

論文

[2142] PC 斜版付箱桁橋の耐荷力解析

郡政人^{*1}・岩永巧^{*2}・幸左賢二^{*3}・奥田敏康^{*4}

1. はじめに

斜版付箱桁橋（以下斜版橋と呼ぶ）は通常の箱桁橋に対し、斜材のケーブルをコンクリートで被覆しPC部材として剛性を増した構造である。斜材を有することから、斜張橋の特殊形式とも考えられ、主桁高を低くすることが可能である。また部材をコンクリートで被覆することにより、1) 斜材が腐食から防護でき、風に対する防振効果を有する、2) ケーブルの応力変動が小さく、ケーブルの疲労問題が少ない、3) 全体剛性が増すことから変形量が小さくなり安定性を増す、などの長所を持っている。このような長所にもかかわらず、世界的にみても数例しか施工実績がないことから斜版橋についての明確な設計及び解析手法は確立されていないと考えられる。そこで現在計画中の3径間連続桁（75+140+70m）を対象に簡易耐荷力解析を行った。その結果、PC斜版の主塔結合部が最もクリティカルとなった。この部材は設計荷重に対応すべくプレストレスが導入されているが、終局荷重には曲げ、せん断に加えて高レベルの軸引張力が作用する。このような軸引張力作用下での断面耐力について言及しているものは少なく、設計上の判断が難しい問題となる。さらに、この斜版は軸剛性の低下による断面力の再分配に与える影響が大きい事がわかった。そこで、引張軸力下における実験を実施し、その終局耐力の妥当性および軸剛性の変化について検討した。

2. 全体系簡易耐荷力解析

斜版橋全体としての耐荷力特性を簡易的に調べるために、各断面における破壊抵抗モーメントを求め、設計荷重に対してどの程度の安全度を保有しているかを照査した。すなわち、主要断面についての設計荷重レベルにおけるモーメント・軸力を求め、次に抵抗モーメントと設計モーメントの比を求めて安全度の目安とした。なお、検討したモデルは図-1に示す橋長285mの3径間連続橋モデルとして断面力の照査を実施した。

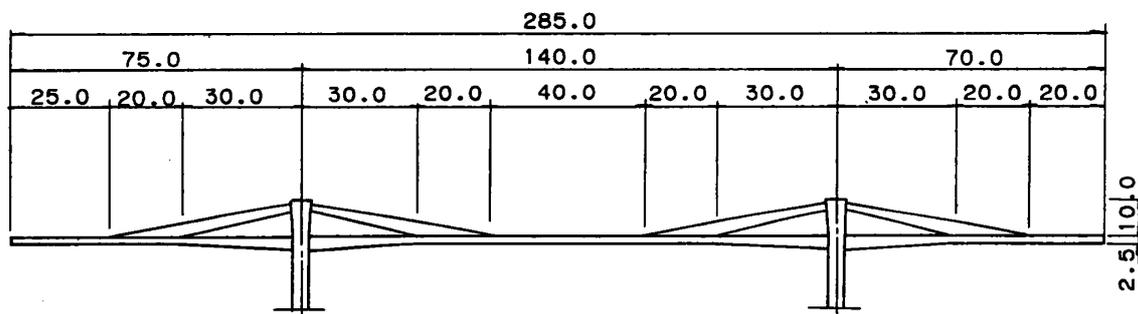


図-1 橋梁一般図 (m)

*1 ㈱東京建設コンサルタント 関西支店 技術一部 課長代理 (正会員)

*2 阪神高速道路公団 神戸建設部 設計課 設計第三係長

*3 阪神高速道路公団 工務部設計課 技術係長、Ph. D. (正会員)

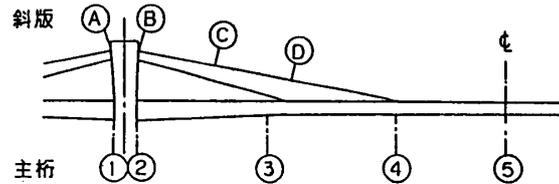
*4 ㈱オリエンタルコンサルタンツ 大阪支社 技術第二部 主任技師

結果は表-1に示すように、主桁の中央断面および中間支点部で安全度が3.1程度と比較的小さくなるが、さらに斜版主塔結合部での安全度が2.5程度と小さくなり、もっともクリティカルであることがわかる。

表-1 部材安全度一覧表

部材番号	α	β	
主桁	①	14.4	4.1
	②	9.1	3.2
	③	6.7	3.6
	④	14.0	3.7
	⑤	5.0	3.1
斜版	A	5.8	2.6
	B	5.3	2.5
	D	5.3	2.8

