

External Post-Tensioning : Lessons Learned

外ケーブル工法 —過去からの教訓—

Christian BROCKMANN*1 · Steffen SPRINGER*2

1. Introduction

The significant advantages of segmental bridge construction in combination with external post-tensioning promoted in recent years the erection of numerous bridges of this type throughout the world. The greatest benefit in comparison to conventional bridge building methods is the shorter construction period and therefore a considerable reduction in cost. A very high quality can be assured due to the industrialized prefabrication of segments. Segmental bridges with external post-tensioning have been built in various climatic conditions and perform to the full satisfaction of the owners.

This paper is based on experience gained by Bilfinger + Berger during the construction of numerous segmental bridges in Africa, Asia and Australia. A total amount of 3 000 000 m² bridge deck area erected in recent years led to a sound knowledge of the construction method and the highly developed post-tensioning systems. Conditions that favor this method and the problems of external post-tensioning as well as time dependent deflections are presented and by the example of the BBBE project, a 55 km long, 6 lane, elevated expressway in Bangkok. With this project, which has set a new record in magnitude and fast track bridge construction, the advantage of segmental construction with dry joints and external post-tensioning could be demonstrated: with five mainline and six ramp girders operating simultaneously, a monthly progress of up to 2 600 meters mainline superstructure (70 200 m²) and 2 600 linear meters of ramp structure (D2/D3) was achieved. Construction was completed in August 1999.

2. Bridge Construction Techniques

The segmental construction of bridges involves tremendous technical and logistical challenges. The segments are normally prefabricated at one location and must be transported to site where they are assembled. In order to achieve the necessary speed during erection, the following aspects must be thoroughly organised and integrated:

- Prefabricated segments
- Sophisticated erection girders on site
- Specific equipment, such as molds and shuttle lifts
- Skilled staff

1. はじめに

外ケーブルとの組合せによるプレキャストセグメント工法は優れた利点を有しており、近年ではこの工法を用いた数多くの橋梁建設に大きく寄与している。橋梁建設における在来工法に対して最も優位な点は、工期が短く、その結果として経済性に優れる点である。非常に高い品質が、工業化されたセグメント製作により保証される。外ケーブルを用いたセグメント橋は、さまざまな気象条件下において建設されており、発注者の満足を得ている。

本論は、アフリカ・アジア・オーストラリアにおいて数多くのセグメント橋を建設してきた Bilfinger + Berger 社の経験に基づいている。総計で橋面積 300万 m²もの架設を行った近年の実績から、確かな橋梁建設への知識と高度に発達したポストテンションシステムがもたらされた。この工法に適している条件やポストテンションの問題点とともに、時間依存性たわみに関しても BBBE プロジェクト(バンコックの全長 55 kmの6車線高架高速道路)注1)を例に述べる。このプロジェクトでは、ドライジョイントと外ケーブルとの組合せにより、事業規模および施工速度において世界記録を樹立した(5本の本線と6つのランプ橋)が、一月あたり本線で最大2 600 m (7万 200 m²)、ランプ橋で2 600m (D2/D3セグメント)の進捗実績を上げた。工事は、1999年8月に終了した。

2. 橋梁建設技術

セグメント橋の建設では、技術的にも資材調達のポイントにも、大いなる試みが必要とされる。通常、セグメントは1カ所において製作され、架設場所へと運ばれる。架設中必要とされる製作速度を確保するため以下の事項に関し、組織化し統一管理されなければならない。

- プレキャストセグメント
- 機能的なエレクションガーダー
- 個々の器機(型枠装置や運搬用リフトなど)
- 有能なスタッフ

注1) 本誌Vol.42, No.6, pp.127~131に詳しい。

*1 Prof. Dipl.-Ing. Christian BROCKMANN : University of Applied Sciences Professor for Construction Management
クリスチャン・ブロックマン : ドイツ・応用科学大学コンストラクションマネジメント講座 教授

*2 Dipl.-Ing. Steffen SPRINGER : Bilfinger+Berger Vorspanntechnik GmbH, Technical Manager, International Division
ステファン・シュプリンガー : ビルフィンガー・ベルガープレストレス技術社 国際事業部 テクニカルマネージャー (技師)

- Suitable post-tensioning systems
- Logistical know-how

The conventional construction method is the span-by-span in-situ casting of the superstructure. If segmental construction and in-situ casting are compared with each other, it can be stated, that they constitute opposite ends with regard to the level of industrialisation. Fig. 1 clearly illustrates this relation.

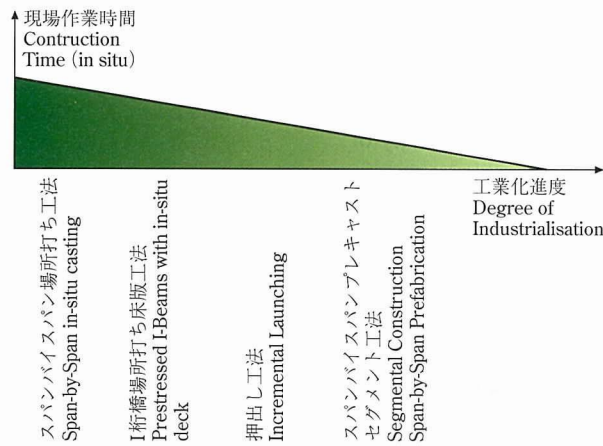


Fig. 1 Comparison of construction methods for bridges
図 - 1 橋梁施工法の比較

- 適切なポストテンションシステム
- 資材調達のノウハウ

在来工法は、径間ごとに上部工の場所打ちを行う工法である。プレキャストセグメント工法と場所打ち工法を比較すると、工業化という観点からは両極端にあると言える。図 - 1 は、明かにこの関係を表現している。

2.1 Industrialized construction techniques

The degree of industrialised construction is characterised by:

- Combination of production factors in different places (yard, site)
- Production processes are specialised
- Parallel processes
- In-situ assembly instead of production
- Minimized in-situ construction time
- Transportation of elements, not materials

Advantages and disadvantages of a high degree of industrialisation are well known. Due to a high specialisation, a great amount of time and costs can be saved, if the quantities to be produced are large enough. There is the possibility for a greater automation of production processes, a better utilization of the learning curve effects and, of course, a better opportunity to concentrate work procedures. At the same time, a much higher quality of the product can be attained by a better control of many factors that influence the production process, such as production conditions independent from climatic impacts.

On the other hand, there are also disadvantages, such as high fixed costs and therefore higher investments, and a greater monotony of the working processes.

