

(6) 外ケーブルにより連続化された合成桁橋の経時挙動に関する研究

Study on Time-Dependent Behaviors for Composite Girder Bridges connected by using External Cables

中條 潤一* 栗田 章光** 大山 理***
Junichi NAKAJO Akimitsu KURITA Osamu OHYAMA

*工修 日本建設コンサルタント株式会社 大阪支社 (〒553-0003 大阪市福島区福島 7-20-1)
**工博 大阪工業大学教授 工学部土木工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)
***工修 大阪工業大学大学院 博士後期課程 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

This paper deals with the creep and shrinkage behaviors of continuous composite girder bridge, which was connected the existing simple supported ones by using the transverse reinforced concrete girders at the girder ends and the longitudinal external cables. First of all, therefore, the construction detail of a new connecting method for simple supported girder bridges is shown compared with some conventional methods. The analytical method for the time-dependent behaviors of bridge is described briefly. The three spans continuous bridge was selected as a numerical example. Main parameter in the calculations is the age of concrete in existing after completed. The numerical results give some useful data for designing in this subject.

Key Words : Structural continuity method, External cables, Transverse concrete beam, Creep, Shrinkage

1. まえがき

我が国で建設され供用されてきた初期の橋梁構造物は、そのほとんどが単純桁形式である。そのため、ジョイント部を通過する車両や伸縮装置による騒音ならびに振動が、周辺環境に悪影響を与え、近年、社会問題になっている。また、通過交通量の増加、車両の大型化に伴い道路橋示方書の設計活荷重が改訂された。さらに、都市内高架橋においては、大型の防音壁の設置等で大幅な死荷重増が予想される。そのため、旧設計荷重で設計された橋梁の応力改善、ならびに使用性、耐久性、および耐震性を何らかの方法で向上させる必要性がでてきた。

そのような状況の中で、この種の問題の改善策として桁連続化工法や外ケーブルによる補強

工法が行われるようになってきた。桁連続化工法は、走行性の向上、環境改善および維持管理費の低減を図ることができ、また、外ケーブルは、桁に効果的に配置することで許容値を超える応力度の低減を可能にする。しかし、従来から行われている添接板による桁連続化工法は、桁高がほぼ等しい橋梁や主桁中心線が一致しているなどの条件を満足する箇所のみ適用可能であった。そこで、これらの制約条件以外の箇所にも桁連続を行う方法として、コンクリート充填横桁と外ケーブルによる連続化工法（以下、CCEC 工法）が提案された⁶⁾。CCEC 工法を用いて連続化された橋梁は、それまでの供用年数に応じて経時挙動が変化することはいうまでもない。

そこで、本研究では、CCEC 工法で連続化され

た合成桁橋の経時挙動を明らかにするため、供用年数を種々変化させた場合の検討を行ったので、その結果を報告する。

2. 連続化工法

2.1 概説

まえがきで述べたように、我が国では主として伸縮継手に起因する種々の問題があり、それらは年々増加傾向にある。そこで、この問題への対応策としてノージョイント化が行われるようになった。

本章では、まず、現在までに行われてきた鋼桁橋に関する連続化工法について、次に、CCEC工法について述べる。なお、本論文で示す連結化工法と連続化工法の定義は、桁または床版のみを連続させる工法を連結化工法とし、桁と床版の両方を連続させる工法を連続化工法とする。

2.2 従来工法

鋼橋の分野で従来から行われている連結化工法⁹⁾は、大きく分類すると以下の2種類となる。

(1) 鋼桁床版連結工法 (図-2.1)

この工法は、主桁連結を行わず床版のみを連結化する方法である。本工法での連結部は、桁の回転を拘束する程の剛度を有しないため、活荷重に対しては単純桁に近い挙動となる。本工法では、図-2.1 にみられるとおりジョイント前後の計 2m~3m 区間程度の床版をはつとり、新たに連続した床版を施工する必要があるため、施工時に通行止めを行わなければならない、また、床版撤去に伴う騒音も大きく、施工性に問題を有している。

(2) 鋼主桁連結工法 (図-2.2)

