

(13) 生口橋PC桁ケーブル定着部の設計について

本四公団向島工事事務所	藤原 亨
本四公団向島工事事務所	西本 聡
川田建設(株)大阪支店 正会員	○ 梶川 靖治
住友建設(株)広島支店 正会員	森田 雄三

1. はじめに

生口橋は本州四国連絡橋の尾道-今治ルートに架けられる複合斜張橋であり、図-1に示すように、その主桁は中央径間が鋼箱桁、両側径間がPC箱桁という混合構造形式となっている。また、斜張ケーブル(以下、「斜ケーブル」という)の形状は、ファン形式14段2面吊りであり、ケーブルにはパラレルワイヤストランド(亜鉛メッキ鋼線、素線径 $\phi 7\text{mm}$)の表面をポリエチレン加工したロングラウトタイプのものが用いられる。

この側径間PC桁の斜ケーブル定着部はいわゆる支圧板形式と呼ばれるもので、写真-1に示すように、主桁幅員端部の逆台形状の定着ブロック(定着突起)中にダクト(貫通孔)を設け、その下端に支圧板(極厚鋼板)を埋め込んだ構造となっている。なお、ダクトには孔内補強を兼ねて薄肉鋼管(ケーシング・パイプ、以下単に「パイプ」という)が埋め込まれる。

ここでは、この斜ケーブル定着構造の設計に際し、解析的かつ実験的に二、三の検討を加えたので、それらの結果と最終設計成果の概要について報告する。

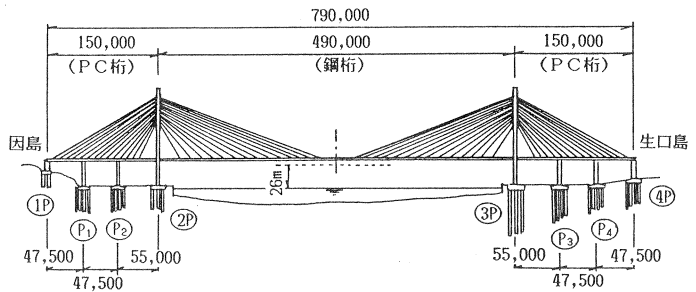


図-1 生口橋一般図

2. 検討事項

本橋では斜ケーブル張力が大きい(最大設計張力 593 トン)ことからダクト直径が最大約 40cm にもなること、また、定着ブロック内は斜ケーブルと横締めPC鋼材が交差し、各種補強筋が入り組み極めて複雑な配筋状態となることなどから、以下のような検討事項が考えられた。

① 割裂力算定式の妥当性：一般に支圧板背面の補強設

計ではメルシュにより提案された割裂力の近似算定式¹⁾が利用されることが多いが、本橋のように断面欠損が大きい場合にも適用できるかどうか疑問である。

② グリッド筋による補強効果：支圧板の背面補強は、一般にはスパイラル筋が使用されることが多いが、本橋では施工性向上のためにグリッド筋としたい。しかし、これまで大きな荷重の作用する定着部についてグリッド形式とした例が少なく、その耐荷性能(耐荷力およびひび割れ性状など)が明らかでない。

③ パイプに取り付けたリブの効果：支圧板背面の支圧・割裂応力のより一層の分散を図

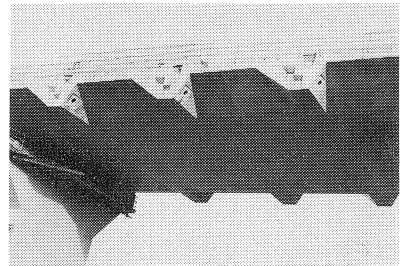


写真-1 定着部外観

るため、支圧板とパイプとを溶接一体化し、さらにパイプ根元外周にリブを取り付けることを検討する。過去、リブ付きパイプをスパイラル筋で補強した実験においてリブによる荷重分散効果を確認した例²⁾はあるが、グリッド筋と組み合わせた実験例は皆無のようである。