Hence, a prerequisite of segmental construction is definitely a certain project size to be implemented in a very short time. Other basic requirements for industrial construction comprise limited activities on site (e.g. in city centers), the possibility to establish temporary production facilities close to the site and a sufficient resources (monetary funds and employees).

2.2 Segment types and erection girders

The geometry of the segments is largely dependent on the characteristics of the project. A vast variety of factors influence the final appearance of the superstructure. Only to name few, the segments will be shaped by factors, such as applicable standards and specifications, client preferences,

2.1 工業化された建設技術

建設の工業化度は、以下のものに特徴づけられる。

- 異なった場所における生産要素の結合
- 生産工程の専門化度
- 並行作業
- 現場生産から現場組立てへ
- 現場における作業時間の最小化
- エレメントの運搬（材料ではない！）

高度に工業化されることの利点と欠点はよく知られている。生産量が十分多い場合では、高度な専門化による膨大な時間とコストの削減が可能である。生産工程におけるより一層のオートメーション化、習熟効果および作業の集約化におけるより良い環境を与えることとなり得る。同時に、生産工程に影響する多くの要因（たとえば、気象条件と無関係な生産条件）をコントロールすることにより非常に高品質の製品を得ることが可能となる。

一方、高い固定費や投資および労働の単調さが本工法の欠点である。

その結果、プレキャストセグメント工法の必要条件は絶対的に極めて短期間に施工される必要があり、一定以上の事業規模を有することである。工業化された建設工事に必要なその他の基本的事項は、現場作業への制約（都心部など）、現場近くに仮設生産施設が設けられること、および十分な資源（資金・従業員）である。

2.2 セグメントタイプおよびエレクションガーダー

セグメント形状は、プロジェクトの性質に大きく依存する。非常に多くの要因が、上部工の外観に大きく依存する。いくつかを挙げるならば、セグメントの形は適用可能な標準・基準、クライアントの好み、橋種、橋梁システム

bridge type, preferred structural system, transport weight and geometrical restrictions on site.

In this article, the two main segment types of the BBBE project shall be discussed exemplarily ¹⁾. The majority of the bridge deck on this project was assembled using so called D2/D3 segments, a single cell box girder with a width of up to 15.60 m and D6 segments, a single cell box girder as well, but with a width of 27.20 m providing space for 6 lanes. Whereas the smaller segments were placed by overhead trusses, the D6 superstructure features a new, highly innovative and integrated design. Both segment types and the corresponding erection equipment are shown in Fig. 2 and 3.

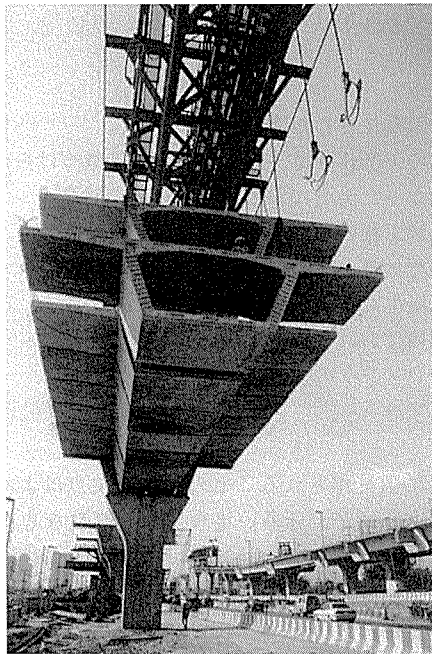


Fig. 2 D2/D3 segments with overhead truss
図-2 D2/D3セグメントおよびオーバーヘッドトラス

A prerequisite for a fast track construction process is the versatility of the erection equipment, namely the ability to launch on their own from span to span. This requirement influences of course the span. It also follows, that the length of such girders must be at least twice the length of the superstructure.

Overhead trusses (D2/D3) offer more geometrical independence since they are not restricted by substructure elements. The overhead trusses used in Bangkok allowed to erect radii as small as 80 m.

Underslung trusses (D6) are advantageous during installation since there is unlimited access from top. An additional advantage is the straightforward installation of the segments. A swivel crane can be placed either at the top of the girder, see Fig. 3, or on the previous span.

3. Deformations

3.1 Match-casting

The match of adjacent segments is one of the key problems

の適合性、運搬重量および現場での幾何的制約などの要因により決定される。

本稿においては、BBBEプロジェクトにおける2つのタイプのセグメント¹⁾に関して述べる。本プロジェクトにおける主桁の大部分は、1室箱桁で最大幅員15.6mのD2/D3(2車線/3車線)セグメントおよび幅員27.2mで6車線用のD6セグメントにより構成されている。D2/D3セグメントは、オーバーヘッドトラスにより架設された。D6セグメントは先進的で高度に革新的で洗練された設計が特徴である。それぞれのタイプのセグメントタイプおよび架設機材を図-2、3に示す。

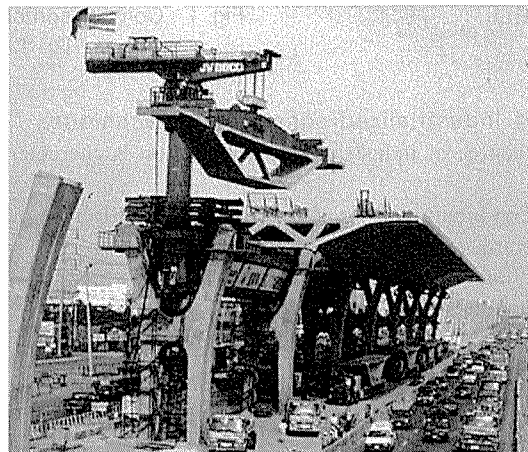


Fig. 3 D6 segment with underslung girder
図-3 D6セグメントおよび下弦式架設桁

急速施工工程における必要条件は、架設機材の多彩な機能であり、文字通り支間から支間へと自走する能力である。この要求性能は、当然ながら支間長に影響する。また、架設桁は少なくとも上部工支間の2倍以上の長さを有しなければならない。

オーバーヘッドトラス(D2/D3用)は、下部工に空間的な制約を受けないため自由度が高かった。バンコックでは、このオーバーヘッドトラスの採用により、最小で $R = 80$ mの平面線形への対応も可能となった。

下弦式のトラス(D6用)は、設置時に上空からの制約がないという利点を有する。スイベルクレーンは、架設桁上あるいは一つ前の支間に取り付けられる(図-3)。

3. 変形

3.1 マッチキャスト

セグメント製作において、隣り合うセグメントを妻型枠

of segmental construction.