本工法は、床版連結工法での施工上の問題を避けるため、床版を連結せずに、主桁のウェブどうしをモーメントプレート、およびシャーププレートで連結させる方法である。連結板は桁端の回転変形を拘束するため、連結後の桁は連続桁に近い挙動を示すことになる。そのため、活

荷重の載荷により連結部に負曲げモーメントが発生することになり、この断面力に対して継手部を設計する必要がある。この工法は、路面下からの作業が大部分を占めるため、基本的に通行止めによる工事は必要としない。

しかし、この工法は、以下の条件を満足する箇所のみ適用可能である。

- ①橋種、支間長、構造がほぼ等しい。
- ②平面線形が直線区間である。
- ③主桁中心線が一致している。

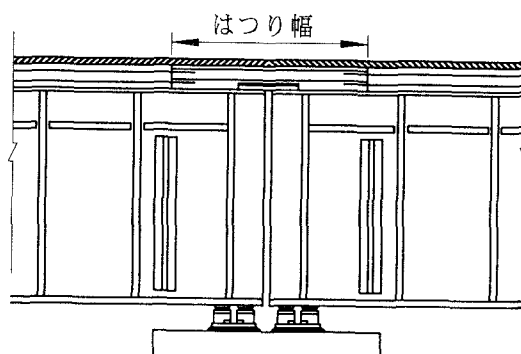


図-2.1 鋼桁床版連結工法

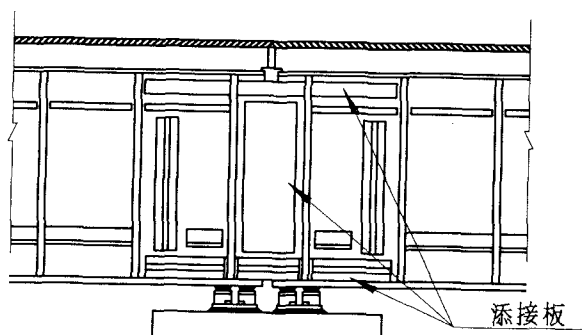


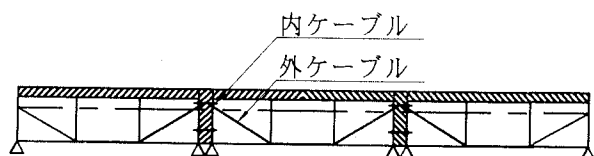
図-2.2 鋼主桁連結工法

2.3 CCEC 工法

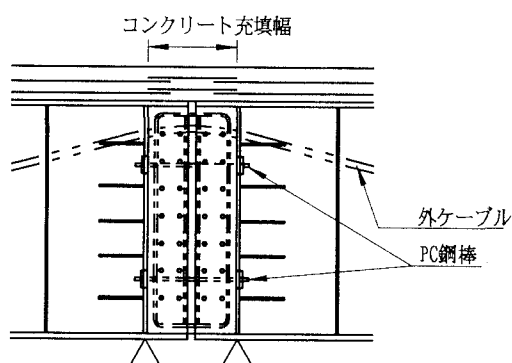
添接板による鋼主桁連結工法は、ウェブに大きな目違いがあったり、桁高が異なる場合、適用不可能となる。そこで、このような箇所でも連続化を可能にするために考え出されたのが、コンクリート充填横桁と外ケーブルを併用した連続化工法である^{9),10)}。この工法における連結部構造の概要を図-2.3 に示す。本工法では、外ケー

ブルを用いることで連結部に発生する負曲げモーメントを低減させることができる。さらに、支間部にも外ケーブルを配置することで、今後予期される後死荷重（防音壁など）の増加による正曲げモーメントの低減も可能である。なお、PC 鋼棒は、外ケーブルによるコンクリート横桁下縁に生じる引張応力を打ち消すためのものである。

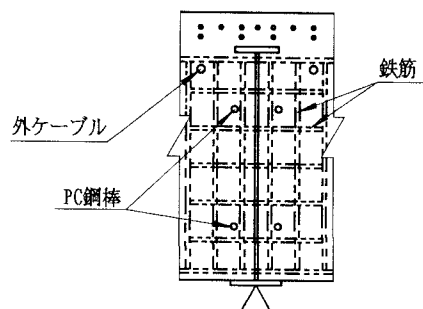
本工法では、基本的にジョイント部を取り除き床版を連続する必要がある。そのため施工時に通行止めを必要とするが、床版を連続し、かつ外ケーブルによりプレストレスが導入されるので、床版の耐久性の向上が図れると考えられる。