$D + \alpha L = MR$
 $\beta (D + L) = MR$
 MR : 破壊抵抗曲げモーメント
 D : 死荷重による外力
 L : 活荷重による外力



斜版主塔結合部のNu-Mu相関曲線を図-2に示すが、これは道路橋示方書に基づく方法により、同示方書のPC鋼線およびコンクリートの応力-ひずみ関係を用いて求めたものである。[2]ただし、高軸力の引張を生じる領域でのNu-Mu相関関係について言及されたものは少ないため、実験的な照査が必要と考えられる。

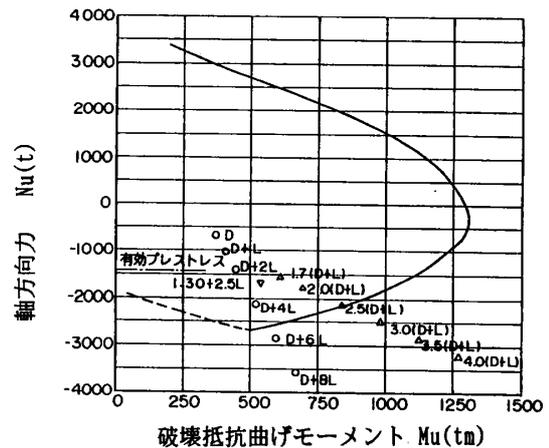
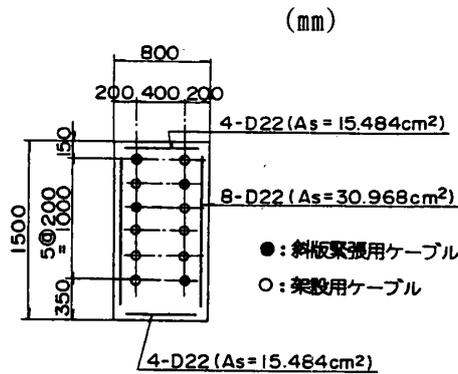


図-2 斜版主塔結合部Nu-Mu相関曲線図

3. 斜版主塔結合部の影響度解析

安全度の最も小さい斜版主塔結合部に着目して、再分配後の断面力を算定した。解析方法として以下の2ケースについて検討した。

- 1) ケース1 斜版主塔結合部が先ず破壊に至ると考えられることから、主塔結合部を極端に考え、ピン結合とした解析を行った。この場合の外力としては、斜版打設後に作用する斜版自重と橋面工とした。
- 2) ケース2 斜版主塔結合部は、曲げとせん断力に加えて高レベルの軸引張力が作用するため、曲げ剛性 (EI) だけでなく軸剛性 (EA) の大幅な低下が予想される。この軸方向の剛性低下を簡単に評価するために、斜版主塔結合部から影響度の大きいと考えられる部材長の1/4区間は、コンクリートを無視した斜材ケーブルだけの剛性とした。作用外力はケース1の場合と同様とした。

検討結果を図-3に示すが、ケース1の場合の主桁断面力は「剛結合」の場合とほとんど同じで、中間支点部においてわずか数%増加しただけである。それに比べてケース2の場合は、曲げモーメントが1.6~2.0倍となり、主桁断面力に大きく影響を及ぼす。さらに斜版の主桁側断面力は約4倍の曲げモーメントが生じる事となった。以上のことから、斜版主塔結合部は曲げ耐力だけでなく、軸剛性低下の影響評価も重要である事がわかる。

