

カンボジアにおける自己充填コンクリートを用いた高強度 PC 桁の

製作と応力緩和の検討

米田 大樹・VONG Seng*¹・大内 雅博*²・島 弘*²・原 夏生・三島 徹也*³

Production and Examination of Prestress loss of Precast Prestressed Concrete Bridge Girder Using Self-Compacting Concrete in Cambodia

Taiju YOEDA, VONG Seng, Masahiro OUCHI, Hiroshi SHIMA, Natsuo HARA, Tetsuya MISHIMA

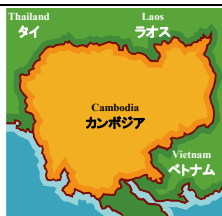


図-1 カンボジアの地図



写真-1 崩壊した橋梁⁴⁾

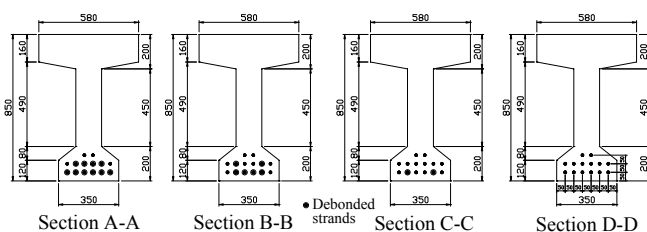


図-2 カンボジアに最適な標準 PC 桁形状の提案

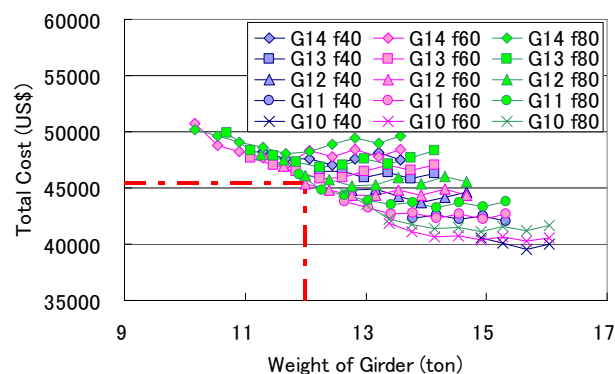


図-3 PC 桁の重量とコストの関係

研究の目的

内戦後のカンボジアは、復興のための社会基盤整備事業に、先進各国から多くの援助を受けている。しかし、カンボジアは、独自の基準や指針を持っておらず、事業遂行のためには援助提供国の基準や指針に従わなければならない。そして、このことがカンボジアを含む発展途上国にとって、自立的発展の障害となっていることが指摘されている。そこで、カンボジア復興に必要な人材と技術の開発について、高知工科大学とカンボジア工科大学は共同で、人材と技術開発の統合システムの構築を進めている。本稿は、上記プロジェクトの一環として実施したカンボジアに最適な PC 桁の提案と、その確認のために行ったスパン 20m の実物大 PC 桁をカンボジアにて製作した状況を報告するものである。

技術の説明

発展途上国における人材と技術開発の統合システム構築プロジェクトの一部として、スパンが 15m～20m 程度の小規模橋梁を対象とし、低コストで耐久性が高く、未熟練労働者が施工可能であり、またカンボジア全体で早急に架け替え可能な橋梁形式について検討を行った。さらに、将来の PC 桁量産を想定し、カンボジア現地での実物大 PC 桁の製作と応力緩和についての検討を行った。

主な結論

- (1) カンボジアの小規模橋梁の架け替えについて、現地条件に最適な橋梁形式として自己充填コンクリート (SCC) を用いたプレテンションタイプのプレキャスト桁 (PC 桁) を採用し、形状と設計手法を提案した。
- (2) カンボジア現地で調達可能な材料を用いて、SCC を用いた PC 桁を製作可能なことを示した。また、PC 桁製作にあたり、日本の品質管理手法を導入した。
- (3) 実物大の PC 桁の応力緩和について計測を行い、計測による収縮ひずみが提案設計手法によるひずみの計算結果よりも小さく、安全側の設計であることを確認した。

* 1 INSTITUTE of TECHNOLOGY of CAMBODIA

* 2 高知工科大学 社会システム工学科

* 3 本店 TPM プロジェクト推進室

カンボジアにおける自己充填コンクリートを用いた 高強度PC桁の製作と応力緩和の検討

米 田 大 樹 VONG Seng^{*1}原 夏 生 大 内 雅 博^{*2}三 島 徹 也^{*3} 島 弘^{*2}

要 旨

内戦後のカンボジアは、復興のための社会基盤整備事業に、先進各国から多くの援助を受けている。しかし、カンボジアは、独自の基準や指針を持っておらず、事業遂行のためには援助提供国の基準や指針に従わなければならない。そして、このことがカンボジアを含む発展途上国にとって、自立的発展の障害となっていることが指摘されている。そこで、著者らは、現地の状況に適したカンボジア独自のPC桁の設計手法と形状を提案した。さらに、上記設計手法による自己充填コンクリートを用いた実物大PC桁をカンボジア現地で製作し、現地気候条件下における実物大PC桁のクリープ性状についての計測を行った。その結果、提案形状の実物大PC桁の応力緩和は、提案設計手法によって安全側に設計可能であること、ならびに、自己充填コンクリートを用いたPC桁をカンボジア現地で大量生産できることを確認した。

なお、本稿は、著者らがThe International Symposium on Social Management Systems (IMSM2007)にて発表した内容を、研究所報用に再編集したものである。

キーワード プレストレストコンクリート／プレキャスト／PC桁／自己充填コンクリート／SCC

目 次

- | | |
|--------------------|--------------|
| 1. はじめに | 4. 実物大PC桁の製作 |
| 2. 途上国の自立的発展に関する課題 | 5. 応力緩和の計測結果 |
| 3. カンボジアの復興 | 6. まとめ |

PRODUCTION AND EXAMINATION OF PRESTRESS LOSS OF PRECAST PRESTRESSED CONCRETE BRIDGE GIRDER USING SELF-COMPACTING CONCRETE IN CAMBODIA

Taiju YONEDA
Natsuo HARA
Tetsuya MISHIMA

VONG Seng
Masahiro OUCHI
Hiroshi Shima

Synopsis:

Cambodia post civil war has demanded immediate rehabilitation of infrastructure including hundreds of bridges and road network for revival and development of economy. To make it possible to produce required human resources and technology domestically in Cambodia, Kochi University of Technology (KUT), Japan and Institute of Technology of Cambodia (ITC), Cambodia have established collaboration to implement "Integrated System for Human Resources and technology Development in Cambodia". Under this collaboration, the authors have developed a design method and shapes of the PC girder which are appropriate for the Cambodian local situation. Further, a PC girder specimen of 20 m span using SCC was produced in Phnom Penh, Cambodia. The success of the specimen production has shown the possibility of mass production of high strength PC girder in Cambodia to achieve quick rehabilitation of the existing bridges as well as development of new infrastructures. This paper provides the design method, imported and local materials used for producing SCC, required quality and cost management, design mix proportion and creep used for production of the PC girder in Cambodia.

