

## 報告 終局荷重時における外ケーブル応力増加量算定式に関する検討

粟根 聡\*<sup>1</sup>・幸左 賢二\*<sup>2</sup>・安田 扶律\*<sup>3</sup>・若狭 忠雄\*<sup>4</sup>

**要旨**：外ケーブル方式PC橋について非線形耐荷力解析を行い、終局荷重時における曲げ破壊安全度、外ケーブル応力増加量、終局時たわみ量などを解析的に求めた。また、今回実施した非線形解析結果および国内で既に実施されている外ケーブル構造の非線形解析結果をもとに、終局荷重作用時における外ケーブル応力増加量の簡易算定式の提案を行った。さらに、簡易算定式により算定した外ケーブル応力増加量と非線形解析により得られた値との対比を行った。その結果、今回提案した簡易算定式でもある程度の精度で終局荷重時における外ケーブル応力増加量を推定できることが明らかになった。

**キーワード**：外ケーブル応力増加量、終局荷重作用時、非線形耐荷力解析、簡易算定式

### 1. まえがき

外ケーブル方式の橋梁は、経済性や施工性などの利点から近年新設の橋梁にも積極的に採用される機運が高まっている。一方、外ケーブル方式の橋梁においては、外ケーブルとコンクリート断面との間に平面保持の仮定が成立しないため、曲げ破壊耐力の算定に際して付着のある内ケーブルと同様の取り扱いができず、設計上の問題点として残されている。このようなコンクリートとの付着のない緊張材を有する構造の曲げ破壊耐力の算定方法に関しては、わが国では明確に規定されていないのが現状であるが、道路橋示方書や（財）高速道路技術センターの設計マニュアルなどでは「外ケーブルを内ケーブルと同様に引張抵抗材と見なして、終局荷重時における外ケーブル応力増加量を解析・実験などにより仮定して破壊抵抗モーメントを算定してよい」旨の記述がある〔1〕〔2〕。

外ケーブルの終局荷重作用時における応力増加量を厳密に算定するためには、荷重の増加に伴うコンクリート部材の変形と、それに伴って生じる外ケーブルの相対的な位置変化などを考慮した解析を実施する必要がある。このような解析方法として、外ケーブル構造の材料非線形および幾何学的非線形を考慮した非線形解析法があり、その実施例も近年わが国で増加してきており、実験結果と良い対応を示していることが一般的に確認されている〔3〕。しかしながら、今後設計される全ての外ケーブル方式PC橋に対して非線形解析を実施することは、多大な時間と労力を必要とするため、終局荷重時における外ケーブル応力増加量を容易に算定する手法の提案が望まれている。

本報告は、阪神高速道路公団で実施された外ケーブル方式PC橋（川西工区橋梁）の非線形耐荷力解析の結果と、終局荷重作用時における外ケーブル応力増加量の簡易算定式の提案について報告するものである。

- 
- \* 1 新構造技術（株）大阪支店設計部総括主任、工修（正会員）
  - \* 2 阪神高速道路公団神戸線復旧建設部工事課専門役、Ph.D.（正会員）
  - \* 3 阪神高速道路公団工務部設計課係長、工修（正会員）
  - \* 4 新構造技術（株）総合技術本部副本部長（正会員）

## 2. 川西工区橋梁の非線形耐力解析

### 2.1 川西工区橋梁の概要

本橋梁は、阪神高速道路池田線に計画された内外併用ケーブル工法による5径間連続PC箱桁橋である。橋梁全体一般図を図-1に示す。

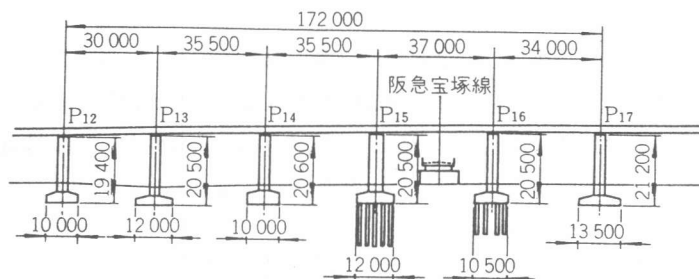


図-1 川西工区橋梁の全体一般図

### 2.2 解析手法

解析手法は、外ケーブルを引張抵抗材とした非線形フレーム解析であり、荷重増分法により増分荷重による変位・断面力を累積する方法を用いた。その際、逐次部材の曲げ剛性と節点座標を更新することにより、ひび割れによる桁の剛性低下と部材の変形に伴う2次的影響を評価した。桁の曲げ剛性は各断面のM~φ曲線から得られた接線剛性を用いた〔3〕。