By the external post-tensioning a longitudinal force up to 7.800 t must be transferred by the joints. If these do not fit perfectly together, they will crack under such loads. Dry joints without any filler, such as epoxy, exacerbate this problem.

The fit of the segments can only be insured by the so called match-cast method. In general, there are two main types of match-casting: the short bed and the long bed method ²⁾.

When utilizing the long bed method the bottom formwork is laid out for the entire span. The short bed method requires only molds for two segments. The larger the segments get, the more the tendency is going towards the short bed method. For that reason, on the BBBE Project, D2/D3 and D6 segments were fabricated in short bed molds ¹⁾. As a principle, the former segment is used as bulkhead for the successive one. From match-casting joints will result which initially (at $t_0 = 0$) fit perfectly together.

3.2 Temperature induced deformations at time $t_1 = 10$ hours

Since a new segment "N" will be cast against its predecessor, the old segment "N-1" will experience a temperature increase due to the developing hydration heat of segment "N". This temperature increase will be transferred through the match-cast joint. Due to differential temperature the hardened and the fresh concrete, segment "N-1" will bulge into segment "N".

Since the concrete of segment "N" is still fresh when this happens, there will remain a permanent curvature after setting of the concrete. This phenomenon is called "bowing effect" and is illustrated in Fig. 4. The elastic deformation of segment "N-1" due to differential temperature will leave a gap between the segments. Right at the wing tips the joint will be thoroughly closed and it will gradually open towards the centre of the segment. The critical aspects of this problem is that

として利用するマッチキャスト工法は、プレキャストセグメント工法の一つの大きな問題である。

外ケーブルにより導入される最大7万8000 kNのプレストレスをセグメント継目で伝達しなければならない。もし、セグメントが完全に密着していなければプレストレスにより、ひび割れが生じ得る。エポキシのような間詰め材がないドライジョイントでは、このような問題がより大きくなる。

セグメント間の密着は、マッチキャスト工法により保証される。一般に、ショートラインとロングライン^{注2)}の2タイプのマッチキャスト工法が存在する²⁾。

ロングラインマッチキャスト工法を用いた場合には、底部型枠は1スパン全長分が必要となる。ショートラインマッチキャスト工法では、2基の型枠装置が必要となるのみである。セグメントが大きくなるにつれ、ショートライン工法が有利となる傾向を有する。こうした理由で、BBBEプロジェクトではD2/D3セグメントおよびD6セグメントがショートライン工法により製作された¹⁾。原則として、一つ前のセグメントが妻型枠として用いられ、マッチキャスト継目は初期状態では完全に密着している ($t_0=0$)。

3.2 10時間後 ($t_1=10$) の温度に起因する変形

セグメント "N" が一つ前のセグメント "N-1" を妻型枠にして製作されるため、セグメント "N-1" がセグメント "N" の水和熱により温度上昇が発生する。この温度上昇は、マッチキャストジョイントを介して発生する。硬化したコンクリートとフレッシュコンクリートとの間の温度差により、セグメント "N-1" はセグメント "N" 側に膨張する。

セグメント "N" のコンクリートは、変形が生じた時点では、依然としてフレッシュな状態にあるため、コンクリートが硬化した後に永久的な反り変形が残留する。この現象は、“反り効果 (bowing effect)” と呼ばれる (図-4)。温度差によるセグメント "N-1" の弾性変形は、セグメント継目間での隙間の原因となる。張出し床版先端位置は、完全に閉じており、セグメント中央部に向かって

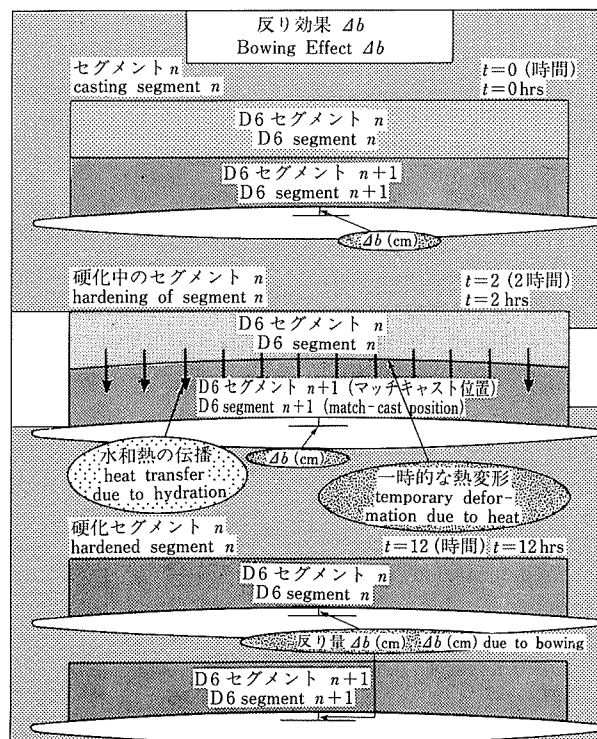


Fig. 4 Bowing effect during match-casting

図-4 マッチキャストにおける反り効果

注2) 原文では、ショートベッド・ロングベッドとあるが、わが国で多く用いられているショートライン・ロングラインという用語を用いた。

bowing effect deformations will add up over the length of the span.

According to a report by Roberts, Breen und Kreger³⁾ this influence can become critical starting at a segment length-to-width ratio of 6 to 9. Typical D6 segments have a length-to-width ratio of 10.7 (27.20 m / 2.55 m) which must therefore be considered critical. For the D2/D3 segments this ratio is only 4.6.

The most important aspect to control the bowing effect is certainly an appropriate concrete mix design. It must be the aim to design a concrete mix with a very low hydration temperature. This can be achieved by a slowly setting concrete. Unfortunately, the segments had to be cast in a daily sequences, leaving little time for the hardening of the concrete. In order to strip the D6 segments, an initial transverse post-tensioning force was required. To keep the schedule, it had to be applied 10 hours after casting. For that reason the mix design had to balance a high early strength requirement with the opposite requirement of a low hydration temperature. The minimum content of cement was designed with 380 kg/m³ (CEMI 42.5 R) with 1.4% of a liquefying agent. The measured concrete temperature during setting was approx. 70°C. Therefore, the match-cast joints were subject to a differential temperature of about 35°C, assuming a normal segment temperature of 35°C.