④ 定着部のひびわれ性状：定着部補強の際に想定するひびわれ幅の値としてどの程度見込めばよいか明確でない。

そこで、①と③については定着部近傍に着目した有限要素法により、また、②～④については模型定着体についての静的荷重試験により、それぞれ検討を加えることにした。








3. 有限要素解析による検討

(1) 解析目的と解析方法

本解析の主たる目的は、中実体に対し誘導された割裂力算定式についてダクトによる断面欠損がある場合への適用の妥当性を判定することおよびリブによる支圧・割裂応力の分散効果を調べることである。

表-1に示す解析ケースについて、3次元FEMによる弾性数値解析を行うものとし、対象とする定着ブロックを図-2(a)のような軸対称円柱体としてモデル化し、図(b)の軸対称体要素(リング要素)を用いて図(c)のように要素分割した。基本的には四角形断面のリング要素の組み合わせであるが、鋼(支圧板とパイプ)とコンクリートとの接触面はダブル接点としてGAP(ギャップ)要素を配置し、鋼・コンクリート間の荷重伝達あるいは離間を再現することにした。鋼およびコンクリートは弾性的に挙動するものとし、鋼・コンクリート間の付着あるいは摩擦は無視した。また、コンクリートはひび割れないものとし、鉄筋の影響も考慮していない。

表-1 解析内容と解析結果の概要

ケース	モデル	形状・寸法	解析内容	解析結果
1	中実円柱	 D=1200, d=800 D/d=1.5 支圧板無し	Biltscherらによる割裂応力度に着目した数値解析結果 ³⁾ と比較するためのモデルであり支圧板を介さず直接コンクリート表面に荷重する。	割裂応力度分布が鉛直方向、半径方向ともBiltscherらによる数値解析結果と一致をみたことから、本解析方法の妥当性が検証された。
1'	中実円柱	 D=1200, d=800 D/d=1.5 支圧板有り	Case 1において、支圧板を介しての荷重の影響の有無を調べる。	支圧板を介して荷重を作用させると、支圧板の無い場合に比べ、分布形状はほとんど変わらないが、割裂応力度のピーク値が若干小さくなる。
2	中実円柱	 D=2000, d=800 D/d=2.5	既往の割裂応力の評価式はほとんど全てこのような中実体について誘導されており、以降の比較の基準となる基本モデルである。	割裂応力度の分布形状は、Biltscherらが得ている傾向と一致する。割裂力の作用荷重に対する比は約15%であり、メルジュの提案値とほぼ一致する。
3	有孔円柱	 D=2000, d=800 D/d=2.5 パイプ欠損考慮 (φ=400)	パイプ挿入のために設けた円孔の断面欠損による応力・変形状の変化を調べる。	円孔により載荷面積が減少するため、支圧板直下の支圧応力度の値は中実体に比べ大きくなるが、その影響範囲はほぼ載荷半径分位の深さである。割裂応力度は、中実体に比べピーク値で1.3倍位大きくなり、深さ方向にも若干大きめの分布形状となる。割裂力Zは作用荷重の約15%であり、有孔円柱に対してもメルジュの算定式が適用できるようである。
4	パイプ挿入	 D=2000, d=800 D/d=2.5 パイプ欠損考慮 (φ=400)	パイプを円孔内に挿入し、パイプの外周面に付着力および摩擦力が作用しないと仮定したときのパイプによる円孔内面の補強効果を調べる。	局部的な点を除いて、全体的な応力・変形状はパイプ無しの場合とほぼ完全に一致しており、また、パイプにはほとんど応力が発生していないことから、パイプによる円孔の補強効果はほとんど無いものと考えられる。特に、変形状ではパイプとコンクリートとの接触面に離間がみられる。
4'	周辺プレストレス導入	 パイプ考慮 (t=14)	パイプを挿入し、かつコンクリートブロック外周面から一様な外圧を作用させ、周辺プレストレスによる影響を調べる。	プレストレスの効果により割裂応力度は全て圧縮側となり、引張応力度の発生はみられない。プレストレスの支圧応力分布に及ぼす影響はほとんど無い。
5	リブ付きパイプ挿入	 D=2000, d=800 D/d=2.5 パイプ欠損考慮 (φ=400) リブ付きパイプ考慮 (t=14)	パイプ外周面の支圧板近傍にリブを設け、リブによる支圧応力度の分散効果を調べる。	支圧板直下の支圧応力度は、リブの無い場合に比べて約60%程度に減少しまた、パイプがリブ位置で局部曲げ変形を受けていることなどからリブによる荷重分散効果が明瞭である。割裂力はリブ無しに比べピーク値が若干小さくなるとともに、断面全体に作用する総割裂力もリブ無しに比べわずかに小さくなる傾向がみられる。リブ付きの場合もZ/P=15%である。

