としては, $\text{Min}(S_A, S_B) = S_A = 364 \text{ kN}$ となる。

6. 計算値と実験値の比較

6.1 場所打ちコンクリート桁の比較

表-2 に各桁に対する計算値と実験値の比較を示す。

(1) 曲げおよび斜ひび割れの比較

- 1) S-1, S-2 とともに, 曲げひび割れおよび斜ひび割れ荷重は計算値と実験値がよく一致している。
- 2) 実験による斜ひび割れ荷重の S-1 と S-2 の比は, 1:0.9 となっている。B.Foure⁷⁾ によると, この比は 1:0.9 であり, 一致した値となっている。

(2) せん断耐力の比較

- 1) 実験値では S-2 は S-1 の 90% となっている。道路橋示方書式は実験値に比較し, 69%(S-1), 76%(S-2) とかなり小さくなっている。
- 2) 標準示方書式は実験値に比較し, 79%(S-1), 87%(S-2) とやや小さくなっているが, 実験値に近く安全側の式として評価できる。

6.2 プレキャストセグメント桁の比較

(1) 曲げおよび斜ひび割れの比較

- 1) 曲げひび割れの比較では, 計算値と実験値はどの供試体もよく一致しているといえる。
- 2) 実験において斜ひび割れは, 曲げひび割れとほぼ同時に発生した。それゆえ, 実験値は計算値よりも小さくなった。

(2) セグメント桁のせん断耐力の比較

- 1) ③は場所打ちコンクリートとプレキャストセグメント桁の両方に対する式であるが、今回はプレキャストセグメントに対して計算した。計算値は522~624kN(平均565kN)であり、内ケーブル実験値518kN(S-9)よりも10%大きく、他のプレキャストセグメント桁と比較するとかなり大きくなった。この式は内ケーブルのプレキャスト桁の場合に適した式といえる。
- 2) ④はAASHTOの式であり、せん断キーの耐力が含まれており、計算値は817~1070kN(平均925kN)であり、実験値より極めて大きくなった。よって本実験桁には適合しないと思われる。
- 3) ⑦はプレストレストコンクリート技術協会の外ケーブルプレキャスト桁の式であるが、せん断耐力は③の土木学会の式と全く同じである。
- 4) ⑤のGerman規定は下縁の摩擦のみ考慮された式であるが、計算値は455~595kN(514kN)となり、5本のプレキャスト供試体の平均値の38%増と大きくなった。
- 5) ⑥は、Rombach⁹⁾の式でプレキャストセグメント桁に対する最も新しい実験公式である。この場合は、比較的低い値361~456(平均402kN)となり、実験値5体の平均値370kNより9%程度上回っており、内・外ケーブルに対する近似式となっている。しかし、外ケーブル桁と内ケーブル桁に対して別々に比較を行えば、外ケーブルに対しては大き目、内ケーブルに対しては小さ目の評価となっている。
- 6) ⑧は外ケーブルプレキャスト桁に対する著者らの提案式であるが、外ケーブル桁に対し341~408kN(平均370kN)となり、外ケーブル桁の実験値の平均値334kNより10%程度大きくなった。ただし、例えばS-6供試体の実験値380kNに対しては364kNで約96%と良好な結果となった。

以上示したように、外ケーブルセグメント桁の純理論的なせん断耐力式の提案は、現時点では困難であるが、ここでは⑧の提案式が最も妥当であるといえる。

表-2 場所打ちおよびプレキャストセグメント桁の実験値と理論値の比較

(単位: kN)