Empirical evidence of the bowing effect could not be measured for a single segment. For a whole span, however, the gaps added up to approx. 10mm after applying the initial post-tensioning. They were distributed over 17 joints and it did not pose any problems when erecting the segments on site. After the full post-tensioning force was applied the joints were closed tightly. One more time it should be mentioned that the small daily temperature changes in Bangkok are perfect for match-casting operations. Under more serious climatic conditions it must be expected that the bowing effect for wide-spanning segments is much harder to control.

3.3 Time dependent deflections at time $t_2 = 28$ days up to $t_3 = \infty$

The very slender D6 segments with their enormous width of 27.20m could easily bridge over a 4-lane highway. Because of their great slenderness, time dependent deformations such as creep and shrinkage can pose problems and must be controlled tightly. During casting a span at a rate of one segment per day, a time difference of 20 days is resulting between the first and the last segment to be cast. However, the time difference between adjacent segments is of higher significance. Due to the production sequence this time is limited to two days. In order to keep the storage in the precast yard at a minimum, segments were generally installed after 28 days.

徐々に目開きが広がる。この問題の重大な点は、反り効果による変形がスパン全長にわたって積み重なっていくことである。

Roberts, Breen, Kreger の報告³⁾によれば、この影響はセグメントの長さとの比が6~9程度となるあたりから顕著になる。一般部でのD6セグメントは、長さとの比で10.7(長さ27.20m/幅員2.55m)であり、クリティカルなプロポジションであると言える。D2/D3セグメントでは、この比率は4.6となる。

反り効果を抑制するための最も重要な点は、コンクリートの適切な配合にある。水和熱が非常に低くなるように配合設計を行わなければならない。コンクリートの凝結を遅延させることにより、この対策が可能である。その一方で、セグメントは1日の工程で打設されなければならない、コンクリートが硬化するまでに僅かな時間しか存置することができない。D6セグメントの脱型を行うため、横締め緊張力の一部が必要となる。工期を遵守するため、横締め張力の導入は打設後10時間でなされる。上記のような理由により、高い早期強度と低い水和熱という相反する性質をバランスさせるように配合設計がなされなければならない。1.4%の流動化剤を用いることにより、最小セメント量が380kg/m³となった(CEMI 42.5 R)。凝結中のコンクリート温度は、最高で70°Cとなった。よって、外気温が35°Cと仮定すると、35°Cの温度差となる(バンコクの気温を想定^{注3)})。

反り効果の影響の実測値は、1セグメントのみで計測することはできない。支間全体で、初期プレストレスを導入した時点での空隙は、約10mmとなった。反り変形は、17の継目に分散しており、現場におけるセグメント架設に何ら支障を来さなかった。所定プレストレスを与えた後は、セグメント継目はしっかりと閉じた状態となった。加えて言及すべき点は、バンコクの温度変化の少ない気候がマッチキャスト工法に最も適していたということである。厳しい気候条件下では、広幅員セグメントの反り効果の影響を制御することが格段に困難となる。

3.3 時間依存性変形 ($t_2=28 \sim t_3=\infty$)

27.20mという広幅員を有する非常にスレンダーなD6セグメントは、4車線道路上空で容易に架設することができる。その極めてスレンダーな形状のため、クリープ・収縮といった時間依存性変形は問題を生じさせる可能性があり、適切に管理する必要がある。1日につき1セグメントの速度で製作を行っている間に、1支間内で最初のセグメントと最後とでは20日の材齢差が生じる。しかしながら、隣り合うセグメント間での材齢差の方がより重大であり、工程調整により2日に制限した。プレキャストヤードにおける仮置期間を最小とするため、セグメントはおおむね28日で架設された。

注3) D2/D3セグメントを用いたランプ部等の箇所を指す。

Moreover, the different transversal stiffness between the pier segments and the typical segment proved to be of importance, see Fig. 5 and 6. In addition to the different stiffness, different layouts for the transverse post-tensioning complicated the matter. Evaluation of the test span showed differences in deflections of up to 4.0 cm right at the wing tips, which was not acceptable for site production⁴⁾.

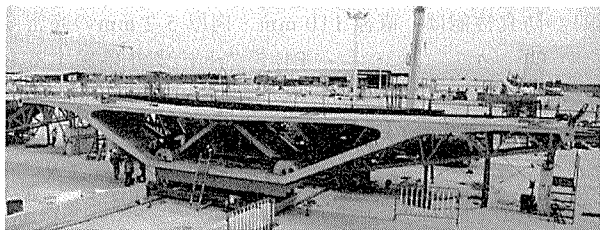


Fig. 5 Typical D6 segment
図-5 D6標準セグメント

After a careful assessment of this phenomenon it became necessary to adjust the initial p/t in transverse direction. The final transverse post-tensioning was only applied shortly before transport to site. Moreover, the alignment of the tendons was modified. All this was necessary to guarantee equivalent deflections of the cantilevers and to make sure that segments would fit together on site. Remaining differences were in the magnitude of 1.0 cm. Once the segments were carefully aligned, the shear keys would slide together without bursting the concrete. In order to insure firmly closed joints over the full width of the superstructure under live loads, a longitudinal tendon was placed in both wing tips.

4. External Post-Tensioning

4.1 Requirements on the p/t system

Depending on the specifications there are basically two types of effective corrosion protection systems: either a bundle of monostrands in grease with individual PE duct (e.g. System EMR, Bilfinger + Berger Vorspanntechnik) or bundles of strands put in a common PE duct and injected with cementitious grout. In general the requirements on external p/t systems can be summarized as follows:

- Durable corrosion protection of the p/t steel
- Straightforward replacement of tendons
- Easy re-stressing of tendons

International competition and the increased effort of p/t system suppliers have led to a substantial improvement of such systems. Of course, as a result, external post-tensioning is commonly regarded as more expensive than the conventional alternative. However, due to the application of appropriate construction methods (and segmental construction is without doubt one of them) and a higher allowable P.T. steel stress, it is possible to influence the total costs in a positively. If the very ease of inspection, repair and strengthening is considered as well,

さらには、柱頭部セグメントと、標準セグメントとの剛性の差が重大な問題であることが分かった(図-5, 6)。剛性差に加えて、横締め配置が異なる点も事態を複雑にする要因でもある。試験施工では、相互のたわみ差が張出し床版先端で最大4.0 cmであり、現場施工での許容範囲に収まらないことが判明した⁴⁾。