(a) 側面図（全体図）



(b) 側面図



(c) 横断面図

図-2.3 連続部の概要

3. クリープおよび乾燥収縮解析

3.1 概説

合成桁では、コンクリートの特有の現象であるクリープ・乾燥収縮により断面力および変形に変化が生じる。設計の際、その変化量の判断を誤るとコンクリート中にひび割れを生じたり、過度の変形を引き起こす原因となる。クリープ・乾燥収縮の影響は、コンクリートの材令により大きく変わってくる。したがって、既存橋梁の完成後の年数が重要となる。

そこで、本章では、CCEC 工法で連続化された桁の経時挙動を把握するため検討を行った。

3.2 解析方法

クリープ解析には、回復クリープを考慮した応力-ひずみ関係式を、また、乾燥収縮解析には、自由収縮の拘束作用を考慮した応力-ひずみ関係式をそれぞれ用いた^{8),9)}。構造全体系の解析を総断面力法に基づき行い、その際、高次の不静定構造系を解析するために、変位法を用いた。この解法には、クリープ・乾燥収縮による鋼材の拘束作用を考慮した換算剛性マトリックスを用いた^{10)~15)}。

外ケーブル部材の取り扱いについては、偏心結合変換マトリックスを用いて対応した¹⁶⁾。すなわち、非現実的な剛度を持つ仮想部材を用いずに偏心結合変換マトリックスを用いることで外ケーブルの影響を考慮した。

3.3 対象橋梁の概要および解析条件

本研究で対象とする橋梁を図-3.1 に示す。この橋梁は、3 連の単純合成桁をコンクリート充填横桁と外ケーブルを用いて連続化した 3 径間連続桁橋である。しかし、支承の取り替えを行わない構造としたため、中間支点部では剛域を形成する構造となっている。また、CCEC 工法の詳細は、2 章で述べた通りである。

外ケーブルの配置形状については、既往の研究に基づき、径間部では今後予期される後死荷重（防音壁など）の増加に対して最も効果的な

クイーンポスト形式とし、一方、中間支点領域ではキングポスト形式とした^{17)~19)}。また、桁の横ねじれ変形を防止するため、外ケーブルは主桁1本あたり2本配置することとした。

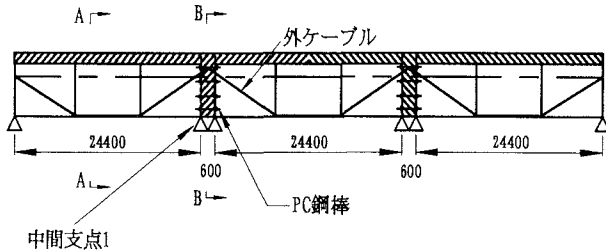


図-3.1 側面図 (単位 mm)

次に、計算に用いた径間部およびコンクリート充填部の横断面図を図-3.2 に示す。ただし、数値計算において、コンクリート充填部に配置されている8本のPC鋼棒を1本に換算して行った。

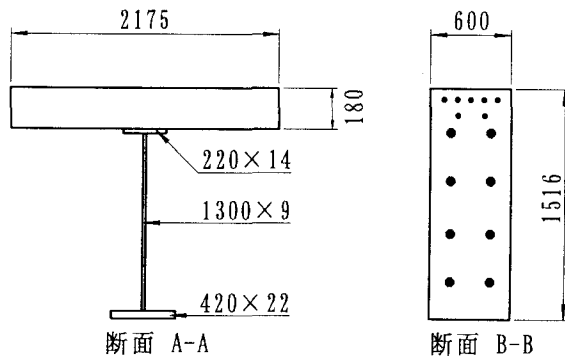


図-3.2 横断面 (単位 mm)

