

全外ケーブル方式の連続ラーメン橋の設計 — 東海北陸自動車道 開明高架橋 —

水口 和之*1・村田 正徳*2・山村 正人*3・矢野 一正*4・野田 進*5

1. はじめに

本橋は、東海北陸自動車道 開明高架橋の P10～P13 区間にあたる 3 径間連続ラーメン橋である。主桁は 6 室を有する多重箱桁であり、全幅は 21.4m と広幅員であるのに対し、隣接する中空床版橋と連続させるため、桁端では桁高が 1.3m とする非常に扁平な形状である。

主桁主方向の PC 鋼材は、基本設計では通常の内ケーブルであったが、施工条件および経済性から、すべて外ケーブルとしたいわゆる「全外ケーブル方式」を採用した。全外ケーブル方式の PC 橋梁は、道路橋としてはわが国で初めてである。

本稿では、全外ケーブル方式 PC 橋梁の設計概要と、その安全性を確認するために実施した非線形解析について報告する。さらに、外ケーブルを用いた PC 橋梁の終局荷重作用時の外ケーブル応力度増加の設計的な考え方について提言を行う。

2. 開明高架橋 (P10～P13) の概要

開明高架橋 (P10～P13) の諸元は次のとおりである。

- 橋 梁 名：開明高架橋
 - 路 線 名：高速自動車国道東海北陸自動車道
 - 工事位置：愛知県尾西市開明
 - 道路規格：第 1 種第 3 級 A 規格
 - 橋 種：プレストレストコンクリート道路橋
 - 構造形式：3 径間連続 PC 箱桁ラーメン橋
 - 架設工法：全支保工施工
 - 橋 長：147.5m
 - 支 間 長：39.2+67.0+39.2m
 - 幅 員：21.4m (車道 9.74+9.74m)
 - 活 荷 重：B 活荷重
 - 平面線形：R = 1500m
- 本橋の一般図を図 1 に示す。
使用材料は以下のとおりである。

1) コンクリート

主桁： $\sigma_{ck} = 350 \text{ kgf/cm}^2$

橋脚： $\sigma_{ck} = 240 \text{ kgf/cm}^2$

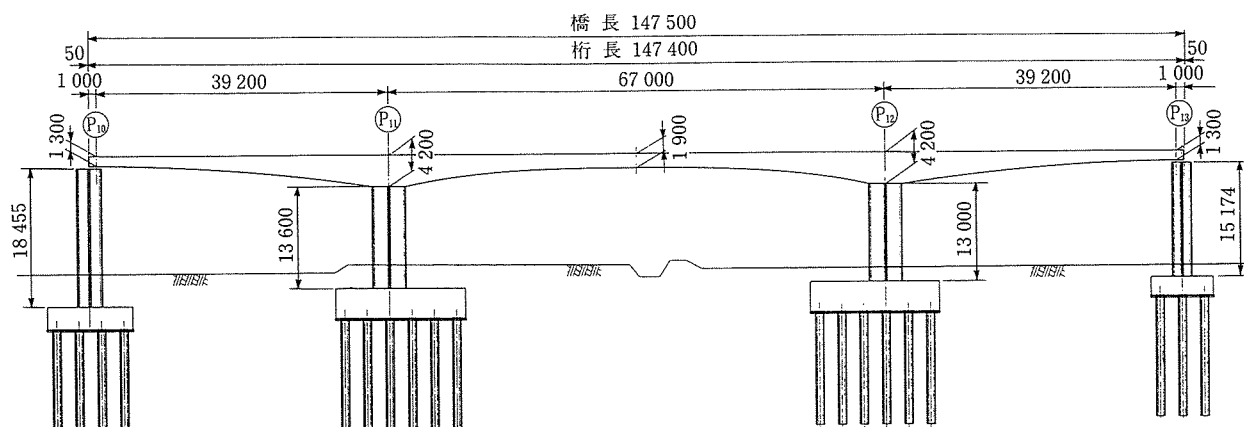


図-1 一般図

*1 Kazuyuki MIZUGUCHI：日本道路公団 名古屋建設局 建設第二部 構造技術課 課長代理
 *2 Masanori MURATA：日本道路公団 名古屋建設局 一宮工事事務所尾西工事区 工事長
 *3 Masato YAMAMURA：鹿島建設株式会社 土木設計本部 第二設計部 設計長
 *4 Kazumasa YANO：鹿島建設株式会社 土木設計本部 第二設計部
 *5 Susumu NODA：鹿島建設株式会社(株)熊谷組JV 開明高架橋工事事務所 所長