* 1 INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF CAMBODIA * 2 高知工科大学 社会システム工学科 * 3 TPM プロジェクト推進室

1. はじめに

1.1 カンボジアの地理と歴史

カンボジアは、東南アジアに位置する国であり、ラオス、ベトナム、タイ、シヤム湾に囲まれている（図-1）。人口の約 93%をクメール人が占める小乗仏教の国であり、8 世紀～14 世紀のアンコール朝時代には、アンコール・ワットやバイヨンなどの大石造寺院を数多く建造している。1863 年にフランスと保護条約を結んでフランスの支配下に入ったが、第二次世界大戦後の 1953 年にフランスから独立した。

カンボジアは、典型的な農業国であり、1960 年代は食料自給を達成する一方、米やゴムなどの作物を輸出していた。しかし、1970 年のクーデターから 20 年に及ぶ内戦と政治的混乱により、インフラは破壊され、経済は壊滅状態に落ち込んだ。1991 年のパリ和平協定によって内戦は終結し、1993 年の国連（UNTAC）による総選挙で「カンボジア王国」として再出発することとなった。1998 年及び 2003 年の総選挙を経て、現時点では安定した政権運営が行われている^{1),2),3)}。

1.2 カンボジアの現況

(1) インフラ

カンボジアでは 1960 年代から近代的な道路網の整備が行われていた。しかし、1970 年代に勃発し、以後 20 年間に及んだ内戦は、これら道路網だけでなく、情報通信、発電施設、上下水道といった多くの社会基盤も破壊した。また、破壊を免れたものについても十分な維持管理が行われず、長期間放置されてきたために、老朽化が進んでいる。さらに、1991 年のパリ和平協定以降は、交通量の急激な増加とトラックの過積載によって、多数の橋梁が崩壊している⁴⁾（写真-1）。

(2) 教育システム

1970 年代後半のポル・ポトによるクメール・ルージュ（民主カンボジア）政権下では、自国民の大量虐殺が行われ、特に知識層に対して粛清が集中的に行われた⁵⁾。この知識人への粛正や教育システムの破壊、またその後の内戦のため、カンボジアでは基礎教育が国民へ広く行き渡っていない。一方、1980 年代のカンボジアは、旧ソ連を中心とする社会主義諸国からの援助を受けていたため、カンボジア工科大学を始めとする高等教育機関はロシア語で書かれた教科書を使用するなど、旧ソ連の影響を強く受けていた。しかし、旧ソ連の崩壊により、高等教育は再び旧宗主国であるフランスの影響を強く受けるようになり、そして近年は、オーストラリアからの援助で英語による講義が行われている。このように、カンボジアの高等教育は、先進各国の支配言語をめぐる戦略的な援助政策の下で混乱が続いている⁶⁾。



図-1 カンボジアの地図



写真-1 崩壊した橋梁⁴⁾

(3) カンボジアの復興

現在、フランス、オーストラリア、アメリカ、日本などの先進国からの政府開発援助（通称 ODA）とカンボジア政府によって、荒廃した国の復興が進められている⁷⁾。これら先進各国からの援助は、内戦で埋設された地雷の除去だけでなく、道路や上下水道などの整備も行われている。さらに、オーストラリアからの ODA では、橋梁などを建設するための設計指針が整備された。このように、復興は、カンボジア政府の努力と多くの支援によって行われており、現在の首都プノンペンには先進国の都市と比較しても遜色のないほどのにぎわいを見せている。しかし、プノンペンの郊外へ足を伸ばせば、内戦の傷跡と貧困が未だ広がっている。

(4) 復興への課題

一般的に、ODA 等の援助で個々の小さい案件に対応することは難しく、ある程度規模の大きい援助とならざるを得ない。その結果、カンボジアに限らず発展途上国の多くで、大きな橋が援助によって整備される一方、その橋へ至る道路の橋が壊れたままという場合も少なくない。現在、カンボジアには、架け替えが必要とされているこのようなスパン 15m～20m 程度の小さな橋が約 20000 橋存在すると言われている⁴⁾。したがって、今後、カンボジアの真の復興のためには、人々の生活と密着した多数の小規模橋梁を修復し、交通ネットワークとして復興しなければならない。

また、高等教育政策の混乱は、カンボジアの戦後復興・開発を担う人材不足の原因となっている。したがっ

て、基礎教育の拡充と共に、高等教育政策の安定が求められている。

1.3 本論文の構成

本研究は、2章にて詳細を述べる発展途上国における人材と技術開発の統合システム構築プロジェクト^{8),9)}の一部を構成するものである。そして、本稿は、このプロジェクトの一部として実施したカンボジア復興のためのプレテンションタイプのプレストレストコンクリート桁（PC桁）を用いた橋梁の復興プロジェクトの提案、および実際にカンボジアでPC桁を製作した状況について報告するものである。

2章では、発展途上国における人材と技術開発の統合システム構築プロジェクト^{8),9)}について説明し、本研究の位置づけを示す。3章では、著者らの提案するカンボジアの復興に最適なPC桁について述べる。4章では、将来、カンボジア現地での量産を想定して実施した、自己充填コンクリートを用いた実物大の高強度PC桁の製作について報告する。5章では、4章にて述べた実物大の高強度PC桁の収縮を計測し、カンボジアの現地環境下におけるプレストレストの緩和が、著者らの提案した設計手法にて最適かつ安全であったことを報告する。

2. 途上国の自立的発展に関する課題

本章では、草柳とRajendra Niraulaが提案する発展途上国における人材と技術開発の統合システム構築プロジェクト^{8),9)}について説明し、本研究の位置づけを示す。なお、本プロジェクトの詳細は、参考文献^{8),9)}を参照されたい。

2.1 技術移転型開発援助

カンボジアに限らず発展途上国の多くが先進各国から多額の援助を受けているにも関わらず、日本の明治維新、そして第二次世界大戦後の復興のような自立的発展を遂げることができていない。その理由として、Rajendra Niraulaは、復興に関するインフラ整備などの仕事が現地技術者によって行われておらず、援助提供国の技術者が援助提供国の基準と施工方法に従って実施していることが原因であると指摘している⁸⁾。すなわち、カンボジアを含む発展途上国の自立的発展のためには、基礎教育から高等教育までを含む教育システム全体の復興と同時に、自国の復興に関する仕事を通じて現地技術者の育成することが重要なのである。

その考えに基づき、現在、高知工科大学とカンボジア工科大学は、教育・研究協定結び、途上国の技術者を育成し、自立的な発展を実現するための人材と技術開発の統合システムの構築プロジェクトを進めている（図-2）⁹⁾。すでに、カンボジア工科大学において、本構想に基づくNPO（非営利組織）の設立と、活動の準備が開始されている¹⁰⁾。