### 2.3 解析モデル

川西工区橋梁を図-2に示すフレームモデルでモデル化し、主桁は軸剛性(EA)・曲げ剛性(EI)を考慮した梁要素、外ケーブルは軸剛性のみを考慮したトラス要素、横桁はEA=∞、EI=∞の剛体要素、デビエーターはバネ要素とし、バネの曲げ剛性はデビエーター部でのケーブル張力の摩擦ロスに対応する値に設定した。

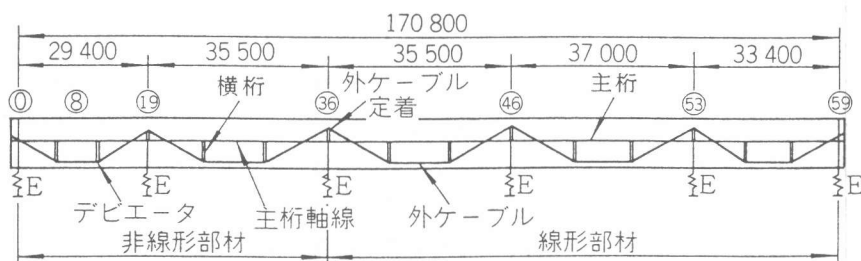


図-2 解析モデル

### 2.4 荷重の載荷方法と解析ケース

モデルへの載荷荷重としては、以下の荷重を考慮した。

- (1) 死荷重(主桁自重、橋面工荷重) D
- (2) プレストレス2次力 P<sub>II</sub>
- (3) 活荷重(p<sub>1</sub>、p<sub>2</sub>) L

活荷重の載荷方法は、線形解析の結果、曲げ破壊安全度がクリティカルとなった側径間中央部の⑧断面と第2支点上の⑯断面に最も不利となるように、図-3に示す載荷方法とした。また、荷重を増加させる組合せケースとしては、以下の2種類の方法とした。

(イ)  $1.3D + \alpha L + P_{II}$ として活荷重のみを増加させる方法

(ロ)  $\beta(D + L) + P_{II}$ として死荷重も含めて増加させる方法

以上、非線形解析の解析ケースとしては表-1の4ケースについて解析を行った。

表-1 解析ケース

解析ケースNo.	载荷方法	荷重の組合せ
1	a	イ
2	b	イ
3	a	ロ
4	b	ロ

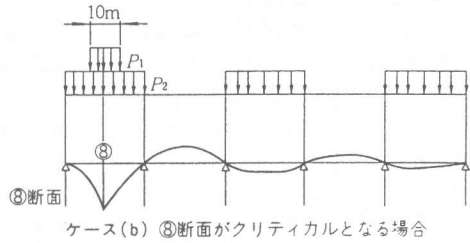
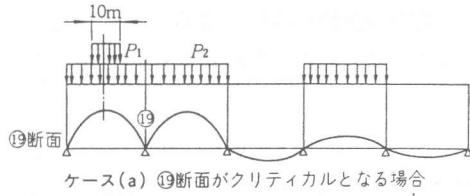


図-3 活荷重の载荷方法

## 2.5 解析結果

非線形解析結果を、表-2に示す。

表-2 非線形耐荷力解析結果

解析ケースNo.	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	
着目断面	19断面	8断面	19断面	8断面	
死荷重による曲げモーメント $M_D$ (tf·m)	-1917	987	-1917	987	
活荷重による曲げモーメント $M_L$ (tf·m)	-637	696	-637	696	
フレットレス2次力による曲げモーメント $M_{PII}$ (tf·m)	395	-137	395	-137	
$1.3M_D$ または $M_D + M_L$	-2492	1283	-2554	1689	
$M_c$ (ひび割れ) 時係数	$\alpha=2.60$	$\alpha=2.16$	$\beta=1.78$	$\beta=1.65$	
$M_y$ (降伏時)	$\alpha=5.12$	$\alpha=4.90$	$\beta=2.38$	$\beta=2.56$	
終局時主桁たわみ量	366mm	539mm	295mm	403mm	
終局時外ケーブル応力増加量	24.6kgf/mm <sup>2</sup>	32.8kgf/mm <sup>2</sup>	22.6kgf/mm <sup>2</sup>	26.8kgf/mm <sup>2</sup>	
終局時係数	線形解析	$\alpha=4.77$	$\alpha=3.97$	$\beta=2.17$	$\beta=2.40$
	非線形解析	$\alpha=5.89$	$\alpha=6.06$	$\beta=2.50$	$\beta=2.83$
	モーメント再配分率	K=1.23	K=1.53	K=1.15	K=1.18