2) 鉄筋

SD345

3) PC鋼材

主桁主方向：SWPR7B 19S15.2

(全外ケーブル32本；すべて連続)

3. 外ケーブル方式の採用

PC鋼材を外ケーブル方式とすることは、設計的・施工的に有利な点が多く、また維持管理上も優位であること等から、近年多くの橋梁に積極的に採用されている。設計的には、①部材厚を薄くでき軽量化が図れること、②鋼材緊張時の摩擦損失が大幅に低減できるため高い導入力レベルが得られること、③大容量のPC鋼材が使用できること等から経済性に優れた構造形式と言え、施工的には①コンクリート打設、②PC鋼材配置等において省力化が図れることが利点である。

本橋の場合には、①全支保工施工であること、②P13において既設橋梁と隣接するためPC鋼材は片側緊張しかできないこと等、特に外ケーブル方式に有利な前提条件があった。本橋の連続ケーブルを内ケーブルとして片側緊張する場合、主桁に必要なプレストレスを導入するには、主桁を分割施工とし、PC鋼材を途中緊張する必要が生じた。これに対し、PC鋼材をすべて外ケーブル方式の連続鋼材とすることで、緊張作業をP10桁端のみとしながらも、全橋にわたって高い導入力を与えることができ、経済的な設計が可能となった。

詳細設計では、外ケーブルの利点を最大限生かせるように主桁主方向のすべてのPC鋼材を外ケーブルとしたが、基本設計に対してコンクリート数量を約10%低減することができた。

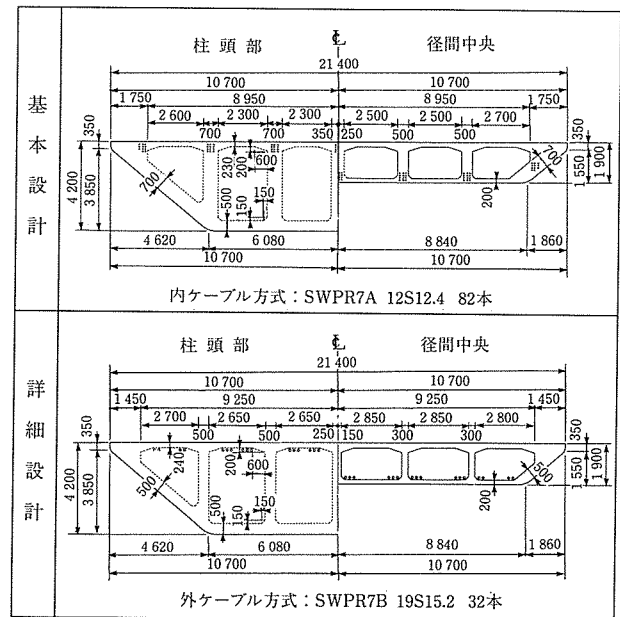
また、外ケーブルの防錆処理方法としては、従来多用されてきたポリエチレン保護管+セメントグラウト方式に代えて、維持管理および施工性の観点からエポキシ樹脂塗布型ストランドを保護管なしで使用することとした。