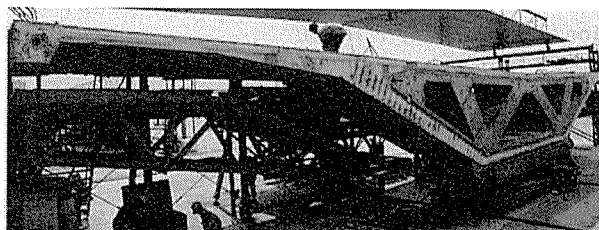


Fig. 6 D6 pier segment
図-6 D6柱頭部セグメント

この現象を慎重に検討した結果、横方向の初期導入プレストレス量の調整が必要であるとの結論を得た。最終的な横方向プレストレスは、現場へ輸送する直前に導入した。さらに、PC鋼材配置も改善された。これらの措置は、すべて張出し床版のたわみが一様となり、現場においてセグメントが密着するようになされたものである。残留誤差は、1.0 cm程度となった。慎重にセグメントが配置された後は、せん断キーは、コンクリートを損傷させることなく互いに滑り合わされた。活荷重下においても全幅にわたりセグメント継目をしっかりと密着させるため、張出し床版先端に主方向PC鋼材を配置した。

4. 外ケーブル工法

4.1 ポストテンションシステムの要求性能

基準類によると、基本的には2種類の有効な防食システムがある。一つは、各ストランドが1本ごとにポリエチレン(PE)シース中に入っており、グリースが充填されたものを束ねたもの(たとえば、Bilfinger + Berger Vorspanntechnik社のEMRシステム)であり、もう一つは一般的なPEシースにストランドを多数挿入し、セメントグラウトを注入するものである。一般には、外ケーブルシステムへの要求性能は、以下のようにまとめることができる。

- PC鋼材の腐食を防止する耐久的な防錆性能
- PC鋼材の取替えが容易であること
- PC鋼材の再緊張が容易であること

国際競争およびメーカーによる改善努力により、外ケーブルシステムの性能に実のある改善がなされてきた。

もちろん、その結果として外ケーブル工法は、従来の内ケーブル工法と比べて割高なものとなっている。しかしながら、適切な施工方法の適用(プレキャストセグメント工法は疑いなくその一つである)およびPC鋼材の許容応力度が高いことを考慮すると、トータルコストには有利な影響を及ぼすことが可能である。点検・補修・補

the economic advantage for owners of such structures becomes very clear.

In consideration of the non-severe corrosion environment in Bangkok and the applicable specifications, a grouted external p/t system was chosen. Bilfinger + Berger Vorspanntechnik GmbH installed tendons of up to 22 strands (0.6" diameter and 260 kN ultimate load/strand). The corrosion protection is ensured by a HDPE duct with a diameter of 110 mm and a wall thickness of 5.2mm. Fig. 7 shows tendon layout, pier segment and deviators of the 27.20 m wide single cell box girder.

Future Requirements and possible strengthening were solved by complying with AASHTO requirements⁵⁾. Additional openings in pier segments and deviators were provided in order to maintain the possibility to add up to 10% of the total p/t force in the future. This additional capacity is deemed sufficient, since the replacement of tendons due to damages, e.g. fire, is easily possible as well.

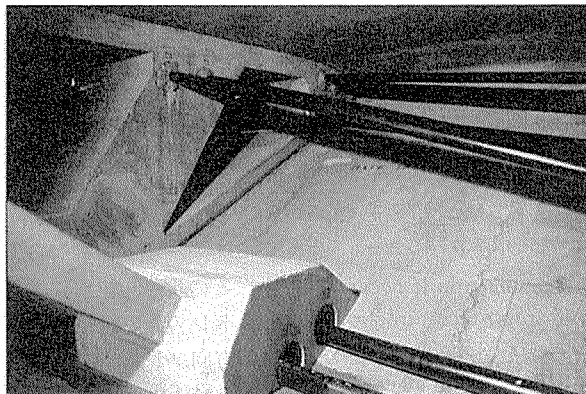


Fig. 7 External tendons
図-7 外ケーブル

4.2 Longitudinal deformations due to post-tensioning

An important part of the design is both the computation of longitudinal deformations due to the application of the p/t forces and the determination of anticipated deformations during the lifetime of the structure. Compared with statically indeterminate structures, this is relatively easy for single cell box girders. The influence of different constructions stages and erection sequences is not very difficult. The following aspects were considered in order to evaluate the behaviour of the girder:

- Dead load of superstructure
- Superimposed dead loads (asphalt, crash barriers)
- Displacements due to initial p/t application
- Long term deformations due to creep, shrinkage and losses of p/t force (relaxation)
- Time dependent changes of the modulus of elasticity
- Influence of differential temperature

Traffic loads were not considered for the determination of long-term deformations. For load case 1 (dead and life loads) AASHTO requires a minimum compressive stress in the precompressed tensile zone for dry joints of 200 psi (1.4 MPa). With this requirement the deformations were computed and the results showed the hogging of the superstructure after a certain time (due the creep and shrinkage).

The calculations showed that a 2-3 lane box girder with a 41.85m span would bulge up 3.1cm after 30 days and

強の容易さをも考慮すれば、この種の構造物の施主への経済的な優位性は極めて明らかとなる。

バンコックの厳しくない腐食環境および適用可能な基準類を考慮し、グラウトを用いる防食方法を選択した。Bilfinger + Berger Vorspanntechnik 社は、最大 22本のストランドを配置した (直径 0.6 インチ、引張強度 260 kN/素線)。防食性能は、直径 110 mm・肉厚 5.2 mm の高密度 PEダクトにより確保するものとした。図-7 は、幅員 27.20 m の 1 室箱桁の柱頭部セグメントと偏向部の PC 鋼材配置を示している。

将来的な要求性能および補強への配慮に関しては、AASHTO の要求性能⁵⁾ に則して決められた。柱頭部セグメントおよび偏向部における予備孔に関しては、将来 10% のプレストレスを増加できるように設けられた。この追加能力は、PC 鋼材の火災など

の損傷による取替えが容易であるため、十分であると考えられる。

4.2 主方向プレストレスによるたわみ

設計において、プレストレス導入による主方向の変形を計算し、供用期間中の変形を予測することはともに重要な事項である。不静定構造物と比較して、単純 1 室箱桁橋では容易である。主桁の挙動を評価するため、以下の事項に関して検討を行った。

- 上部工の死荷重
- 橋面荷重 (アスファルト、防護柵)
- 初期プレストレス導入による変位
- クリープ・収縮・プレストレス減少 (リラクセーション) による長期変形
- 弾性係数の経時変化
- 温度差

活荷重は、長期変形に関しては考慮されていない。荷重ケース 1 (死荷重および永久荷重) において、AASHTO の基準では、プレストレスを入れなければ引張領域となる箇所ドライジョイントに関して最低 200 psi (1.4 MPa) の圧縮応力度を確保するものとしている。この要求事項により変形を計算した結果、しばらく後に反り返った状態となる (クリープ・収縮により変化する)。