図-2 発展途上国の大学と先進国の大学による大学間教育・研究協定

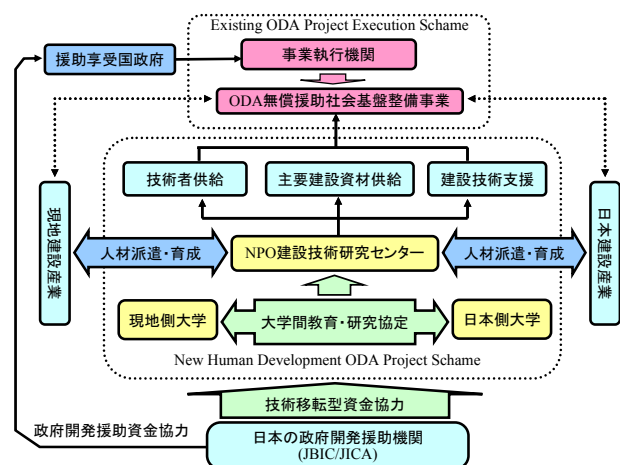


図-3 発展途上国における人材と社会資本開発の統合システム⁸⁾

人材と技術開発の統合システムにおけるNPOの役割を図-3に示す。途上国に設立されたNPOは、途上国のインフラ整備に対して「人材の育成と供給」、「主要資材の製造と供給」、「技術支援」を行う。これらの業務が有償で実施されることでNPOの活動資金となり、途上国の継続的、自立的技術の確立に繋がる仕組みとなっている。将来的にはNPOから各種の建設関係の会社が独立し、現地建設産業のすそ野を広げていくことが期待される。例えば、現在のカンボジアのように、ODAで対応しにくい短スパンの橋の架け替えニーズが多数存在する場合には、このNPOが一括してODAの受け皿となり、現地技術者と企業を育成しながら、小規模橋梁の復旧を進めていくモデルが考えられる。

逆に、大規模な橋梁建設のような既往のODAで実施可能なものについては、本プロジェクトの対象外であり、先進国の戦略的援助による設計・施工指針に基づいて整備が行われる。しかし、高等教育を受けた技術者の充実度、熟練労働者の不足、気候風土など、発展途上国と先進国の違いを考慮すれば、先進国によって整備された設計・施工指針が発展途上国にとって最適なものであるとはいえない。また、Rajendra Niraulaが指摘するように、

途上国の自立的発展の観点からも、設計・施工指針は発展途上国現地の人間の手によって整備されることが望ましい。したがって、将来的には、大規模橋梁の建設についても、現地条件に最適な設計・施工指針が整備できるよう発展途上国の大学と NPO は、公平な第三者としての立場を維持しながら、国の発展状況に合わせて統合システム構築プロジェクトを進めることになる。

2.2 カンボジアへの適用

海外の一般的な建設プロジェクトでは、日本の建設プロジェクトと異なり、発注者、施工業者、専門技術者集団（コンサルタント）の間には三者構造が構築されることが多い^{11),12)}。そして、三者構造を基本としつつも、設計照査システムと契約形態は、国ごとに最適な形態が採用されている¹³⁾。

現在のカンボジアでは、技術力のある現地施工業者やコンサルタントは育っていないため、三者構造を形成できない。そこで、上記で述べた発展途上国における人材と社会資本開発の統合システム^{8),9)}と三者構造によるプロジェクトの執行形態をカンボジアの状況に当てはめると、図-4 のような関係になる¹⁴⁾。この場合、カンボジア工科大学内に設立された NPO 自身が、この三者構造の中でコンサルタントの役割を演じることとなる。また、副次的な効果として、カンボジア工科大学内に設立された NPO は、学生にとって実際のプロジェクトを通じた実務を学ぶ場にもなるのである。さらに、NPO の運営が有償で行われることで、カンボジア工科大学の財政を安定化させ、先進国の支配言語をめぐる戦略的援助による混乱からカンボジアの高等教育を守る役割もするのである。

将来、経済の復興と共に、この NPO からカンボジア人技術者や各種企業が育ち、コンサルタント業務をそれらの企業が行うようになると考えられる。一方、現地企業とカンボジア工科大学は共同研究や情報交換、学生の実務の実践の場、そして雇用の創出を行うのである。

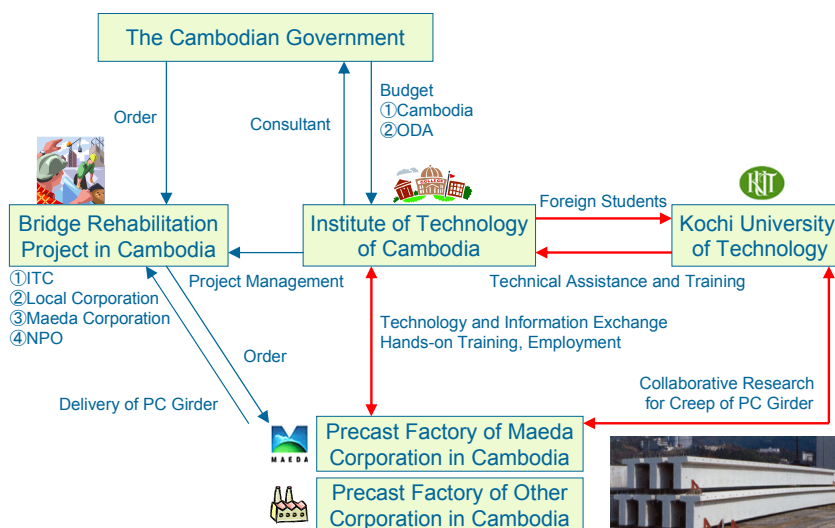


図-4 カンボジアにおける技術移転型開発援助の関係¹⁴⁾

3. カンボジアの復興

現在のカンボジアは、現行の ODA で対応しにくい短スパンの橋梁を多数架け替えなければならない問題に直面している。そこで、本章では、カンボジアの現地条件について調査し、短スパン橋梁の架け替えについて、現地条件に最適な手法の提案を行う。

3.1 橋梁形式の決定

カンボジアで建設されたこれまでの橋梁は、写真-2 と写真-3 に示すような鋼橋とスパン 5m 程度の鉄筋コンクリート構造の橋、木橋がほとんどであった⁴⁾。鋼橋や木橋は、施工が容易で工期が短いという優位性を持つ反面、十分な補修と維持管理の体制が整っていない現在のカンボジアでは、およそ 5 年で朽ちてしまう。さらに、鋼材自体と腐食防止用塗料の全てを輸入に依存するカンボジアにおいて、鋼橋や木橋は高コストな橋梁形式といえる。一方、鉄筋コンクリート製の橋であれば、鋼橋よりも少ないメンテナンスでよく、耐久性や維持管理も含めたライフサイクルコスト面で優位性がある反面、スパンが短い、工期が長い、資材が多くなる、熟練労働者が不足しているといった問題が存在する。このような現在のカンボジアの条件の下では、鋼橋のような施工性の良さと鉄筋コンクリートのような維持管理の容易な橋梁形式として、プレキャスト部材であるプレストレストコンクリート桁（PC 桁）が最適であると考えられる。さらに、現場の作業と品質管理業務を削減できること、およびプレストレス導入用のウェッジ（くさび）が再利用可能である