図-2、図-3に外ケーブルの配置形状を示す。

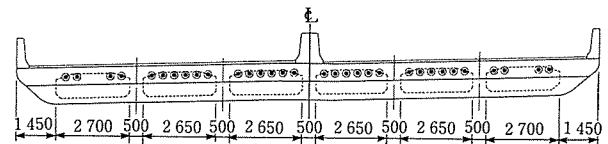
4. 設計概要

設計は、外ケーブル構造に特有な事項については、「外

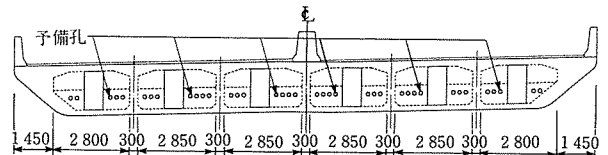
表一 主桁断面比較表



桁端定着部



偏向部



柱頭部

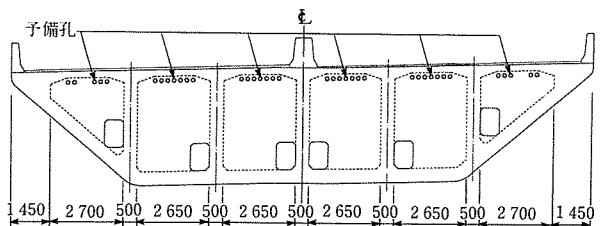


図-3 主桁断面図

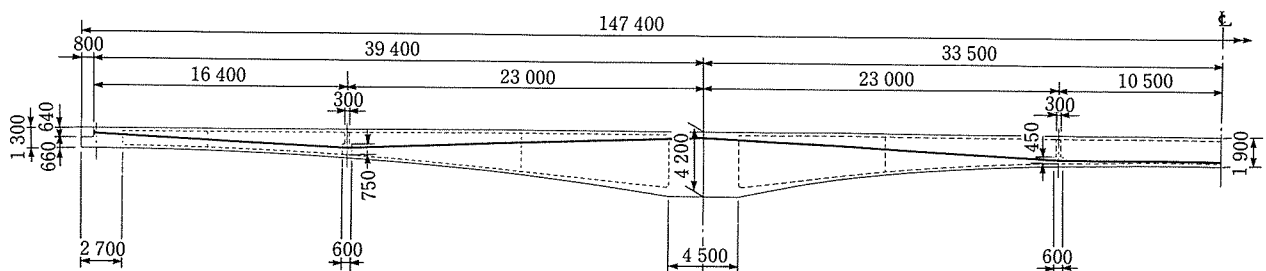


図-2 外ケーブル配置図

◇設計報告◇

ケーブルを用いたPC橋梁の設計マニュアル」^リ（以下、外ケーブルマニュアルと略す）に従った。

4.1 構造モデル

設計計算において断面力算出に用いる構造モデルは、平面フレームモデルとした。ここで、外ケーブルは部材として評価せず、外ケーブルの応力度変化を従来の内ケーブルと同様にプレストレス力として取り扱う「換算内力載荷法」により解析を行った。

4.2 設計荷重作用時の照査

設計荷重作用時の外ケーブルPC鋼材の許容引張応力度は、偏向部での曲げ配置による付加応力度を考慮した上で $0.6\sigma_{pu}$ （ σ_{pu} はPC鋼材の引張強さ）とした。

設計荷重作用時における柱頭部および支間中央断面の主桁曲げ応力度を表-2に示す。本橋の外ケーブルの配置本数は32本であるが、表-2の主桁曲げ応力度には

表-2 主桁主要断面の曲げ応力度 (kg/cm²)

		柱頭部(P11側)		中央径間		柱頭部(P12側)	
		上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁
静荷重時		36.2	33.3	82.9	36.7	33.3	34.1
設計荷重時	活荷重最大	24.3	34.3	94.6	0.9	21.7	36.2
	活荷重最小	11.5	50.5	76.9	18.3	8.9	51.3
温度荷重時	全体温度+	32.1	52.3	76.0	22.7	29.4	53.3
	全体温度-	11.4	32.7	105.4	-11.6	8.7	33.8
地震時	P10→P13	35.5	10.4	79.0	18.6	8.0	54.6
	P10←P13	19.9	53.4	78.7	17.7	32.7	20.4

余裕があり、設計荷重作用時で外ケーブルの必要本数を算定すると、30本まで減らすことができる。すなわち、本橋の外ケーブル配置は、次に示す終局荷重作用時で決定されている。

4.3 終局荷重作用時の照査

曲げに対する終局荷重作用時の照査は、「外ケーブルマニュアル」に従って、外ケーブルを内ケーブルと同様に引張抵抗材と考え、平面保持を仮定した手順により破壊抵抗曲げモーメントを求める手法を用いた。ただし、部材変形に伴う外ケーブルの応力度増加は、重信川高架橋での実績²⁾等を考慮して10 kgf/mm²と設定し、最終的には後述する非線形解析により安全性を確認することとした。

終局荷重作用時の曲げモーメントが最も厳しくなる荷重組合せは、1.7×（死荷重+活荷重）の場合である。表-3に、曲げ破壊安全度がクリティカルとなる柱頭部および支間中央の主桁断面について、曲げ破壊安全度の算定結果を示す。

鉄筋を考慮したケースでは、終局曲げモーメントを与える同じ荷重状態で、せん断に対する引張弦材としての必要鉄筋量と、ねじりモーメントに対する橋軸方向必要鉄筋量を控除した鉄筋量を有効とした。

なお、比較検討のため、外ケーブルの応力度増加をそ

表-3 主桁主要断面の曲げ破壊安全度

荷重組合せ:1.7×(死荷重:活荷重)