注) ここで $\alpha$ 、 $\beta$ は、前節(イ)(ロ)に示す荷重係数

## 2.6 解析結果のまとめ

非線形解析により得られた結果をまとめると以下の通りである。

- ①終局時の外ケーブル応力増加量 $\Delta\sigma_p$ は、 $\Delta\sigma_p=20\sim35\text{kgf/mm}^2$ となっている。
- ②終局時のたわみ量 $f$ は、 $f=295\sim540\text{mm}$  ( $L/102\sim L/56$ 、 $L$ :支間長)となっている。
- ③モーメントの再配分は、ケース3が最も小さい結果となった。ケース3では死荷重と活荷重を併せて増加させているが、死荷重のような等分布荷重が増加される場合には、クリティカル断面のみならず他の断面でも応力の余裕がないためモーメントの再配分が起り難いものと考えられる。

### 3. 外ケーブル応力増加量の簡易算定式の提案

#### 3.1 既往の非線形解析実施例

実構造物の設計および実験解析も含めて、外ケーブル構造の非線形耐荷力解析が実施された主な例を表-3に示す。

表-3 外ケーブル構造の非線形解析例

橋梁名	①阪神高速道路公団唐櫃橋	②日本道路公団岩滑沢橋	③日本道路公団重信高架橋(試験体)	④首都高速道路公団湾岸線橋梁
支間割り L	2@76.2m	6@50.0m	2@15.7m	3@50.0m
桁高 H (L/H)	3.0~7.0m (1/25.4~1/10.9)	3.7m (1/13.5)	0.87m (1/18.0)	2.8m (1/17.9)
主桁断面	箱桁	箱桁	箱桁	箱桁
非線形解析手法	M-φ曲線を用いたフレーム解析	ファイバーモデルを用いたフレーム解析	ファイバーモデルを用いたフレーム解析	ファイバーモデルを用いたフレーム解析
外ケーブル比率*1	10~67%	34%	74%	70%
終局時主桁たわみ量 (L/96)	790mm	790mm (L/63)	270mm (L/58)	—
外ケーブル固定区間長	141m	①100m ②200m	①15.7m ②31.4m	50m
終局時外ケーブル応力増加量	23kgf/mm <sup>2</sup>	①52kgf/mm <sup>2</sup> ②26kgf/mm <sup>2</sup>	①50kgf/mm <sup>2</sup> ②35kgf/mm <sup>2</sup>	35~40kgf/mm <sup>2</sup>
モーメント再配分率	K=2.18	K=1.36	K=1.44	—

\*1) 全PC鋼材断面積に対する外ケーブル断面積の比率

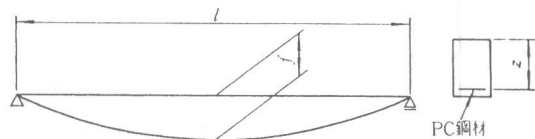
これらの非線形解析結果の特徴をまとめると、以下ようになる。

- ①終局時の外ケーブル応力増加量は $\Delta\sigma_p=20\sim50\text{kgf/mm}^2$ であり、外ケーブル固定区間長が短い方が外ケーブル応力増加量が大きくなる傾向となっている。
- ②モーメントの再配分率は、載荷ケースによっても異なるが、1.4~2.2の範囲となっている。
- ③終局時のたわみ量は実橋、試験体を含めて $L/60\sim L/100$  (L:スパン)程度となっている。終局時のたわみ量とスパンとの比は、一定の値で仮定できるものと考えられ、これにより終局荷重作用時の外ケーブル応力増加量を推定できるものと考えられる。