(2) 解析結果とその考察

全ケースについての結果の要約を表-1に示す。

通常、割裂に対する補強は局所的な「応力」ではなく断面内に分布する応力を積分した「力」で評価して設計するが、ここでも「割裂力」に着目し、その鉛直方向分布を図-3に示す。なお、横軸は単位深さ当たりの割裂力であり、全積分値(Z)を図中の表に示す。この図において、Case 2(中実), 3(有孔)および4(パイプ挿入)の分布性状を比較すると、3者間にはほとんど差の無いことがわかる。また、図中の表より明らかに、断面に作用する総割裂力は全ケースについて大差が無く、総割裂力Zと作用荷重Pとの比についても約15%前後であり、これはシャイブに対する2次元解析あるいは四角柱に対する3次元解析の結果¹⁾ともほぼ一致するものである。さらに、メルシュが提案した割裂力に対する近似算定式¹⁾

$$Z \approx 0.25 P (1 - a / d')$$

ここに、a: 載荷幅、d': 部材幅において、a = d (載荷面の直径)、d' = D (円柱体直径)として

$$a / d' = d / D = 800 / 2000 = 0.4$$

を代入した値とも一致するものであり、断面欠損のあるCase 3~5についても近似算定式が適用できるようである。また、リブ付きのCase 5に対するZは他のケースと比べ若干小さくなっているもののほぼ同等であることから、リブは割裂力の低減にはあまり効果がないものと判断される。

(3) 解析結果の総括

以上の解析結果より、つぎのことがいえる。

- ① 割裂力の算定に対し、ダクトによる断面欠損がある場合でもメルシュの近似式¹⁾が適用できる。
- ② リブは支圧応力度の低減には有効であるが、割裂力の低減にはあまり効果がない。

(a) 解析モデル (c) 要素分割例 (Case 5)