		柱頭部(P11側)	中央径間	柱頭部(P12側)
活荷重曲げ最大	鉄筋無視	1.18	0.97	1.14
	鉄筋考慮	1.43	1.11	1.39
活荷重曲げ最小	鉄筋無視	0.96	1.12	0.93
	鉄筋考慮	1.16	1.29	1.13

れぞれ、0、10、20kgf/mm²と仮定して外ケーブル必要本数を試算した結果を、表-4に示す。

表-4 外ケーブル本数の試算結果

応力度増加(kgf/mm ²)	必要本数(本)
0	34
10	32
20	30

これより、本橋においては、終局荷重作用時の外ケーブルの応力度増加を20kgf/mm²見込むと、設計荷重作用時と終局荷重作用時で必要とされる外ケーブル本数は等しくなるといえる。

4.4 偏向部

偏向部は、外ケーブルの偏向力を主桁に円滑に伝達するように図-3に示すリブ形式とした。偏向具の設置される部分は、ケーブルの曲げ半径（R=4.0m）により必要厚を決定した。

偏向具としては、硬質PE管（φ140、R=4.0m）を中間の曲げ部分に用い、両端にはR=1.0mのテーパ加工を施した鋼管を取り付けたものを使用した。偏向部では、ケーブル（エポキシ塗布型ストランド）はφ114のPE内管を介して配置する2重管構造とした。また、予備孔は各ボックスに1カ所ずつ設けた。

偏向部補強は、「外ケーブルマニュアル」に従いリブ形式の簡易法により、偏向具周辺に生じる局部引張力およびせん断力に対して必要鉄筋量を算出し、補強筋を配置した。

4.5 定着部

外ケーブル32本は、図-3に示すとおり、内ボックスに各6本、外ボックスに各4本配置し、すべて連続ケーブルとして桁端横桁に定着した。

外ケーブル方式では、一般に大容量のケーブルがウェブや上下床版の外で横桁に定着されるため、内ケーブル方式とは異なる曲げおよびせん断応力が定着横桁に生じる。「外ケーブルマニュアル」によると、「定着横桁を格子モデルや四辺固定版として曲げモーメントならびにせん断力を算出して、引張応力度ならびにせん断応力度に対する補強を行ってよい」とあるが、本橋の端横桁については、その形状を考えると版として検討するのは適切でない。本橋では、FEM解析を実施することにより、外ケーブルによる応力の伝達がタイドアーチ的な性状を示

すことを確認した。その概念図を図-4に示す。

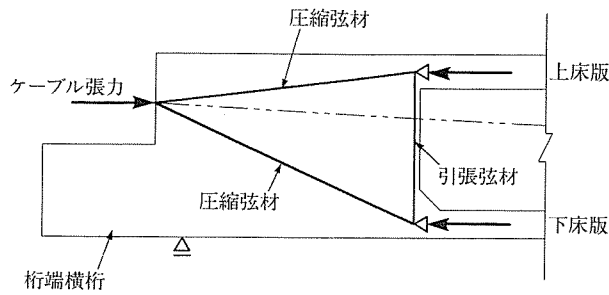


図-4 タイドアーチ概念図

これより、補強として図中の引張弦材（タイバー）に相当する引張鉄筋を鉛直方向に配置した。

5. 非線形解析

外ケーブル構造の終局荷重作用時の安全性を厳密に検討するには構造系としての終局耐力を算定する非線形解析を実施する必要がある。

本橋の場合、終局荷重作用時の照査で部材変形に伴う外ケーブルの応力度増加を10kgf/mm²見込んで設計していることから、追加検討として以下のような非線形解析による破壊安全度の確認を行った。

5.1 解析概要

検討においては、材料非線形性、幾何学的非線形性を考慮した、複合非線形フレーム解析を実施した。

1) 材料非線形性の評価

コンクリート、PC鋼材、鉄筋のそれぞれの応力度-ひずみ関係を適切にモデル化するために、主桁部材をファイバーモデルとした。終局状態の判定は、主桁部材のいずれかのファイバーが終局ひずみ（ $\epsilon_{cu} = 3500 \mu$ ）に達した時点とした。