#### 3.2 既往の外ケーブル応力増加量算定式

##### a) DIN4227の簡易算定式

DIN4227の「終局荷重時のアンボンドケーブルの伸び量」によると、終局荷重時の着目位置でのたわみ量を $f$ で表し、桁のたわみ形状を図-4に示すように放物線と仮定すると、PC鋼材の伸び量 $\Delta L$ は、近似的に(1)式で求められる[5]。



l: 支間長  
f: 着目位置(破壊位置)でのたわみ量(=l/50)  
z: 有効高さ

図-4 桁のたわみ形状

$$\Delta L = \frac{3 f Z}{L} \text{ ----- (1)}$$

ここで、DIN4227では $f=L/50$ と仮定しており、従って $\Delta L$ は(2)式で求められる。

$$\Delta L = \frac{3 f Z}{L} = \frac{3 \times (L/50) \times Z}{L} \div \frac{Z}{17} \text{ ----- (2)}$$

b) Virlogeuxの簡易算定式

Virlogeuxは、外ケーブル方式プレキャストブロック桁の外ケーブル応力増加量の簡易算定式を提案している [6]。

まず、外ケーブル方式PC桁のたわみ形状を図-5に示すように、直線形状でスパン中央部で目地が開くと仮定すると、桁のたわみ量  $f$  は、(3)式で表される。

$$f = (L/2) \cdot \sin \theta \quad \text{----- (3)}$$

また、目地の開き幅  $\delta$  は(4)式で表される。

$$\delta = 2Z \sin \theta \quad \text{----- (4)}$$

ここで、外ケーブルの伸び量  $\Delta L$  を、 $\Delta L = 2\delta$  と仮定し(3)を(4)に代入すると(5)式が得られる。

$$\Delta L = \frac{4 f Z}{L} \quad \text{----- (5)}$$

3. 3 簡易算定式の提案

本節では、前節で示した2つの外ケーブル応力増加量簡易算定式をもとに、外ケーブル方式PC橋の終局荷重作用時のたわみ量を推定することにより、終局荷重作用時の外ケーブル応力増加量算定式を提案する。

今回行った非線形解析結果および既往の非線形解析結果から、終局荷重作用時のたわみ  $f$  は平均的に、 $f = L/70$  で表される。従って、PC鋼材の伸び量  $\Delta L$  は、(6)式で表される。

$$\Delta L = \frac{\alpha (L/70) Z}{L} = \frac{\alpha Z}{70} \quad \text{----- (6)}$$

(6)式において  $\alpha$  は、ひび割れ分散性に関する係数であり、ひび割れ分散性が良好な場合は  $\alpha=3$ 、ブロック桁などひび割れ分散性が良好でない場合には  $\alpha=4$  となる。(6)式から、終局荷重作用時の外ケーブル応力増加量  $\Delta \sigma_p$  は、(7)式で表される。

$$\Delta \sigma_p = \frac{\alpha Z E p}{70 L_1} \quad \text{----- (7)}$$

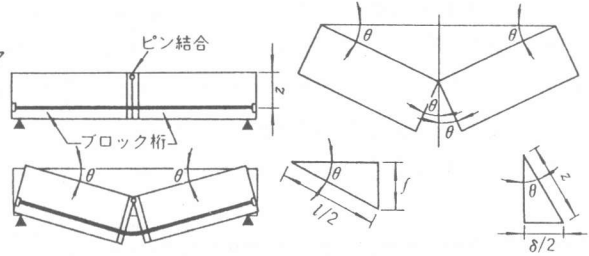
$L_1$ : 外ケーブル固定区間長

3. 4 非線形解析結果との対比

今回行った非線形解析および既往の非線形解析により求められた終局荷重作用時の外ケーブル応力増加量と、(7)式により求めた外ケーブル応力増加量との比較を表-4に示す。

表-4から分かるように、今回提案した終局時における外ケーブル応力増加量の簡易算定式により算定した応力増加量と、非線形解析により得られた値との差は、岩滑沢橋を除けば-6~+11 kgf/mm<sup>2</sup>であり、ほぼ±10kgf/mm<sup>2</sup>の範囲内に収まっている。また、全体的に非線形解析値よりも簡易算定式による値の方が小さい傾向にあり設計上安全側の評価となる。しかしながら、重信高架橋や湾岸線橋梁など簡易算定式による応力増加量の方が非線形解析値よりも大きな場合もあり、本提案式を実設計に用いる場合は多少の安全率を考慮する必要があると思われる。