表-1 橋梁の種類と特徴

種類	コスト	施工性		耐久性
		熟練度	施工速度	
木橋	○	○	○	×
鋼橋	×	○	○	×
RC橋	○	×	×	○
PC橋	○	○	○	○
	△	△	○	○



写真-2 鋼製の橋梁⁴⁾



写真-3 RC製の橋梁⁴⁾

ことを考慮すれば、PC 桁はプレテンションタイプが最適である（表-1）。

一般的に、PC 桁は工場で生産されるため、工場と施工現場間の運搬を考慮しなければならない。日本を含めた先進国で一般的に使用されている PC 桁の重量は、1 本あたり 20 トン程度である。しかし、写真-4 に示すように、現在のカンボジアの道路事情では、重量物を運搬することは難しく、また、大型の揚重機やトラックを導入する予算も無い。そこで、カンボジアの道路事情より、PC 桁 1 本あたりの目標重量を 12 トンとした。この重量制限に対応するためには、PC 桁を軽量化しなければならない。そこで、図-5 下図に示すように、PC 桁の断面を小型化し、本数を増やして対応することにしたのである。

上記のような PC 桁断面の小型化のためには、コンクリートの高強度化と導入プレストレスの増大が必要である。そこで、熟練労働者が不足している現在のカンボジアにおいて高強度のコンクリートを使用するため、締め固めの不要な自己充填コンクリート（SCC）を採用することとした。また、導入プレストレスの増加に対しては、現地環境条件に最適な乾燥収縮とクリープによる応力緩和モデルを採用し、その計算値と実物大試験体の計測によって、安全性を確認することとした。

カンボジアにおける SCC を用いた実物大 PC 桁の製造と応力緩和に対する検討は、3 章および 4 章にて詳細を述べる。

3.2 気候条件

カンボジアは、高温多湿な熱帯モンスーン気候に属し、1 年は雨季と乾季に分かれている¹⁵⁾（図-6）。先進国の代表的な都市の年平均気温と年平均相対湿度の関係を図-7 に示す。気温と湿度はコンクリートの乾燥収縮とクリープに大きな影響を与える。したがって、カンボジアに最適な PC 桁を設計するためには、現地の気候条件に適した乾燥収縮とクリープのモデルを採用しなければならない。乾燥収縮とクリープのモデルについては、多くの研究者によって実用的な予測式が提案されているが、気温と湿度の影響を同時に考慮可能なものは少ない¹⁶⁾。そこで、今回の PC 桁の設計にあたっては、乾燥収縮とクリープに気温と湿度の影響を共に考慮可能な CEB-FIP1990 モデルコード¹⁷⁾を採用することとした。例として、気候条件の違いが乾燥収縮ひずみとクリープ係数に与える影響について、CEB-FIP-1990 モデルコード¹⁷⁾による計算結果を図-8 と図-9 に示す。

CEB-FIP-1990 モデルコード¹⁷⁾による乾燥収縮ひずみは、式 [1] ～式 [9] で表される。

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s, T) = \varepsilon_{cs0} \cdot \beta_s(t - t_s) \quad [1]$$

$$\varepsilon_{cs0} = \varepsilon_s(f_{cm}) \cdot \beta_{RH, T} \quad [2]$$



写真-4 一般的なカンボジアの道路事情

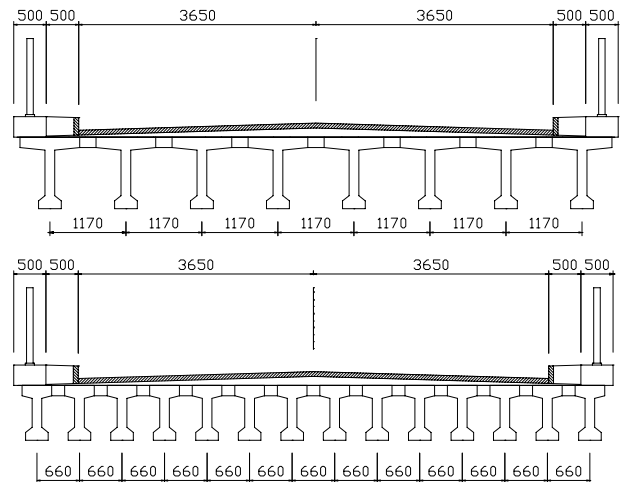


図-5 PC 桁の橋の基本コンセプト

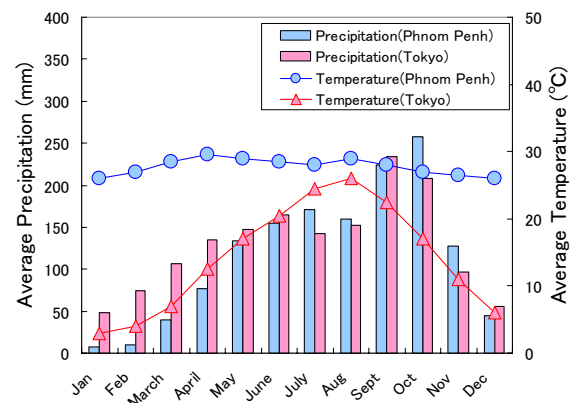


図-6 プノンペンと東京の平均気温と降水量¹⁵⁾

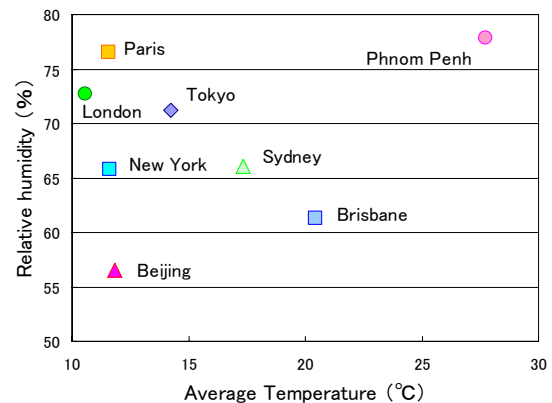


図-7 各都市の気温-湿度の関係¹⁵⁾

$$\varepsilon_s(f_{cm}) = \{160 + \beta_{sc}(90 - f_{cm})\} \times 10^{-6} \quad [3]$$

$$\beta_{RH,T} = \beta_{RH} \cdot \beta_{sT} \quad [4]$$

$$\beta_{RH} = 1.55 \left\{ 1 - \left(\frac{RH}{100} \right)^3 \right\} \quad [5]$$