2) 幾何学的非線形性の評価

荷重増加に伴うコンクリート部材の変形と、その結果として生じる外ケーブルの応力度変化や、コンクリート部材との相対位置の変化によるプレストレス力の増減を考慮した。

5.2 解析モデル

図-5に示すとおり、外ケーブルは軸力部材としてトラス要素でモデル化した。各設計断面において所定の偏心量が確保されるように、偏向部には剛部材を設置した。

なお、外ケーブルの応力度増加を過大に評価しないように、ケーブルと偏向部剛部材との接合条件はスライドとした。

5.3 荷重の載荷方法

荷重載荷パターンは、活荷重の影響線により定めた。CASE1、CASE2はそれぞれ、支間中央断面、柱頭部近

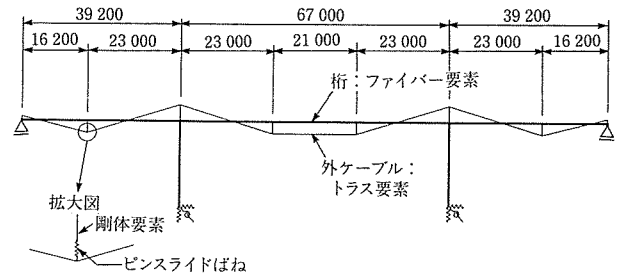


図-5 非線形解析モデル

傍断面で曲げモーメントが厳しくなるケースであり、CASE3は外ケーブルの応力度増加を小さく抑えるケースとして設定した。

載荷荷重は、終局荷重作用時で最も厳しい組合せとして1.7×（死荷重+活荷重）を想定し、設計荷重作用時（死荷重+活荷重）を初期状態として死荷重と活荷重を同時に増加させた。このようにして、主桁破壊時の荷重係数 α が1.7以上あれば道路橋示方書による安全度が確保されるものと考えた。

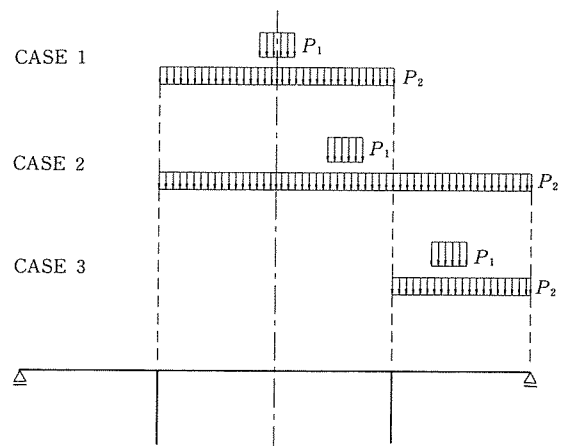


図-6 活荷重載荷パターン

5.4 解析結果

解析結果の一覧を、表-5に示す。ここでは、詳細設計で実施した外ケーブル応力度増加を10kgf/mm²として決定した外ケーブル32本の構造のほかに、比較のために行った応力度増加20kgf/mm²を見込んだ構造（30本）についても、解析結果をあわせて示している。

非線形解析では、いずれの荷重ケースにおいても柱頭

表-5 非線形解析結果一覧表

外ケーブル本数(本)	載荷パターン	応力度増加(kgf/mm ²)	荷重倍率 α	破壊断面
32	CASE1	16.8	2.69	P11柱頭部
	CASE2	25.5	2.95	P12柱頭部
	CASE3	8.3	2.84	P12柱頭部
30	CASE1	17.5	2.59	P11,P12柱頭部
	CASE2	21.4	2.74	P12柱頭部
	CASE3	8.1	2.74	P12柱頭部

部断面で破壊が生じた。詳細設計による外ケーブル32本の構造については $\alpha = 2.7 \sim 2.9$ となったことから、 10kgf/mm^2 の応力度増加を考慮した詳細設計結果は、十分安全であることが確認できた。

さらに、 20kgf/mm^2 の応力度増加を見込んで終局荷重作用時の照査を行って30本まで外ケーブル本数を減らした比較ケースにおいても、 $\alpha = 2.6 \sim 2.7$ となり、 $\alpha > 1.7$ を十分確保できていることが分かった。

6. 終局荷重作用時の照査において考慮する外ケーブル応力度増加に関する考察

前述したように、本橋においては終局荷重作用時の外ケーブル応力度増加 10kgf/mm^2 を見込んで設計を行ったが、非線形解析における破壊時の外ケーブル応力度増加は、CASE1で 17kgf/mm^2 、CASE2で 26kgf/mm^2 となり、応力度増加を小さく抑える荷重載荷として側径間のみで載荷するCASE3では、 8.5kgf/mm^2 の応力度増加とともに柱頭部断面に破壊が生じた。