計算では、支間長 41.85 m の 2 車線~3 車線の箱桁橋 (D2/D3 セグメント使用^{注3)}) では、30 日時点で 3.1 cm、4 000 日

even 5.8cm after 4 000 days. Depending on the type and size of superimposed dead loads the max. hogging for such spans was computed with 11.0 cm. If such deformations are not desired due to aesthetical or drainage reasons, the spans have to be cast with a negative camber. According to the designers input, the precast yard computed the ordinates for each segment with a specially developed software. Changes in vertical and horizontal alignment were considered as well. The aim was to guarantee levelled spans after 4 000 days. During and after erection a constant survey was conveyed which showed that the actual displacements of the spans were smaller than the computed ones. For the 2/3 lane box, the actual hogging developed only up to 30% of the calculated values. Even greater was the deviation for the mainline superstructure. Practically no time dependent hogging could be proven here.

Further investigations showed clearly that the ratio of dead load to total p/t force applied, is the main criterion influencing this phenomenon. Comparing the figures for a 44.40 m span shows that the ratio for the dead weight of the girders is 1 : 2.68 (D2 : D6) whereas the total p/t force has a ratio of 1 : 2.04. From that time onwards, the theoretical values were corrected accordingly and D2/D3 spans were cast with only 40% of the theoretical negative camber and D6 completely level.

4.3 The post-tensioning sequence

For the establishment of the stressing sequence the following aspects have to be considered:

- The p/t force should be applied in transverse direction as equally as possible in order to avoid uneven stress distribution.
- The interaction of the box girder to be erected and the erection truss must be considered.

Regardless whether the erection truss is located above or below the span to be erected, the entire dead load of the box girder is carried by the truss until it is transferred onto its final bearings.

For overhead erection girders, the structural system during erection is a hinged chain that receives its stiffness during the application of the longitudinal post-tensioning. Due to the elastic behaviour of the truss (it will deflect under the load of the span) the span will arch upwards during stressing. This effect will reduce the load of the hangers at midspan and following equilibrium, increases the load at the outer hangers. In order to avoid open joints at the top of the deck and overloaded hangers towards the ends of the span, the dead load of the box girder must be transferred to auxiliary supports which are placed next to the permanent bearings. It is necessary to compute, after the application of how much p/t force the dead load must be activated. For D2/D3 spans this was required after 60% of tendons were fully stressed.

For underslung erection girders the behaviour is similar. On the BBBE project the D6 launching girder was highly

時点で 5.8 cm の反り変形を生じた。橋面荷重の種類や大きさにより最大反り変形量は 11.0 cm となった。もし、この変形が美観上あるいは排水性の点において好ましくない場合には、下越しを考慮してセグメントを製作する必要がある。設計者の入力値より、プレキャストヤードでは特別に開発したソフトウェアを用いて座標計算を行った。鉛直・水平方向の配置に関しても同様に考慮した。これは、4 000 日後に橋面が水平になるようにすることを目的としたものである。

架設中および架設後に定点観測を行った結果、実際生じた変形は、計算値よりも小さいことが分かった。D2/D3 セグメントを用いた箇所では、反り変形量は計算値の 30% となった。D6 セグメントを用いた本線橋部では、さらにその差が大きく時間依存性変形は認められなかった。

更なる詳細調査により、この現象に関しては導入プレストレスに対する死荷重の比率が主たる要因であることが分かった。支間長 44.4 m のものに関して、比較すると死荷重比で D2 : D6 = 1 : 2.68 であるのに対して、プレストレス比は 1 : 2.04 となった。これ以降は、計算値を補正することとし D2/D3 セグメントでは計算値の 40% の下越しとし、D6 セグメントでは水平にすることとした。

4.3 プレストレスの導入順序

プレストレス導入順序を決定するにあたり、以下の事項を考慮しなければならない。

- 断面内での不均等な応力分布を防止するために、できるだけ均等にプレストレス力を導入すること
- 架設される主桁とエレクショントラスとの相互作用

エレクショントラスの位置が主桁の上下であるにもかかわらず、所定の支承位置に据え付けられるまで、主桁の重量全体がトラスにより受け持たれる。

オーバーヘッドエレクションガーダーは、架設時においてヒンジ構造となっており、主方向プレストレス導入時の剛性を確保するものとしている。トラスの弾性変形により（支間部の荷重によりたわむ）プレストレス導入時に反り変形を生じる。この効果は、エレクションガーダーに吊り下げられている主桁の支間中央部の荷重を減少させるとともに支間端部側の荷重を増加させる。床版天端におけるセグメント継目の目開きを防止し、かつ支間端部に吊り下げられている主桁への過載荷を防止するため、主桁の死荷重は本設支承近傍の仮支承に伝達されなければならなかった。主桁自重を打ち消すために、どれだけのプレストレスが必要かを計算することが必要であり、D2/D3 セグメントを用いた支間では、60% の PC 鋼材の緊張が必要となった。

下弦式のエレクションガーダーの挙動も同様である。BBBE プロジェクトの D6 セグメントに用いられたものは非

sophisticated and prestressed itself. Due to prestressing, this girder had a negative camber of 20 cm under the action of its own dead load. After placing all segments (approx. 1.500 tons total load) the whole unit was levelled. When the tendons were stressed, the box girder arched upwards at midspan. Again, dead load had to be activated during stressing. In this case, after approx. 56% of total prestressing, the girder, and therefore the span, was lowered onto the bearings.

For ease of stressing operations, this should always be done from the open end in direction of the erection progress. At this face there is full access and the stressing crews can work without restrictions. Stressing operations in the gap of 1 m between two adjacent spans (when closing a gap) are daunting and time consuming.

4.4 Elongations - A question of Quality Assurance

During the design stage it is the normal approach to use conservative stressing coefficients according to applicable codes, such as AASHTO, for the computation of p/t losses. This is justified, since specific p/t system parameters are not yet available (the p/t supplier normally is chosen later). For the production of shop drawings and stressing protocols the specific values are, however, required. Big projects often justify a field test in order to determine specific parameters. This was done on the BBBE project with a one-to-one D6 test span. Table 1 shows a differences of the p/t parameters between design assumptions and values determined during the test.