(ただし, $40\% \leq RH < 99\%$ の場合)

$$\beta_{sT} = 1 + \left(\frac{8}{103 - RH} \right) \left(\frac{T - 20}{40} \right) \quad [6]$$

$$\beta_s(t - t_s) = \left[\frac{(t - t_s)}{\alpha_{sT}(T) + (t - t_s)} \right]^{0.5} \quad [7]$$

$$\alpha_{sT}(T) = 0.035 h_0^2 \cdot e^{-[0.06(T-20)]} \quad [8]$$

$$h_0 = \frac{2Ac}{u} \quad [9]$$

ここに, $\varepsilon_{sh}(t, t_s, T)$: 乾燥収縮ひずみ, ε_{cs0} : 乾燥収縮ひずみの最終値, $\beta_s(t - t_s)$: 乾燥収縮ひずみの経時変化特性を表す項, t : 材齢 (日), t_s : 乾燥開始材齢 (日), f_{cm} : 28 日圧縮強度 (N/mm²), β_{sc} : セメント種類によって定まる係数 (低熱セメント=4, 普通または早強セメント=5, 早強型高強度セメント=8), RH : 相対湿度 (%), h_0 : 部材の仮想厚さ (mm), A_c : 部材の断面積 (mm²), u : 外気に接する部分の周長 (mm), T : 気温 (°C) である.

CEB-FIP-1990 モデルコード¹⁷⁾によるクリープ係数は, 式 [10] ~ 式 [22] で表される.

$$\phi(t, t_0, T) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) + \Delta\phi_{T,trans} \quad [10]$$

$$\phi_0 = \phi_{RH,T} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \quad [11]$$

$$\phi_{RH,T} = \phi_T + (\phi_{RH} - 1) \cdot \phi_T^{1.2} \quad [12]$$

$$\phi_T = e^{0.015(T-20)} \quad [13]$$

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH/100}{0.10 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \quad [14]$$

$$\beta(f_{cm}) = 16.8 / \sqrt{f_{cm}} \quad [15]$$

$$\beta(t_0) = 1 / (0.1 + t_0^{0.2}) \quad [16]$$

$$\beta_c(t - t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{\beta_{H,T} + (t - t_0)} \right]^{0.3} \quad [17]$$

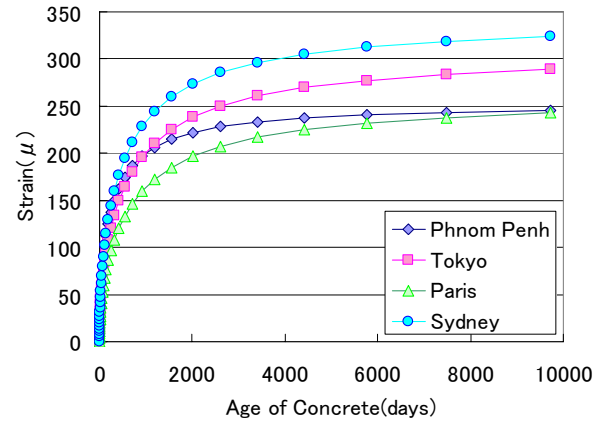


図-8 乾燥収縮ひずみの計算値

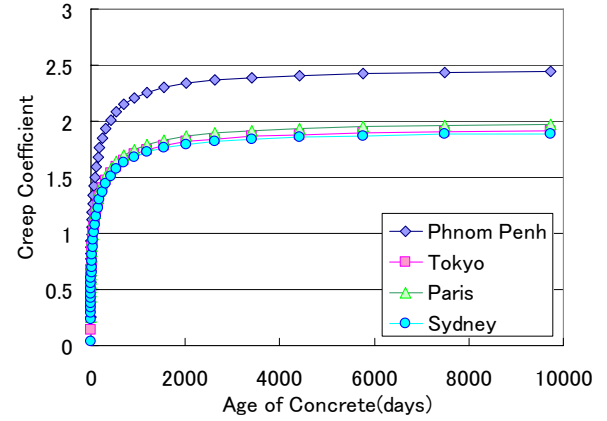


図-9 クリープ係数の計算値

$$\beta_{H,T} = \beta_H \cdot \beta_T \quad [18]$$

$$\beta_H = 1.5 \cdot \left[1 + (0.012 \cdot RH)^{18} \right] \cdot h_0 + 250 \quad [19]$$

(ただし, $\beta_H \leq 1500$)

$$h_0 = \frac{2Ac}{u} \quad [20]$$

$$\beta_T = \exp[1500 / (273 + T) - 5.12] \quad [21]$$

$$\Delta\phi_{T,trans} = 0.004(T - 20)^2 \quad [22]$$

ここに, $\phi(t, t_0, T)$: 材齢 t_0 (日) で載荷した材齢 t (日) でのクリープ係数, ϕ_0 : 終局クリープ係数, $\beta_c(t - t_0)$: 時間に依存するクリープの進行を表す係数, RH : 相対湿度 (%), f_{cm} : 28 日圧縮強度 (N/mm²), h_0 : 仮想部材厚, A_c : 部材の断面積 (mm²), u : 外気に接する部分の周長 (mm), T : 気温 (°C) である.

図-8 と図-9 の計算結果でわかるように, カンボジアの気候条件下では, 先進国の代表的な都市と比較してクリープが大きくなるため, PC 桁の応力緩和が大きくなる. したがって, 初期のプレストレスの導入を大きくしなければならないのである.

3.3 交通状況

1991 年のパリ和平協定以降の経済の復興により、現在のカンボジアでは交通量が急激に増加している。さらに、トラックの過積載の影響もあり、橋梁の崩壊が多数報告されている。カンボジアの公共事業運輸省は、トラックの過積載による危険防止のため、重量制限に関する法律を整備したが、ほとんど効果がでない⁴⁾。

経済性と安全性を兼ね備えた道路橋を設計するためには、その構造物が供用される期間の交通量や通行車両の構成、最大荷重等を適切に考慮した交通荷重モデルを決定する必要がある。また、将来の経済発展に伴う交通量の増加も考慮しなければならない。図-10 は、各国の基準における活荷重による設計曲げモーメントと支間長（スパン）の関係を示したものである¹⁸⁾。この中で、日本の基準は他国の基準に比べて比較的経済的な値を用いており、さらに交通荷重による橋梁の崩壊といった重大な事故も報告されていない。そこで、カンボジアの交通荷重モデルについては、日本の道路橋示方書¹⁹⁾に示される活荷重モデルを採用することとした。道路橋示方書¹⁹⁾では、基幹的な道路網を形成する橋の設計に用いる B 活荷重と、その他の橋の設計に用いる A 活荷重が設定されている。そして、B 活荷重および A 活荷重のそれぞれにおいて、T 荷重（図-11）と L 荷重（図-12）のうち不利な応力状態を与える荷重で設計するとしている。