しかし、外ケーブル応力度増加が 10kgf/mm^2 にみたないCASE3も含めて、いずれの場合にも $\alpha = 2.7 \sim 2.9$ で十分な曲げ破壊安全度を示している。

この解析結果からも分かるように、終局曲げモーメント算定において考慮した外ケーブルの応力度増加量と、非線形解析において曲げ破壊時に外ケーブルに生じる応力度増加量とは同一のものではない。

従来、終局曲げモーメント算定において外ケーブル応力度増加をどの程度見込むべきかという課題に対して、非線形解析もしくは実験における外ケーブル応力度増加量の数値で設計応力度増加量について議論される場合が多かった。しかしながら、ここで得られた結果から判断すると、応力度増加を見込んで設計された外ケーブル構造がどの程度の安全度を持っているかという視点が重要であると思われる。そこで、早急に設計における考え方を整理したうえで、妥当な設計法を確立する必要があると考えられる。

終局荷重作用時の照査における外ケーブル応力度増加の設定を議論する場合には、「応力度増加 $\Delta\sigma_p$ を考慮して設計した外ケーブル構造が、非線形解析において終局荷重作用時の荷重載荷に対して十分な破壊安全度を有していること」に着目するという考え方が実際的であると考えられる。

逆に言えば、「終局荷重作用時のいかなる載荷条件でも非線形解析結果の安全度が十分であるような限界値として、設計基準の外ケーブル応力度増加 $\Delta\sigma_p$ を設定する」べきであり、非線形解析における外ケーブル応力度増加結果を直接に基準における $\Delta\sigma_p$ を決めるサンプルとはすべきでないということである。

たとえば本橋の場合、 $\Delta\sigma_p = 10\text{kgf/mm}^2$ として設計すると、外ケーブル本数 $n = 32$ 本、 $\alpha = 2.7 \sim 2.9$ という非線形解析結果が得られた。これは終局荷重作用時の荷重係数1.7と比較すると十分安全であると評価することができる。

さらに、 $\Delta\sigma_p = 20\text{kgf/mm}^2$ とした $n = 30$ 本の場合も $\alpha = 2.6 \sim 2.7$ より、 $\Delta\sigma_p = 20\text{kgf/mm}^2$ を設計基準として設定しても問題なかったものと考えられる。

以上見てきたように、今後は終局荷重作用時の設計データと非線形解析結果との比較に焦点をあてたデータ整理を改めて行い、解析条件も含めてデータを取捨選択したうえで設計上の $\Delta\sigma_p$ を設定していくのがよいと考えられる。そして、 $\Delta\sigma_p = 20\text{kgf/mm}^2$ と設定した場合、常に非線形解析結果の α が1.7に対して十分大きいことが言えれば、設計基準としての一般的妥当性が確認できるものと考えられる。

7. おわりに

道路橋としてはわが国初めて全外ケーブル方式を採用した開明高架橋の設計概要とその非線形解析による安全性の確認結果について紹介した。

検討結果を通じて、終局荷重作用時の部材変形による外ケーブル応力度増加を設計基準としてどの程度見込むのが妥当かという点について、 20kgf/mm^2 としても問題ないことがほぼ確認できた。

また、 20kgf/mm^2 の外ケーブル応力度増加を設定すると設計荷重作用時の検討において外ケーブル本数が決定され、経済的な設計が可能であることも確認された。

本橋は外ケーブル100%の場合であり、内外ケーブル併用の場合には、一般に終局荷重作用時の安全度がさらに高くなることから、これらの結論は一般の外ケーブル方式にあてはまると考えてよいものと推察される。

今回は詳細設計の枠内で検討を試みたので、多くのパラメータ解析を実施できず、解析的な検討も十分とは言えないが、今後この種のデータが重ねられ、明確な基準化が行われることが望まれる。

筆者らも、今後さらに追加検討を行う予定であり、施工報告とあわせて別の機会に発表したいと考えている。

最後に、本稿が今後の外ケーブル構造の基準化への方向付けに対する一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) (財)高速道路技術センター：外ケーブルを用いたPC橋の設計マニュアル，平成8年8月
- 2) 長谷俊彦，馬場照幸，岡田稔規，吉松慎哉：重信川高架橋の設計報告，プレストレストコンクリート技術協会第5回シンポジウム論文集，pp.397～400，1995.10

【1997年3月27日受付】