また、岩滑沢橋では簡易式による外ケーブル応力増加量は非線形解析値の50%になっており、



ここに、 $l$ :スパン  $z$ :有効高  
 $f$ :終局時のたわみ  
 $\theta$ :終局時のたわみ角  
 $\delta$ :目地の開き幅

図-5 ブロック桁のたわみ形状

誤差の大きな橋梁もあることも明らかとなった。この原因としては、岩滑沢橋は外ケーブル比率が30%と他の橋梁と比較して小さいため、終局時たわみ量が大きく、全内ケーブル方式の橋梁に近い挙動を示したためではないかと考えられる。なお、唐櫃橋の外ケーブル比率も10~67%と小さいが、唐櫃橋の場合は曲げ破壊に対するクリティカル断面の外ケーブル比率が67%と大いため、本提案式と非線形解析値との誤差が小さくなったものと思われる。

表-4 非線形解析との比較

橋梁名	①阪神高速 道路公団 川西工区	②阪神高速 道路公団 唐櫃橋	③日本道路 公団 岩滑沢橋	④日本道路 公団 重信高架橋	⑤首都高速 道路公団 湾岸線橋梁	
外ケーブル固定区 間長 $L_1$ (m)	65.5m	141.0m	①100m ②200m	①15.7m ②31.4m	50.0m	
有効高さ $Z$ (m)	1.90m	2.82m	3.045m	0.83m	2.67m	
ひび割れ分散性 係数 $\alpha$	3.0	3.0	3.0	4.0 フレキシブルセメント	3.0	
外ケーブル 応力 増加量	非線形 解析値 (平均値)	26.7kgf/mm <sup>2</sup>	23kgf/mm <sup>2</sup>	①52kgf/mm <sup>2</sup> ②26kgf/mm <sup>2</sup>	①50kgf/mm <sup>2</sup> ②35kgf/mm <sup>2</sup>	35~40kgf/mm <sup>2</sup>
	簡易式	25kgf/mm <sup>2</sup>	17kgf/mm <sup>2</sup>	①26kgf/mm <sup>2</sup> ②13kgf/mm <sup>2</sup>	①60kgf/mm <sup>2</sup> ②30kgf/mm <sup>2</sup>	46kgf/mm <sup>2</sup>
非線形解析値と 簡易式との差	-1.7kgf/mm <sup>2</sup>	-6kgf/mm <sup>2</sup>	-13~-26 kgf/mm <sup>2</sup>	-5~+10 kgf/mm <sup>2</sup>	+6~+11 kgf/mm <sup>2</sup>	

#### 4. まとめ

今回、外ケーブル方式PC橋の終局時における外ケーブル応力増加量を容易に算定する方法として、主桁のたわみ形状と、終局時のたわみ量、外ケーブルの有効高さ、外ケーブル固定区間長をパラメーターとした簡易算定式の提案を行った。

今回提案した簡易算定式により算定した外ケーブル応力増加量と、非線形解析により得られた値との比較を行った結果、今回提案した簡易算定式でも、ある程度の精度で終局荷重時における外ケーブル応力増加量を推定できることが明らかになった。

しかしながら、岩滑沢橋のように外ケーブル比率の小さな橋梁では、簡易算定式と非線形解析結果との間に大きな差が生じた。終局時における外ケーブル応力の増加量算定式においては、外ケーブル比率も重要なパラメーターであると考えられるため、今後はさらに非線形解析の実績を増やし、外ケーブル比率も考慮したより精度の高い簡易式の提案を行っていかねばならないと考えている。

#### 参考文献

- [1] (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説III コンクリート橋編，平成8年12月
- [2] (財)高速道路技術センター：外ケーブル方式PC橋の設計マニュアル，平成8年8月
- [3] 睦好，土田，MATUPAYONT，町田：外ケーブルPC部材の曲げ性状および曲げ耐力算定法に関する研究，土木学会論文集，No.508/V-26，PP67-77，1995.2
- [4] 粟根，幸左，若狭，谷口：内外併用ケーブル方式PC梁の耐荷力解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.2，1996
- [5] DIN4227 Teil6 14 Plattenartige Bauteil, Decken, Mai 1982
- [6] Michel Virlogeux著，若狭，西村訳：アウトケーブル構造における非線形解析，橋梁，1989.9~11