3.4 断面形状の決定

これまでに述べてきたカンボジアの条件において、コストが最小となる標準的な PC 桁の形状を決定するため、道路の幅員等の条件を統一して、PC 桁の本数、コンクリート強度、断面寸法をパラメータとしてコスト比較を行った（図-13）。図-13 の凡例において「G-14 f40」とは、コンクリート強度 40MPa の PC 桁 14 本用いた場合のコストを示している。また、各断面寸法の違いは、横軸の PC 桁 1 本あたりの重量（PC 桁の幅と高さ）によって示される。このコスト比較の結果、カンボジアに最適な標準的 PC 桁の形状として、重量制限の 12t 時にコストが最小となる「G-12 f60」の断面形状を選択したのである（図-14）。

3.5 付着コントロール

PC 桁軽量化のためには、断面の小型化とプレストレスの増加が必要である。一方、PC 桁運搬時のように、両端支持以外の支持条件となった時の安全性の観点からは、必要以上に曲げモーメントが発生するようなプレストレスの導入は避けることが好ましい。

一般的に、プレストレスは、死荷重と活荷重によって生じる引張応力を打消すように導入される。すなわち、曲げモーメントの分布に合わせるように、編芯位置においてプレストレスを導入できれば効率的である。そこで、

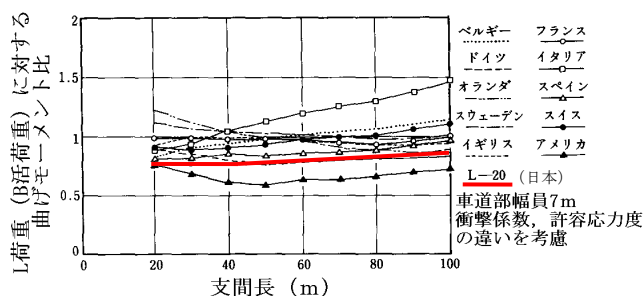


図-10 活荷重による設計曲げモーメントの比較¹⁸⁾

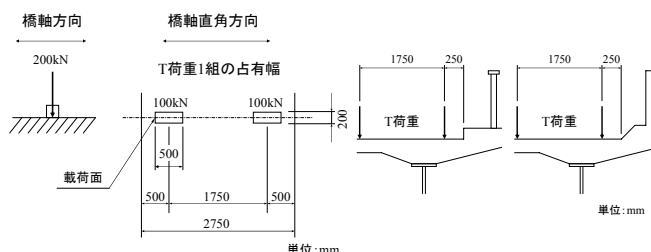


図-11 T 荷重と載荷位置¹⁹⁾

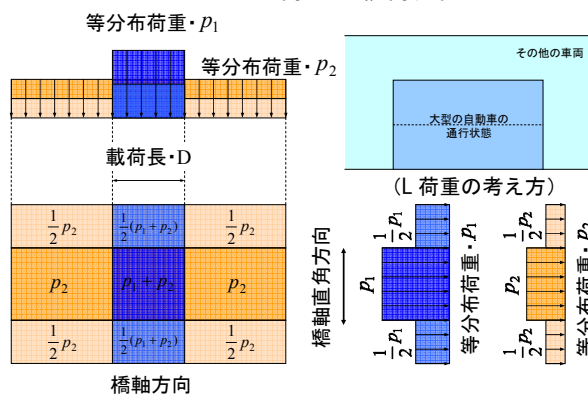


図-12 L 荷重¹⁹⁾

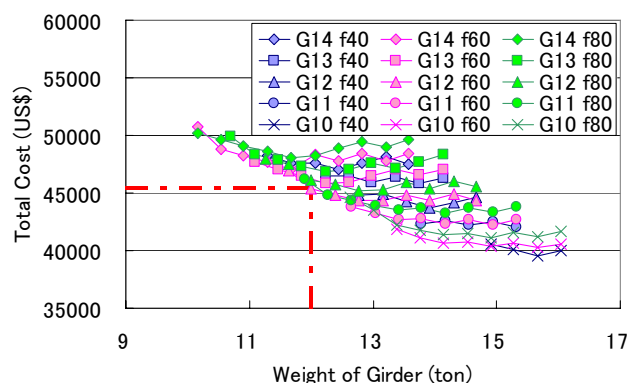


図-13 PC 桁の重量とコストの関係

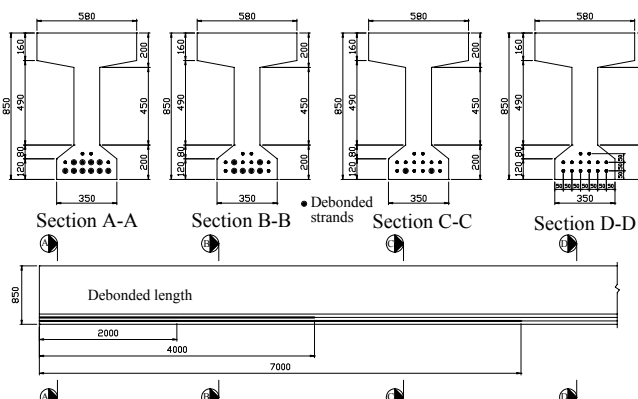


図-14 カンボジアに最適な標準 PC 桁形状

桁端から 2000mm, 4000mm, 7000mm の位置において、図-14 の上段に示す A-A 断面, B-B 断面, C-C 断面のように PC 鋼線の付着を切ること、プレストレスによる曲げモーメントの発生をコントロールすることとした（図-14）。

4. 実物大 PC 桁の製作

4.1 材料の調達

PC 桁の製作コストを抑えるためには、可能な限り現地で調達できる材料を用いることが望ましい。しかし、各種産業が未発達な現在のカンボジアでは、PC 桁製作に必要な材料のうち、石、砂、水しか国内で調達できない（写真-5）。セメント、鉄筋、減水剤等の材料は、隣国のタイやベトナムから輸入する必要がある。今回の実物大 PC 桁の製作にあたり、材料の中で最も高価な PC 鋼線は、隣国のタイから輸入可能であったが、その径に対応するウェッジ（定着具）（写真-6 右）と付着コントロールのためのシースは、タイでも調達可能な寸法の種類に限られ、カンボジアとその周辺国で調達することが困難であった。そこで、今回の試験製作に限り、ウェッジについては、日本からの輸入で調達し、シースについては現地で調達可能な日用品のフレキシブルホース（写真-6 左）で代用することとした。今回の PC 桁製作は 1 体のみであるが、将来的に PC 桁の量産を想定した場合、ウェッジについては、プレテンションタイプであれば再利用が可能であること、および多くの PC 桁を同一ラインで一度に製造することを考慮すれば、PC 桁 1 体あたりのコストへの影響は、他の材料ほど大きくない。また、シースについても、コンクリートと PC 鋼線の付着を切ることだけが目的であり、シースを日用品の安価なフレキシブルホースで代用したとしても品質上問題になることは無いと考えられる。