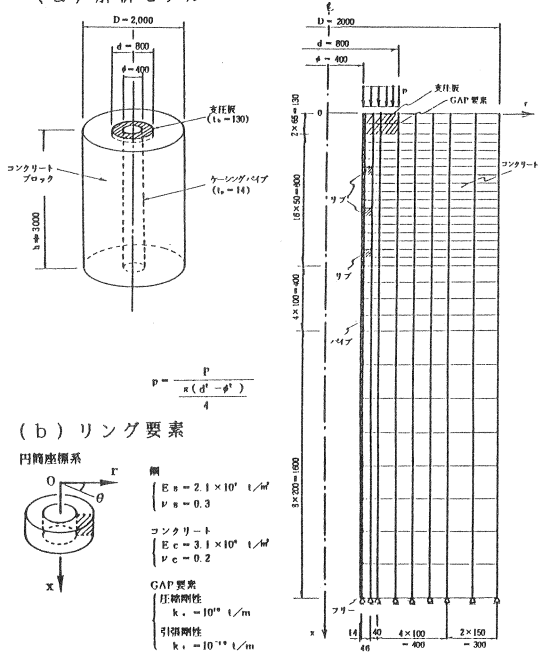


図-2 解析モデルと要素分割例

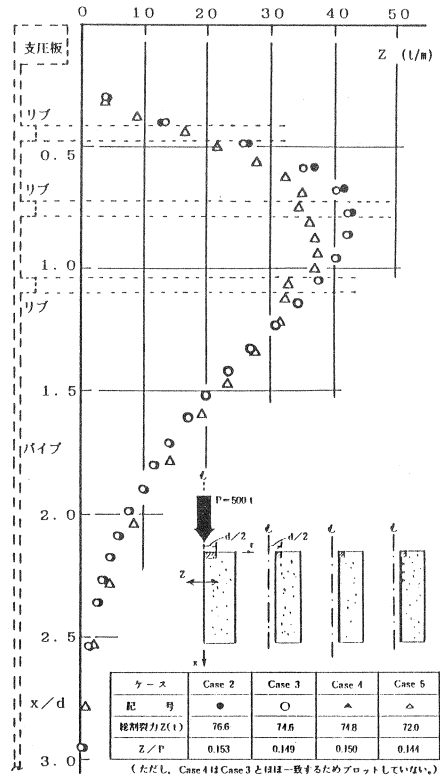


図-3 割裂力分布と総割裂力

4. 静的載荷試験による検討

(1) 実験目的と供試体

本実験の主たる目的は次のとおりである。

- ① スパイラル筋とグリッド筋との耐荷機構
あるいは耐荷性能の相違を明らかにする。
- ② パイプに取り付けたリブによる支圧・割
裂力の分散効果および耐荷性能に及ぼす
影響を確認する。
- ③ スパイラル筋とグリッド筋ならびにリブ
の有無によるひびわれ性状の相違を確認
する。

実験対象は試験装置等との関係から定着部
近傍に着目した縮尺率約1/3の角柱体とし、
その供試体の形状・寸法を図-4に示す。

供試体は、表-2のように各種類1体ずつ計
6体である。これらは割裂補強筋の種類・量と配置およびパイプのリブの有無の違いだけ
で、形状・寸法などは全く同一である。

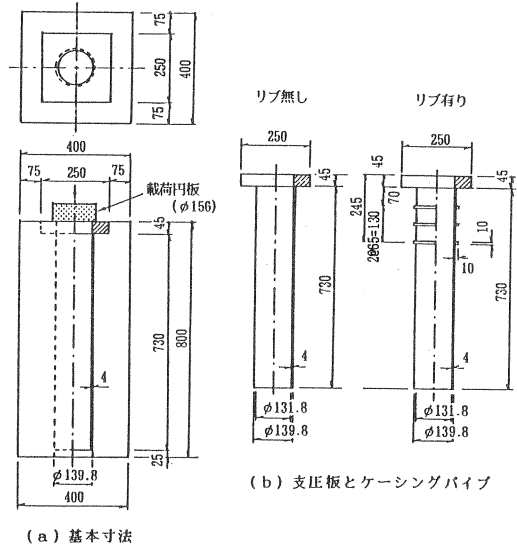
(2) 載荷方法

載荷試験は大阪工業大学構造実験センターで行い、支圧板を上にして供試体を載荷台上
にセットし、500ト油圧ジャッキにより上から圧縮荷重を加えた。供試体に対し想定した
ケーブル引張破断荷重 P_u および設計荷重 P_a は、それぞれ165トおよび66トであった。

なお、試験時材齢におけるコンクリートの材料試験結果の平均値は、圧縮強度 = 382
kgf/cm²、引張強度 = 29 kgf/cm²および弾性係数 = 2.99×10^5 kgf/cm²であった。

表-2 供試体の種類

記号	S	SR	G ₁	G ₂	G ₂ R	G ₂ 'R	
特徴	割裂補強の一般的な形式 であり、本実験シリーズ での比較の基準とする。	スパイラル筋について、 リブの耐荷性能に及ぼす 効果を確認する。	グリッド筋を支圧板直下 に密に配置したものであ る。	割裂応力が生じる範囲を カバーするようグリッド 筋を配置した実構で採用 予定の配筋である。	G ₂ について、リブの耐 荷性能に及ぼす効果を確認 する。	G ₂ 'Rのグリッド筋量を 約2.3倍とし、補強筋 量の増加が耐荷性能に及 ぼす効果を確認する。	
補強筋	形式	スパイラル筋 D8×9巻	グリッド筋 D8×18本、3段配置	グリッド筋 D8×18本、4段配置	グリッド筋 D8×18本、4段配置	グリッド筋 D10×18本、4段配置	
	断面積	5.70 cm ²			12.84 cm ²		
	総延長	9.1 m			13.7 m		
リブ	無し	有り	無し	無し	有り	有り	
形状・寸法							
	最大荷重 (t)	247.5	275.0	282.5	276.0	276.9	325.7