Table 1 Design and field values for friction losses and anchor set
表-1 摩擦係数およびセットロスの設計値および実測値

Parameter パラメーター	Design 設計値	Shop Drawing 施工図
Modulus of Elasticity 弾性係数 (MPa)	1.95×10^4	1.95876×10^4
Strand Area 鋼材断面積 (mm ²)	140	141.05
Wedge Setting 定着具のセット量 (mm)	9	Jack Loss : 2 ジャッキロス Anchor Loss : 4 定着ロス
Friction Coefficient μ PC鋼材とダクトの摩擦 μ (1/rad)	0.25	HDPE-duct (external) : 0.15 高密度ポリエチレン Flat metal duct : 0.15 平形鋼製シース Round metal duct : 0.20 円形鋼製シース
Wobble Factor β_{acc} . AASHTO PC鋼材とダクトの摩擦 β (1/m)	0.007	HDPE-duct (external) : 0.0007 高密度ポリエチレン Flat metal duct : 0.0021 平形鋼製シース Round metal duct : 0.0010 円形鋼製シース

(1) Excessive Elongations

The elongations measured during stressing are an indication for the average force in the tendon with a specific length. Unfortunately it is not possible to compute a definite value for the elongations since unpredictable losses and other influences during stressing will affect the calculated values. For that reason, the applicable codes define allowable tolerances. AASHTO only tolerates $\pm 5\%$ deviation from calculated values with a remark, that local authorities are allowed to tolerate $\pm 10\%$, if the group of tendons does not deviate more than $\pm 7\%$. For that reason, the allowable tolerance on the BBBE project was $\pm 5\%$ which was a demanding task for the stressing crews and quality assurance on site.

The record of elongations and the corresponding jack pressure

常に合理的なものであり、それ自体にプレストレスが導入されているものであった。プレストレスの影響が大きいため、架設荷自重に対して20 cmの下越しとし、すべてのセグメントを並べた状態(約1万5000 kN)で全体が水平になるようにした。

PC鋼材緊張時には、主桁が反り変形を生じることにより再び自重が作用する。今回のケースでは、全体の56%のプレストレスを導入した段階で支承への据付けを行った。

プレストレスの導入作業を容易にするため、プレストレスの導入は架設進行方向先端側より片引き緊張とした。架設中の主桁小口からはアクセスでき、障害物がない状態でプレストレス導入作業を行うことができた。隣り合う支間どうし(掛違い部での)の1 mの間詰め部への緊張作業は、厄介で時間を費やすものであった。

4.4 架設一品質保証に対する問い

一般に、設計段階において、プレストレスの損失量を計算するときに適用示方書の安全側の値を用いる。これは、特定の定着工法の各パラメーターが決定できないため、妥当である(通常、定着工法は後になって選定される)。施工図および緊張計画書を作成するために、各特性値が必要となる。大規模なプロジェクトでは、しばしば現場試験によりそれら特性値を決定することが認められている。BBBE プロジェクトでも、D6 セグメントのテストスパン試験が実施された。表-1は、定着工法に関する設計上の仮定と試験によって求められた値との比較を示したものである。

(1) 過大な伸び量

緊張時のPC鋼材の伸び量は、ある長さのPC鋼材の平均張力を示している。残念ながら、絶対的な伸び量を計算することは、緊張中の予想されない損失やその他の影響があるため、不可能である。このため、適用示方書では許容誤差を定義している。AASHTOでは、許容誤差を僅か $\pm 5\%$ としているが、その注釈において地方によってはグループでの偏差が $\pm 7\%$ 以下であれば、1本あたりでは $\pm 10\%$ の許容誤差を認めているとしている。このため、BBBE プロジェクトでは現場施工管理上の要求事項として品質保証のため $\pm 5\%$ を許容値とした。

伸び量および対応するジャッキ圧力は、緊張作業の管理

is recorded to control the stressing process and to document the required quality. In this regard, segmental construction is totally different from conventional post-tensioning applications since the initial closure of joints must be considered. If the elongations after the closure of the joints do not meet the target value, a few numbers should be checked. First of all it is helpful to consider the actual modulus of elasticity and the actual steel area of the particular strands. Depending on project specifications there are allowable material tolerances of up to $\pm 4\%$. Experience shows, that on a particular project, material parameters can vary easily within $\pm 2.5\%$. The consideration of actual parameters will already improve the theoretical elongations in a lot of cases.

If the recorded elongations still surpass computed values then this is an indication for:

- Failure of material (breakage of single strands)
- Intolerable friction losses due to damaged ducts or debris
- Unexpected wedge seating or complete failure of the passive anchor

(2) Insufficient Elongations

If the elongations during stressing falling short of the computed values, this is an indication of an insufficient prestressing in the section. A lift-off test at the stressing anchor can clarify whether the correct p/t force was applied or not. If the applied force is deficient, the designer must be consulted whether the situation is still satisfactory from his point of view. If the applied force is correct, unpredicted losses have occurred. But again, the consideration of specific material parameters will already solve a lot of problems.

4.5 The application of temporary prestressing

An often discussed problem regarding segmental construction is the time of joint closure during stressing. A conventional method is the application of temporary post-tensioning by means of p/t bars inside the box. The bars can be installed after the segments are placed and roughly aligned. The great advantage is the prior closure of joints before the final p/t force is applied. Hence, in this case an influence on the elongations is avoided.

The disadvantage of temporary prestressing during erection is obviously the amount of time consumed. Therefore, the D6 box girders on the BBBE project were placed without such temporary measures. The great advantage for the construction progress was on the other hand a challenge for the stressing crews. Since the segments were only aligned on the launching truss, not fully closed joints made it very difficult to control the elongations. The bowing effect and differential creep and shrinkage of the rather slender segments induced further problems. On site, a most joints could not be closed thoroughly without the application of longitudinal post-tensioning.