将来、カンボジアの経済が発展し、これら材料への需要が増加すれば、現地で調達可能な材料の種類も増えてくると考えられる。



写真-5 細骨材（川砂）と粗骨材（碎石）



写真-6 左：フレキシブルホース、右：ウェッジ

4.2 自己充填コンクリートの練り混ぜ

熟練労働者が不足している現在のカンボジアにおいて高強度のコンクリートを使用するため、締め固めの不要な自己充填コンクリート（SCC）を採用することとしたが、コンクリートの配合決定のためには、SCC に限らず、試験練りが必要である。一般的に、SCC の練り混ぜには、強制二軸型ミキサーの使用が前提となるため、試験練りにおいても強制二軸型ミキサーを用いる必要がある²⁰⁾。しかし、今回の実物大 PC 桁製作にあたり、カンボジアにはプラント用の強制二軸型ミキサーは存在するものの、実験室レベルの試験練りのためのミキサーは、傾胴重力式ミキサーしか存在しなかった（写真-7）。そこで、傾胴重力式ミキサーにおいて練り混ぜ時間と材料投入順序を調整することで SCC を製造する手法^{21),22)}により、SCC の試験練りを実施し、配合を決定した。そして、ミキサーの違いによる影響を把握するため、プラントの強制二軸型ミキサーで必要最小限の試験練りを実施して、配合の微調整を行った。

4.3 配合について

SCC の配合は、一般的に粉体量が多く、コンクリートの温度上昇を抑えるために低熱ポルトランドセメントを用いることが多い。しかし、現在のカンボジアでは、普通ポルトランドセメントしか調達できない。また、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカフューム等の混和材は、カンボジアの市場で調達可能であるが、非常に高価である。一方、石灰石微粉末は、カンボジア国内に鉱山が存在し、比較的安価に調達可能な材料である。そこで、カンボジア国内での SCC 製造では、普通ポルトランドセメントと石灰石微粉末を使用した SCC を用いることとした。

SCC の製造に必須となる高性能 AE 減水剤について、現時点では遅延型の高性能 AE 減水剤をカンボジア国内で調達することはできない。そこで、カンボジアで唯一調達可能な早強型の高性能 AE 減水剤を用いることとした。早強型の高性能 AE 減水剤では、長時間 SCC の流動



写真-7 カンボジアのコンクリートミキサー

表-2 自己充填コンクリートの配合

配合条件				単位量 (kg/m ³)					
粗骨材 最大寸法	水セメント比	水粉体 容積比	空気量	水 W	セメント C	石灰石 微粉末 LS	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 SP
20	33	80	2	171	519	133	829	767	6.52

性を確保することは難しい。しかし、一般的に PC 桁はプレキャスト工場で製造するため、品質上大きな問題とはならないと考えられる。また、将来的に遅延型の需要が増加すれば、カンボジアにおいても調達が可能になると考えられる。

今回の実験で使用した SCC の配合を表-2 に示す。本配合による材齢 28 日の圧縮強度は、72.4MPa であった。

4.4 品質管理について

SCC のフレッシュ性状の品質管理手法は、日本の品質管理手法と同様とした。すなわち、JIS に規格されている底部の内径が 200mm、頂部の内径が 100mm、高さが 300mm のスランプコーンを用いたスランプフローテスト、V ロート試験による流下時間の測定、ボックス試験による障害物の通過性能の判定である（写真-8）。硬化コンクリートについても、日本と同様の直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体による圧縮強度試験を実施した。したがって、現時点では、カンボジアで調達可能な材料を用いてカンボジアで製造した SCC は、日本と同等の品質を確保できていると考えられる。

今回の実物大 PC 桁の製作にあたり、品質管理等の作業はカンボジア工科大学の学生が実施している。これは、2 章で述べた発展途上国の自立的発展のためには、現地技術者の育成が必要不可欠であるためである。将来、日本の品質管理手法を基準としつつも、現地条件に合わせた改善が彼ら自身の手によって行われると思われる。

4.5 実大 PC 桁の製作

実物大 PC 桁試験体は、プレストレス導入時の反力となる RC 製の梁を 2 つ製作し、その間に鋼製型枠を組立てて、SCC の打設を行った（写真-9）。型枠は、材齢 1 日に脱型し、5 日間散水にて養生を行った。脱型後の PC 桁

試験体の表面は、SCC が隅々まで充填されてジャンカの発生も無く、きれいな表面であった（写真-10）。プレストレスは、材齢 6 日に PC 鋼線を 1 本ずつ切断することで導入を行った。

5. 応力緩和の計測結果

一般的に PC 桁は、コンクリートの乾燥収縮とクリープによって、導入プレストレスが減少する。そこで、本章では、実物大 PC 桁試験体の収縮ひずみを計測し、クリープと乾燥収縮による導入プレストレスの緩和に対する安



写真-8 左：実習状況，右：品質管理テスト



写真-9 左：製作ヤード，右：SCC 打設状況



写真-10 左：養生状況，右：PC 桁の完成状況

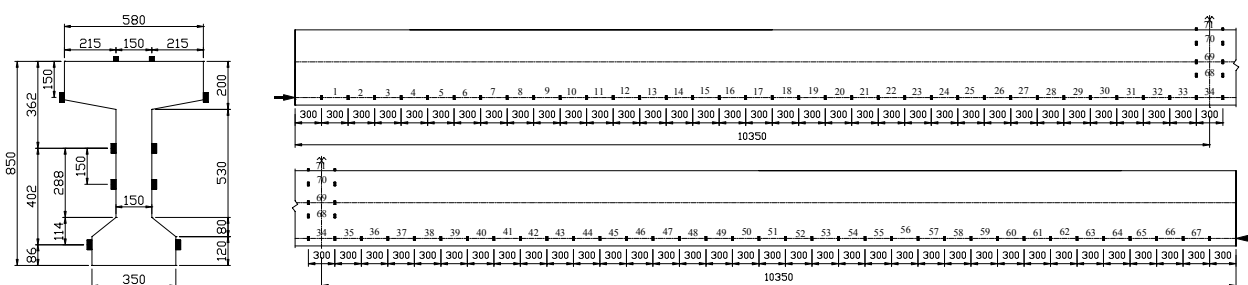


図-15 収縮ひずみの計測位置（コンタクトチップの貼付け位置）



写真-11 ひずみ計測状況

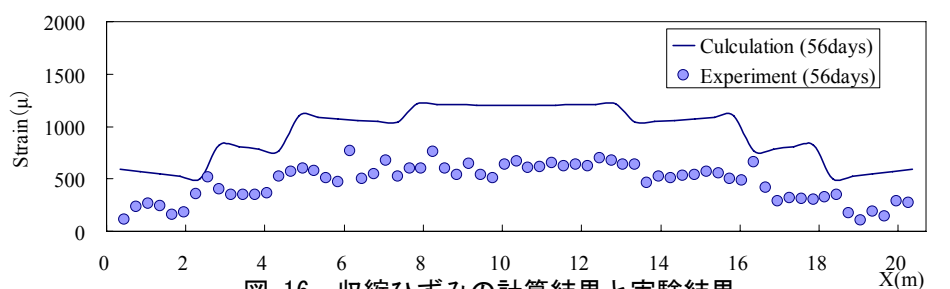


図-16 収縮ひずみの計算結果と実験結果

全性について報告する。

5.1 計測手法

収縮ひずみの計測は、コンタクトゲージ法を採用し、コンクリート表面にゲージプラグを貼付け、検長 300mm にて行った。計測位置を図-15 に示す。これらの計測作業についても、カンボジア工科大学の学生が実施した（写真-11）。このように、コンクリートの製造・品質管理・計測・結果評価と一連の流れについて経験した彼らは、彼ら自身で問題を発見・解決し、自国の自立的発展のための中心的なエンジニアへと成長すると思われる。