解析の対象とする橋梁は、表-3.1 に示す5ケースとする。CASE1 から CASE4 までが、既設橋梁の連続化を対象としている。CASE1 は、供用開始後、30 年以上経過しているとし、合成桁部のクリープ・乾燥収縮は、ともに完全に終了しているものと仮定した状態である。また、CASE2、CASE3、および CASE4 は、供用開始後、20 年、10 年、および 5 年後に本工法を適用した場合である。CASE5 は、PC 連結桁の施工方法と同様、まず単純桁を架設し、その後、遊間部にコンクリートを充填し連続化した場合を想定している。すなわち、新設橋梁を対象としている。

数値計算は、はじめに後死荷重を載荷し、その後、ケーブルに緊張力を導入する施工段階を想定し行った。

表-3.1 対象橋梁の計算条件

	合成桁部分		コンクリート充填部分	
	クリープ 材令	乾燥収縮 材令	クリープ 材令	乾燥収縮 材令
CASE1	終了	終了	30 日	0 日
CASE2	20 年	20 年	30 日	0 日
CASE3	10 年	10 年	30 日	0 日
CASE4	5 年	5 年	30 日	0 日
CASE5	30 日	0 日	30 日	0 日

数値解析条件を表-3.2 に示す。ここで、外ケーブルおよび PC 鋼棒の導入緊張力は、コンクリート横桁が全圧縮状態となるように予備計算を行った結果、得られた値である。また、無次元係数は、クリープおよび乾燥収縮の進行を指数関数で表したときの指数部の係数である。

表-3.2 数値解析条件

断面積 [mm ²]	外ケーブル	F70(383.9)×2 本
	内ケーブル	SWPR19N(243.7)×8 本
	鉄筋 (上下とも)	D16(198.6)×7 本
弾性係数 [kN/m ²]	鋼	21×10 ⁷
	コンクリート	30×10 ⁶
	鉄筋	21×10 ⁷
	ケーブル	20×10 ⁷
導入張力 [kN]	外ケーブル	980
	PC 鋼棒	3038
後死荷重 (床版補強、裏面版等) [kN/m]		3.41
クリープ 係数の 最終値	遅れ弾性クリープ $\phi_{d,\infty}$	0.4
	フロークリープ $\phi_{f,\infty}$	1.6
	乾燥収縮に伴うクリープ $\phi_{sh,\infty}$	4.0
乾燥収縮ひずみ量の最終値 $\epsilon_{sh,\infty}$		200×10 ⁻⁶
無次元 係数	k_1	5.5×10 ⁻³
	k_2	9.0×10 ⁻⁴
	k_3	4.5×10 ⁻⁴

3.4 解析結果および考察

はじめに、クリープおよび乾燥収縮に伴う引張応力が、コンクリート床版、特に、コンクリート充填横桁部に与える影響を明らかにするため応力照査を行った。

表-3.3 は、中間支点 1 に着目した応力度を示している。この位置は、合成桁とコンクリート充

填横桁との境界に位置しているため、表には、それぞれの値を表示した。なお、表に示す弾性は、後死荷重およびプレストレスによって発生した応力度である。

表-3.3 中間支点1におけるコンクリート床版上縁の応力

		弾性	クリープ	乾燥収縮	合計
CASE1	合成桁側	-4.30	0.12	-0.01	-4.19
	充填側	-8.80	1.14	0.36	-7.30
CASE2	合成桁側	-4.30	0.59	0.06	-3.65
	充填側	-8.80	1.52	0.46	-6.82
CASE3	合成桁側	-4.30	0.65	0.40	-3.25
	充填側	-8.80	1.57	0.95	-6.28
CASE4	合成桁側	-4.30	0.90	0.81	-2.59
	充填側	-8.80	1.78	1.56	-5.46
CASE5	合成桁側	-4.30	1.87	1.43	-1.00
	充填側	-8.80	2.65	2.53	-3.62

引張：正 単位[N/mm²]

表-3.3 より、クリープに伴う引張応力は、当然のことながら橋梁の供用年数が経つにつれて小さくなる傾向を示す。また、乾燥収縮に伴う引張応力も同様のことがいえる。

今回の解析条件下では、弾性時に生じる圧縮応力が、経時挙動に伴う引張応力に比べ大きいいため、コンクリートに悪影響を及ぼさないことがわかった。

次に、中央径間中央に着目した変位を表-3.4 に示す。ここで、合計欄は、弾性、クリープ、および乾燥収縮による総たわみを表示している。また、たわみの符号は、正を鉛直下向きに、負は鉛直上向きに変位した場合を示している。