および要求品質を文書化するため、記録される。この点において、セグメント橋の施工はセグメント継目の閉合を考慮しなければならないため、従来のポストテンション方式と異なる。もし、セグメント継目閉合後、PC鋼材の伸び量が目標値に合致しない場合、何本かをチェックしなければならない。何よりも、実際の弾性係数やPC鋼材断面積を調べることが有用である。プロジェクトの仕様によっては、材料に対して最大 $\pm 4\%$ の許容差を認めている。経験的には、材料定数は容易に $\pm 2.5\%$ の許容誤差内に収まっている。実際のパラメーターは、多くのケースの伸び量から、理論的な伸び量を補正することとなる。

もし、記録された伸び量が計算値よりも大きい場合には、以下のことが考えられる。

- 材料の破壊（素線の断裂）
- ダクトの損傷または異物による許容範囲を超えた摩擦損失
- 予期しないウェッジのめり込みあるいは定着具の完全な破壊

(2) 不十分な伸び量

もし、緊張中にPC鋼材の伸び量が十分でない場合、断面に対して不十分なプレストレスであることの徴候である。定着部におけるリフトオフ試験（ウェッジが定着具から離れるときの張力を計測する試験）により、正しいプレストレスが導入されているかどうかを明らかにすることができる。もし、導入張力が不十分な場合、設計者はその状態で十分かどうかを検討しなければならない。もし、導入緊張力が正しい場合、予期しないプレストレスの損失が生じているということになる。しかし、再三ながらそれぞれの材料定数を検討することは、すでに多くの問題を解決してきている。

4.5 仮プレストレスの導入

セグメント橋に関して、プレストレス導入時のセグメント継目の閉合時期についてしばしば議論される。従来の手法では、箱桁内のPC鋼棒により仮プレストレスを導入していた。PC鋼棒は、セグメントを並べた後に挿入される。この手法の大きな利点は、最終的なプレストレスが導入される前に継目を閉じさせることができる点である。このため、伸び量への影響は防止することができる。

架設時に仮プレストレスを導入することの不利な点は、明らかに時間を要する点である。そのため、BBBEプロジェクトのD6セグメントを用いた箱桁橋では、そのような仮プレストレスは採用しなかった。工程上の利点は、プレストレス導入作業においては課題となった。セグメントが移動トラス上に並べられるだけなので、完全に閉じていない継目により伸び量の管理を行うことが困難となる。かなりスレンダーな主桁の反り変形とクリープ・収縮差がさらに問題を生む。現場において、ほとんどの継目は主方向プレストレスを導入しない状態で完全に密着することはなかった。

While an initial p/t force of 100 bar is more than sufficient in conventional applications and segmental construction with temporary stressing measures, this initial stress has proved not to be sufficient to control the joint closure without temporary stressing. An initial force of 100 bar would be sufficient to take the slag out of the tendons but resistant joints can withstand this pressure. These joints will then influence the calculated elongations in a negative way, since they are only closing during the record of elongations. In order to overcome this problem, tests were performed and finally a new initial p/t sequence was designed. According to this new method up to 10 out of a maximum of 20 tendons were stressed up to 250 bar without registering elongations. Then the first tendon in row was stressed up to the final force with recorded elongations. With this method, obviously it is not possible to control the affected tendons during the first 250 bar but the relatively small force and the small likelihood of serious blocks along the tendon justify this approach. Once this method was introduced the theoretical elongations could be matched correctly.

5. Conclusion

Construction is considered a conservative industry but there are high-tech applications as well. Segmental construction in association with external post-tensioning is without doubt an example for that. Successful projects of such nature require extensive experience and technical know how but the results achieved with this construction technique are unsurpassed.

10.0 N/mm² 注4) の初期プレストレスは、従来のプレストレス導入法およびセグメント橋では十二分なものであったが、この初期応力では仮プレストレスなしには、継目の閉合の管理に関して不十分であることが分かった。10.0 N/mm² の初期緊張力は、PC鋼材のたるみを除去するのに十分であるが、継目の抵抗により十分に閉じることはできなかった。これらの継目は、伸び量を記録中のみ閉じるため、計算伸び量に表面的に現れないかたちで影響してくる。この問題を解決するため、試験を実施し、最終的に初期緊張力導入方法が新たに決定された。この新方式では、20本中最大10本のPC鋼材を25.0 N/mm²を上限値として導入することとし、伸び量はこの間記録しないものとした。そして、最初のPC鋼材を最終張力まで緊張し、伸び量を記録した。この方法により、最初の25.0 N/mm²の緊張力が与えられている間、その影響を受けるPC鋼材の管理を行うことは明らかに不可能であるが、仮プレストレスの導入レベルが低いいため、この方法は妥当なものと考えられる。この方法を伸び量の理論値に反映させたところ、実測値とよく一致させることができた。

5. 結 論

建設業は、保守的な産業であるが、他産業同様に高度な技術が存在する。外ケーブルを用いたセグメント橋は、紛れもなくそうした事例の一つである。高度な技術を要するプロジェクトにおいて成功するには、更なる経験と技術的ノウハウが要求される。現在のところ、外ケーブルとドライジョイントのセグメント工法との組合せは、最高の建設技術の一つであると考えられる。

注4) 原文では100barとあるが、邦訳にはSI単位系に換算した値を示した。なお、この圧力は著者に確認したところ、ジャッキ圧力(マンメーターの数値)を示しているとの回答を得た。

Literature / 参考文献

- 1) Brockmann, Rogenhofer : Bang Na Expressway, Bangkok, Thailand - World's Longest Bridge and Largest Precasting Operation, in PCI-Journal, Vol. 45, Jan/Feb 2000, No.1, pp. 26~38
- 2) Muller, Podolny : Construction and Design of Prestressed Concrete Segmental Bridges, New York u. a. 1982
- 3) Roberts, Breen, Kreger : Measurement Based Revisions for Segmental Bridge Design and Construction Criteria, Resaerch Report 1234-3F, University of Texas, Austin 1993
- 4) Borkenstein, Brockmann, Fischer, Oliver : The Bang Na - Bang Pli - Bang Pakong Expressway Design and Test Loading of a Precast Segmental Bridge Structure, in: Taiwan Construction Research Institute (ed.) : 1999 Bridge Construction Automation Seminar, Taipei, Taiwan 1999, pp. 37~59
- 5) AASHTO (American Association of the State Highway and Transportation Officials, ed.) : Guide Specifications for Design and Construction of Segmental Concrete Bridges, Sixteenth Edition, Washington 1996

[received 19, Jul. 2001]

[2001年7月19日受付]

訳者あとがき

本稿は、BBCD JVのプロジェクトマネージャーであった現ドイツ・応用科学大学教授 Christian Brockmann 氏と Bilfinger+Berger Vorspanntechnik 社 国際事業部 テクニカルマネージャー (技師) の Steffen Springer 氏が本誌に投稿されたものである。

これまで両氏が経験された多くのプロジェクトを通して、BBBE プロジェクト注1)を中心に外ケーブルを用いたプレキャストセグメント橋に関して平易に述べられたものである。

なお、わが国とは事情が異なる点もあるが、テストスパン試験による上越し管理や引寄せ鋼棒を用いない施工管理など、参考とすべき点も少なからずあるのではないと思われる。

最後に、本誌への投稿ならびに好意的に資料提供いただいた両氏に、この場をお借りして謝意を表したい。

【秋山 博(榊高組 土木本部技術部)】