5.2 計測結果

図-16 に材齢 56 日の PC 桁軸方向の各位置における収縮ひずみの計測結果と試験体設計時に想定したひずみの計算結果を示す。図-16 に示す計算値は、インターバルごとに発生する応力に対して、クリープ・乾燥収縮・PC 鋼線のリラクゼーションによる応力変動を逐次計算に取り入れることのできる逐次法によるものである。クリープおよび乾燥収縮の構成則については、2 章で述べた CEB-FIP モデルコード式¹⁷⁾を、またその際に必要となる気温と湿度については現地の計測結果を用いている。また、PC 鋼線のリラクゼーションについては、土木学会コンクリート標準示方書の構造性能照査編に示される式²³⁾を用いた。

図-16 に示すように、計測結果は計算結果よりも小さい値となっており、SCC を用いた PC 桁の提案設計手法が安全側であることを示している。

6. まとめ

発展途上国における人材と技術開発の統合システム構築プロジェクトの一部として、スパンが 15m～20m 程度の小規模橋梁を対象とし、低コストで耐久性が高く、未熟練労働者が施工可能であり、またカンボジア全体で早急に架け替え可能な橋梁形式について検討を行った。さらに、将来の PC 桁量産を想定し、カンボジア現地での実物大 PC 桁の製作と応力緩和についての検討を行った。本研究の範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) カンボジアの小規模橋梁の架け替えについて、現地条件に最適な橋梁形式として自己充填コンクリート（SCC）を用いたプレテンションタイプのプレキャスト桁（PC 桁）を採用し、形状と設計手法を提案した。
- (2) カンボジア現地で調達可能な材料を用いて、SCC を用いた PC 桁を製作可能なことを示した。また、日本の品質管理手法を導入して実物大 PC 桁を製作し、十分な品質を有していることを確認した。
- (3) 実物大の PC 桁の応力緩和について計測を行い、計測

による収縮ひずみが提案設計手法によるひずみの計算結果よりも小さく、安全側の設計であることを確認した。

以上より、将来のカンボジアの自立的発展のために、上記提案手法の改良・改善をカンボジア人自身の手によって実施可能であることの見通しを得た。

謝辞：本研究は、高知工科大学社会システム工学科の草柳俊二教授、Rajendra Niraula 博士が進めている「発展途上国における人材と技術開発の統合システム構築プロジェクト」の一部として行われたものです。また、カンボジアでの実物大 PC 桁の製作にあたり、当社国際支店の皆様に協力して頂きました。特に、カンボジアにおいては、プノンペン出張所の影正一夫氏、小肥洋介氏、Tomi MEASU 氏、カンダルスタン作業所の遠藤高広氏に協力していただきました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 外務省各国地域・情勢：最近のカンボジア情勢と日カンボジア関係、<http://www.mofa.go.jp/mofaj/area/cambodia/kankei.html>, 2007 年 2 月 5 日取得
- 2) 外務省各国地域・情勢：カンボジア和平及び復興への日本の協力、<http://www.mofa.go.jp/mofaj/area/cambodia/kyoryoku.html>, 2007 年 2 月 5 日取得
- 3) 「地球の歩き方」編集室：地球の歩き方 D22 アンコール・ワットとカンボジア 2006～2007 年版、株式会社ダイヤモンド・ビックス社, pp.318-335, 2005
- 4) VONG Seng: Design of Prestressed Concrete Bridge Girder Using Self-Compacting Concrete for Cambodian Rehabilitation, Kochi University of Technology, Japan, 2006
- 5) Genocide museum TUOL SLENG, Cambodia, 2006
- 6) 潮木守一：移行体制下における高等教育政策－カンボジアのケース－、武蔵野女子大学現代社会学部紀要第 1 号, 2003.3
- 7) 外務省：日本の ODA プロジェクトカンボジア、http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/index/odaproject/index_asia.html, 2007 年 2 月 5 日取得
- 8) Rajendra Niraula: Development of Integrated System for Human Resources and Infrastructure Development in Developing countries, Kochi University of Technology, Japan
- 9) Institute of Technology of Cambodia, Kochi University of Technology: Technology and Management for Cambodian Infrastructure Develop and Rehabilitation, ITC-KUT Symposium, Cambodia, 12.2006
- 10) 日刊建設工業新聞：ワールドワイド, 2006 年 9 月 26 日付朝刊

- 11) 草柳俊二：建設産業の透明性向上に関する研究二者構造から三者構造執行携帯への移行，土木学会論文集，No.714，VI-56，pp.221-232，2002.9
- 12) 草柳俊二：「21 世紀型建設産業の理論と実践－国際建設プロジェクトもマネジメント技術－」，(株)山海堂，2001.2
- 13) 渡辺泰充：設計照査システムの実際と将来展望，土木学会平成 18 年度全国大会研究討論会，研-23 資料，pp.10-11，2006.9
- 14) Taiju YONEDA, Tetsuya MISHIMA, VONG Seng, Masahiro OUCHI, Hiroshi SHIMA: Production and Examination of Prestress loss of Precast Prestressed Concrete Bridge Girder Using Self-Compacting Concrete in Cambodia, The International Symposium on Social Management System, China, 3.2007
- 15) BBC WEATHER: World Weather Average Conditions <http://www.bbc.co.uk/weather/>, 2007 年 4 月 11 日取得
- 16) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ－メカニズムと対策技術の現状－，丸善株式会社，2003 年 5 月
- 17) CEB-FIP: Model Code1990, Comite Euro-International du Beton, 1990
- 18) OECD ROAD RESEARCH GROUP: Evaluation of Load Carrying Capacity of Bridges, OECD, 1979
- 19) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅰ共通編・Ⅳ下部構編），pp.11-25，平成 14 年 3 月
- 20) 社団法人土木学会：高流動コンクリート施工指針，1998.7
- 21) 三鍋一誠，筒井浩平，大内雅博，中島良光：混和材料後添加型自己充填コンクリート製造法の開発，土木学会第 61 回年次学術講演概要集，pp.391-392，平成 18 年 9 月
- 22) 筒井浩平，三鍋一誠，大内雅博，中島良光：材料の投入順序及び練混ぜ時間がフレッシュモルタルの流動性に及ぼす影響，土木学会第 61 回年次学術講演概要集，pp.393-394，平成 18 年 9 月
- 23) 社団法人土木学会：コンクリート標準示方書（構造性能照査編），pp.42-44，2002