表-3.4 中央径間中央でのたわみ

	弾性	クリープ	乾燥収縮	合計
CASE1	-4.4	-0.5	0.1	-4.8
CASE2	-4.4	-0.7	0.1	-5.0
CASE3	-4.4	-0.8	0.1	-4.9
CASE4	-4.4	-0.9	0.3	-5.0
CASE5	-4.4	-1.7	0.6	-5.5

単位[mm]

一例として、CASE1、および CASE5 のたわみ図を、それぞれ図-3.3、および図-3.4 に示す。

供用年数の異なる橋梁に本工法を適用した場合、クリープおよび乾燥収縮による変位は、それらの進行の違いにより各ケースごとに差異が

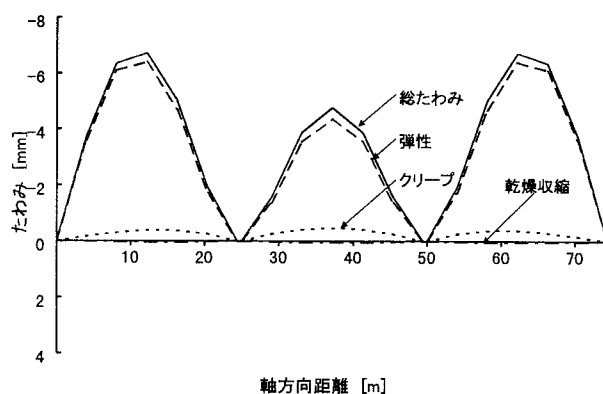


図-3.3 CASE1 のたわみ

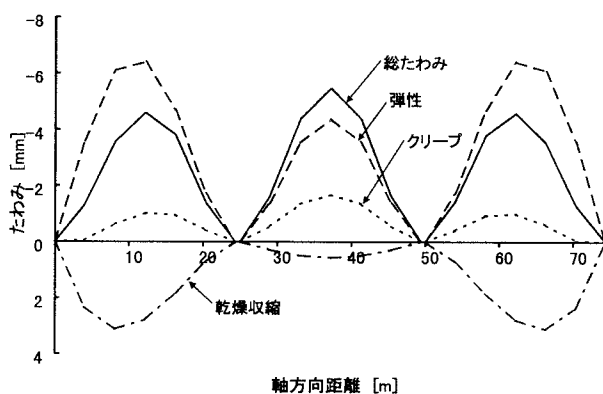


図-3.4 CASE5 のたわみ

見られる。

両図より、たわみの形状は、すべてのケースでクリープにより桁はそり上がり、乾燥収縮により桁は垂れ下がる傾向を示している。その結果、クリープ・乾燥収縮に伴う桁の変形は、互いに打ち消しあい小さくなった。今回、クリープによるたわみがそり上がったのは、外ケーブルによる桁の突き上げが大きかったため、クリープ現象を引き起こす持続力が桁を持ち上げる方向に働いたからであると考えられる。

既設橋と新設橋を比較した場合、既設橋では、乾燥収縮よりクリープの影響が大きく、新設橋では、逆にクリープより乾燥収縮の影響が大きいことがわかる。

本解析モデルでは、既設橋・新設橋にかかわらず、クリープによるたわみ量は、中央径間で最大となった。しかし、乾燥収縮によるたわみは、側径間で最大となった。

供用年数が数十年経つ既設橋の総たわみは、弾性時の変形が大半を占めており、クリープ・乾燥収縮による影響はほとんどないといえる。

4. まとめ

CCEC 工法で連続化した桁の経時挙動解析を行った結果、以下のことがわかった。

- (1) たわみの形状は、クリープにより桁はそり上がり、乾燥収縮により桁は垂れ下がる現象を示す。
- (2) 新設橋でのたわみは、クリープより乾燥収縮の影響が大きいことがわかった。
- (3) 本解析モデルでは既設橋・新設橋にかかわらず、クリープによるたわみ量は、中央径間で最大となった。しかし、乾燥収縮によるたわみは、側径間で最大となった。
- (4) 今回の計算条件下では、コンクリート中にひび割れを発生させるような引張応力および過度の変形は見られなかった。
- (5) 供用年数が数十年経つ既設橋の総たわみは、弾性時の変形が大半を占めており、クリープ・乾燥収縮による影響はほとんどないといえる。