供試体	場所打ちコンクリート桁		プレキャストセグメント桁							
	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7	S-8	S-9	
内・外ケーブル	内ケーブル	外ケーブル	内ケーブル	外ケーブル	外ケーブル	外ケーブル	外ケーブル	外ケーブル	内ケーブル	
せん断キー	—	—	キーなし	キーなし	3個, 補強	2個	3個	2個, 補強	2個	
曲げひび割れ	実験値	250	260	245	245	176	250	250	244	245
	理論値	272	262	261	258	180	260	260	259	261
斜ひび割れ	実験値	333	295	245	245	186	260	250	244	274
	理論値	348	301	349	341	369	352	348	368	366
せん断耐力	実験値	565	500	340	260	308	380	340	308	518
	①道路橋示方書	392	380	—	—	—	—	—	—	—
	②標準示方書	445	435	—	—	—	—	—	—	—
	③標準示方書	—	—	366	347	624	522	573	543	565
	④AASHTO	—	—	398	366	1070	833	1005	817	898
	⑤German 規定	—	—	410	353	545	485	489	455	595
	⑥Rombach	—	—	222	191	456	351	409	355	428
	⑦外・プレ基準	—	—	366	347	624	522	573	543	565
	⑧提案式	—	—	—	—	408	364	367	341	—

※終局せん断耐力の計算で、各桁に差が生じているのは、終局時のPC鋼材の張力増を考慮しているためである。

7. まとめ

本文では、外ケーブルを用いたプレキャストセグメント桁の連続桁支点付近におけるせん断耐力を明らかにするため、プレキャストセグメント桁に関する国内・外の論文・規準類を調査し、次に、載荷試験結果と既存のせん断耐力式の比較を行い、各式の評価を行った。そのうえで、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式を提案し、その妥当性を示した。以下、本論文等で得られた知見をまとめると次のとおりである。

7.1 試験結果の特徴およびまとめ

- 1) 本試験では、全外ケーブルセグメント桁のせん断耐力は内ケーブル場所打ち桁の65%程度であり、両者の差は大きいことが判った。
- 2) 場所打ち桁の外ケーブルと内ケーブルのせん断耐力比は、90%であり、両者の差は比較的小さい。

- 3) 外ケーブルのセグメント桁の場合、曲げひび割れと同時に斜ひび割れが上側のキー位置に生じる。即ち、曲げひび割れ荷重と斜ひび割れ荷重が等しくなり、これによってコンクリートが受け持つせん断耐力が小さくなる。
- 4) 外ケーブルでは、目地の開きが大きい。このため、桁下縁部での圧縮・摩擦抵抗が小さくなり、せん断耐力が小さくなる。

7.2 各規準におけるせん断キーの取り扱い

各文献、規準においては、セグメント橋のせん断耐力評価にせん断キーの耐力を加算しているものと、していないものがあるが、例えば、M.Virlogeux の式、German 規定等では終局せん断耐力にはせん断キーの耐力は考慮されていない。支点付近の目地が開く場合には加算しないほうがよいと考えられる。

7.3 せん断耐力の評価式

今回の実験値に近い式である著者らの提案式と Rombach の新しい式に関しては、

- 1) 著者らの提案式は曲げひび割れの開きが大きい場合の中間支点付近に着目した式であり、外ケーブル使用のプレキャストセグメント桁の中間支点付近に適した式であると考えられる。
- 2) Rombach の式は、ひび割れが開かない場合の式で、内・外ケーブル全体の実験平均値に近いが、外ケーブル桁に対しては大きめの、内ケーブル桁に対しては小さ目の評価となっている。

7.4 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。J.Eibel[®]によれば、支点近くの断面において圧縮ゾーンの高さを $2/3 H$ より多く残し、支間中央は $1/3 H$ 以上残す必要があるとされている。
- 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。

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, 若狭他: 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, Vol45 No.3, pp.44-56, Sep. 2003
- 2) 伊藤, 山口, 池田: 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
- 3) 伊藤, 山口, 池田: 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
- 4) 西川, 廣松, 鈴木, 伊藤: 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
- 5) 新津, 睦好, 佐野, 殿川: 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
- 6) M. VIRLOGEUX: Shear strength of beams made of precast segments, The French Technology of Prestressed Concrete, Eleventh FIP Congress, Hamburg, 1990
- 7) 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
- 8) 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
- 9) G. ROMBACH, A. SPECKER: Design of joints in segmental hollow box girder bridges, FIB Osaka 2002, Session 2
- 10) 日本道路協会, 道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編, 2003. 3
- 11) 土木学会, コンクリート標準示方書・構造性能照査編, 2002. 3
- 12) 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