(a) 基本寸法

図-4 供試体の形状・寸法

(3) 実験結果とその考察

a) 補強筋のひずみ

割裂引張力により補強筋に生じるひずみの試験体毎の平均値を荷重に対しプロットしたものが図-5である。可視ひびわれのない70し付近までは、全供試体はほぼ同じ荷重-ひずみ関係となっていることから、各供試体に作用する弾性範囲内の全割裂力は、補強筋形式、リブの有無あるいは鉄筋量に関わらず一定であることがわかり、前節のFEM解析結果とも一致するものである。

b) パイプの相対ずれ

パイプ下端における相対ずれの荷重に対する変化を図-6に示す。S (○印)とSR (●印)では同一荷重に対し常にSRの方が小さくリブの効果が顕著であり、最終的に耐荷力 P_{max} も約10%程度大きくなっている。これに対し、 G_2 (□印)と G_2R (■印)とでは最大荷重に近づくと徐々に両者の差が縮まり、最大荷重では G_1 も含めてほぼ同じ値となってしまう。これらのことから、スパイラル筋とグリッド筋とではリブの効果を含めた耐荷力機構の異なることが予想される。

c) 耐荷力

表-1の最下段に各供試体の最大荷重を示す。Sと G_1 とでは G_1 の方が約14%大きく、また、S、SRと G_2 、 G_2R とを比べると、いずれもグリッド筋による方が大きい。これは主として両者における補強鉄筋量の違いによるものと考えられ、供試体の鉛直断面を横切る鉄筋の断面積は同表中に示すように等しいが、使用したグリッド筋の総延長はスパイラル筋の約1.5倍であった。

(4) 実験結果の総括

静的載荷試験結果より、次のようなことが言える。

- ① スパイラル筋とグリッド筋との間には、応力・変形性状あるいはひびわれ性状などについて明確な差異はみられなかった。ただし、耐荷力的にはグリッド筋の方が若干大きかった。
- ② リブの効果については、スパイラル筋の場合にはひびわれ幅および耐荷力の点でその有効性が認められたが、グリッド筋の場合には顕著な効果はみられなかった。