謝辞：本研究の実施にあたっては、鋼橋の外ケーブル補強研究会（委員長：松井繁之・大阪大学大学院教授）の委員各位から有益な助言と資料の提供を受けた。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) (社)建設コンサルタント協会近畿支部・ジョイントレス橋梁研究委員会：橋梁のジョイントレス化に関する提案と試験計、「ジョイントレス橋梁研究委員会」報告書、1996.4.
- 2) 山本悟司：既設橋梁の連続化、橋梁と基礎、1994.8.
- 3) 長沼敏彦・宇野裕恵：舗装のみの連続化（埋設ジョイント）、橋梁と基礎、1994.8.
- 4) 熊谷健二：床版連結による鋼桁のノージョイント化、橋梁基礎、1994.8.
- 5) 乙黒幸年・宇野裕恵：鋼桁ウェブの連結によるノージョイント化、橋梁と基礎、1994.8.
- 6) 中條潤一・栗田章光・坂下清信・武藤和好・松永進一・大山 理：既存鋼桁橋の外ケーブルによる連結化工法 その 1（全体挙動の検討）、土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集、共通セッション、1998.10.

- 7) 秦 隆司・坂下清信・平野淳治・栗田章光・大山 理・中條潤一：既存鋼桁橋の外ケーブルによる連結化工法 その 2（連結部の構造検討）、土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集、共通セッション、1998.10.
- 8) 渡辺誠一・六車 照：コンクリートのクリープひずみに関する一考察、日本建築学会構造系論文報告集、1989.
- 9) 栗田章光：回復クリープの影響を考慮した鋼・コンクリート合成桁橋の経時挙動に関する研究、大阪市立大学博士論文、1992.
- 10) 岡村宏一：構造力学 I・II、鹿島出版会、1988.
- 11) A.Ghali/R.Favre（訳/川上 洵・樫福 浄・訳）：コンクリート構造物の応力と変形[クリープ・乾燥収縮ひび割れ]、技報堂出版、1995.
- 12) 佐藤素啓・渡辺 実・佐藤 昇：変位法によるコンクリート構造物のクリープ・乾燥収縮解析の基礎理論、プレストレストコンクリート技術協会誌、Vol.22、No.2、Apr. 1980.
- 13) 小宮正久・酒井 一・前田春人：任意形コンクリート構造物のクリープ解析法に関する一提案、プレストレストコンクリート技術協会誌、Vol.29、No.2、Mar. 1987.
- 14) 小宮正久・酒井 一・前田春人：PC 合成桁のクリープ解析、プレストレストコンクリート技術協会誌、Vol.32、No.2、Mar.1990.
- 15) 中谷武弘・新平信幸・安田 穰・栗田章光：回復クリープと鉄筋のひずみ拘束を考慮したプレストレストコンクリート部材のクリープ解析、構造工学論文集、Vol.39A、1993.
- 16) 富田耕司・栗田章光：CSAS システムを用いた外ケーブルを有する合成構造橋梁のクリープ解析法、平成 6 年度年講、土木学会、1994.
- 17) B.J.Kwasniewski：Vorgespannte Stahlträger Statische Berechnung, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, 1968.
- 18) 祖川武彦・小坂 崇・栗田章光・瀬野靖久：連続桁橋における外ケーブルの配置形状に関する研究、平成 7 年度年講、1995.
- 19) 小坂 崇・平野淳治・栗田章光・大山 理・中條潤一：外ケーブル方式多径間連続合成桁のクリープおよび乾燥収縮挙動に関する研究、構造工学論文集 Vol.44A、pp.1587～1596、1998.3.
- 20) 中條 潤一：単純合成桁橋の外ケーブルによる連続化工法に関する研究、大阪工業大学修士学位論文、1999.2.