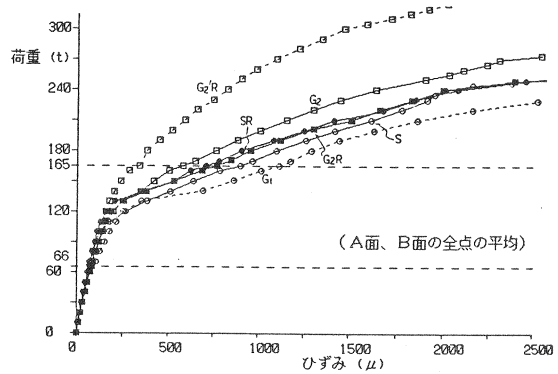


図-5 補強筋の荷重-ひずみ曲線

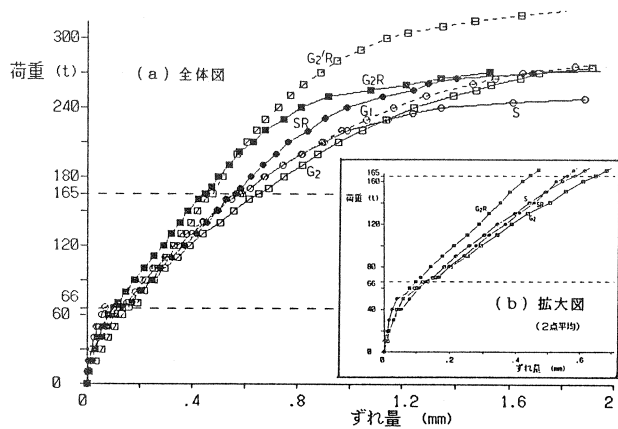


図-6 パイプの荷重-相対ずれ曲線

5. ケーブル定着部の設計

本橋の斜ケーブル定着部は、上記の検討結果をもとに、以下の基本方針に従って許容応力度設計法により鉄筋コンクリート部材として設計した。

- ① より一層の安全性のために、鉛直方向プレストレスを導入する。
- ② 支圧板の背面補強筋はグリッド形式とする。
- ③ パイプにはリブを取り付けない。

最終的な補強配筋図を図-7と8に、実際の配筋途中の状況を写真-2に示す。

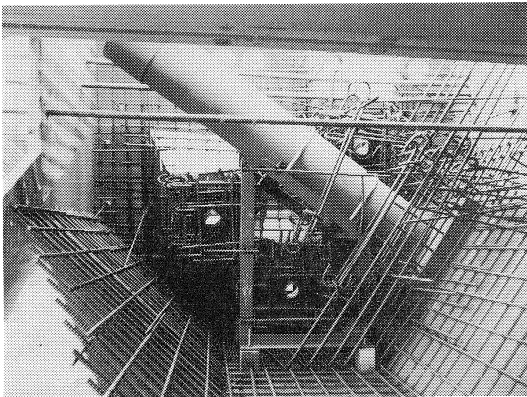


写真-2 定着部の配筋状況

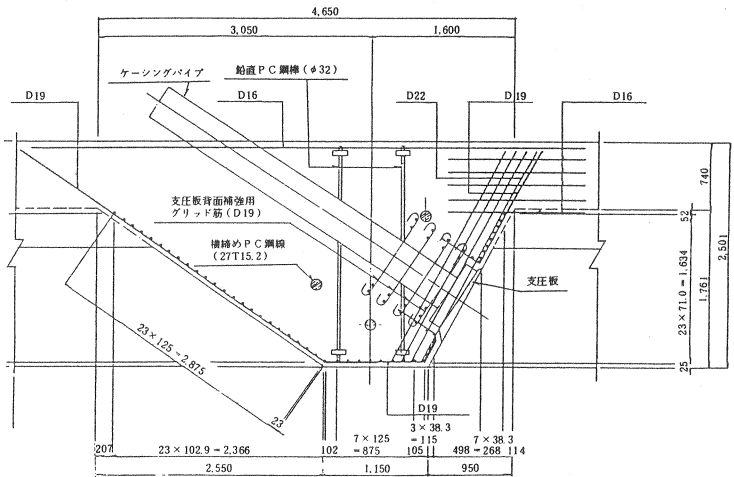


図-7 定着ブロック側面

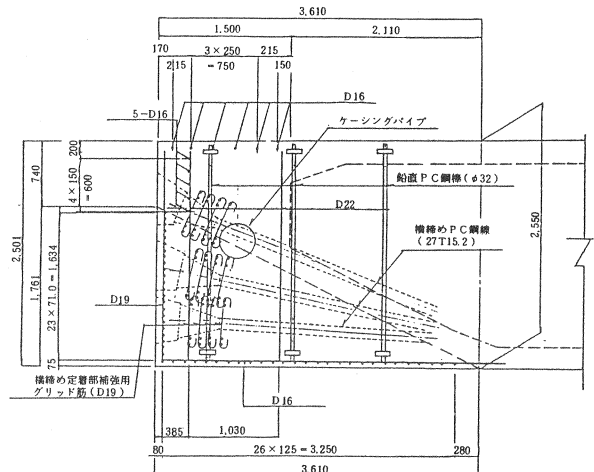


図-8 中間横桁部の断面

6. おわりに

PC桁の斜ケーブル定着部の設計に際し、(財)海洋架橋調査会の「生口橋主桁複合構造に関する調査研究委員会」(委員長、田島二郎埼玉大学教授)において種々御審議いただき、委員の方々より数多くの有意義な御意見を賜った。ここに、関係各位に対し深甚の謝意を表します。

なお、最終詳細設計は、生口橋PC上部工(その1)工事(住友建設(株)、オリエンタル・コンクリート(株)、(株)銭高組共同企業体)と同(その2)工事(川田建設(株)、ヒール・イス・コンクリート(株)、富士ヒール・イス・コンクリート(株))が合同で行ったものである。

参考文献

- 1) 成井・上坂共訳(レオンハルト・メニッヒ共著):レオンハルトのコンクリート講座②、続・鉄筋コンクリートの設計、鹿島出版会、pp.57~95、昭和59年7月。
- 2) 神鋼鋼線工業(株):太径ケーブル用コンクリート定着部に関する研究報告書、昭和62年8月。
- 3) R. Hiltcher und G. Florin: Spaltungsspannungen in kreiszylindrischen Säulen, die durch eine kreisförmige Flächenlast zentrisch-axial belastet sind, Bautechnik, s.90, 3/1972.