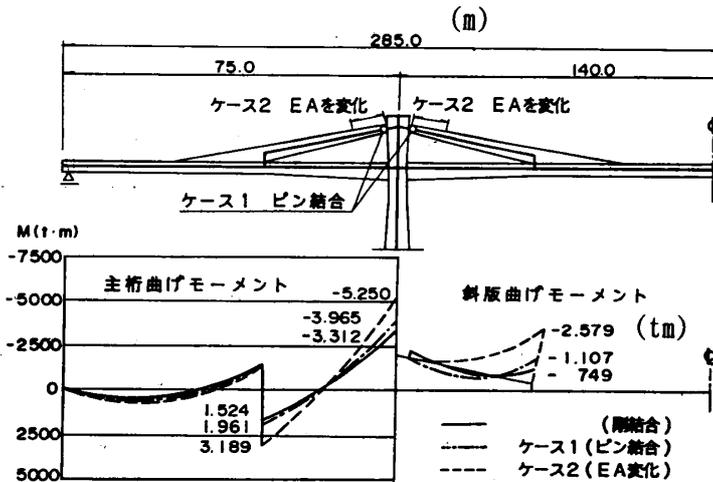


図-3 斜版・主桁断面力

4. 斜版主塔結合部の実験

4.1 実験計画

(1) モデル供試体の作成

上述のように斜版主塔結合部は、終局荷重状態には高引張力下で曲げ・せん断を受ける極めて厳しい応力状態にある部位である。この部位に着目した実験を行うにあたって次のようなモデル化を行った。図-4に示すように斜版(変断面)と主塔とは、直交せず約78度の角度を有しているために、これを忠実に再現すると試験装置が非常に複雑となる。本実験では、同図のように斜版(等断面)と主塔とを直交させた単柱モデルを用いることとし、その縮小率を実橋の約1/3とした。図-5に供試体の形状寸法、補強鋼材の配置・量、およびプレストレス分布を示す。なお、水平荷重の荷重位置は、実橋での着目断面位置(図-4のA-A断面)の曲げモーメントとせん断力との比率が等しくなるように決定した。

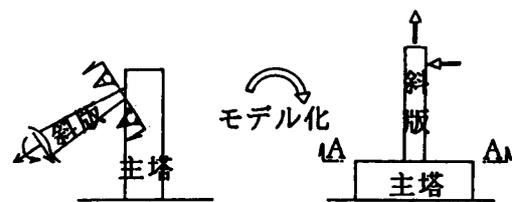
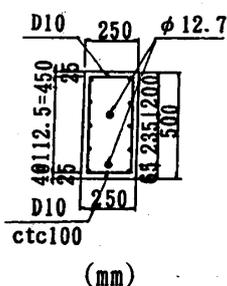
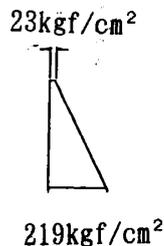


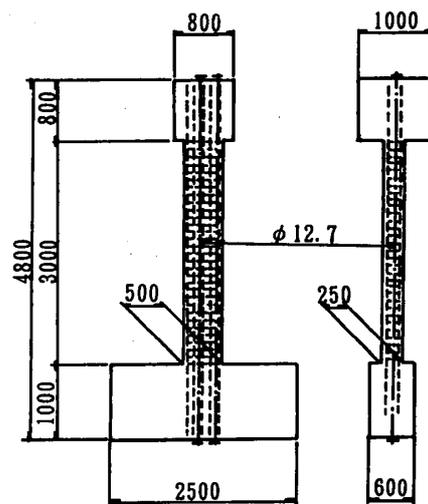
図-4 供試体のモデル化



(b)補強鋼材の配置



(c)プレストレス分布



(a)供試体形状図 (mm)

図-5 実験供試体

表-2に使用材料の強度試験結果を示す。供試体へのプレストレスの導入は材令10日で、ま

た材令47日で実験を行った。

表-2 材料試験結果

コンクリート ($f_{ck}=400\text{kgf/cm}^2$)				P C 鋼 (SWPR7B)			
圧縮強度 kgf/cm^2	引張強度 kgf/cm^2	曲げ強度 kgf/cm^2	弾性係数 kgf/cm^2	引張強度 kgf/mm^2	降伏強度 kgf/mm^2	弾性係数 kgf/mm^2	伸び %
514	37	62	3.7×10^5	200	171.20	1.94×10^4	6.7

(2) 荷重方法および計測項目

荷重装置の概要を図-6に示す。同図のように水平荷重フレーム内に供試体を水平に設置し、供試体基部をP C 鋼棒($\phi 32\text{mm}$)で荷重フレームと固定した。荷重のうち、引張軸力は供試体頂部に配置したP C 鋼材を緊張することによって、また水平力は油圧ジャッキによって荷重した。なお、引張軸力の作用方向は、頂部の変形に伴って変化させ、部材軸と一致するようにした。

供試体基部に作用させる引張軸力(N)と曲げモーメント(M)の比(すなわち、荷重経路)は、図-2に示した $\beta(D+L)$ とし、 $N/M=8\text{tf}/\text{tf}\cdot\text{m}$ とした。荷重順序は、まず軸力増分を、つづいて水平力増分を荷重した。これを1サイクルとして、 $N=0\sim 140\text{tf}$ までは、 20tf ピッチで、さらに最終荷重までは、 10tf ピッチで軸力を増加させた。

計測は、着目断面である基部近傍を中心にして基部から2mの高さまでを測定範囲とした。また、コンクリート表面ひずみ、軸方向鉄筋およびスターラップのひずみ、ならびに水平および垂直変位について行った(図-7参照)。さらに、荷重に関してはロードセルによって検出した。

4.2 実験結果および考察

ひびわれ発生は、引張軸力120tf、水平力5.3tfのときに基部およびその上方70cmの位置で目視によって観察された。その後、荷重の増加に伴って順次増加し、最終的には図-8に示すようなひびわれ状況を呈した。引張軸力218tf、水平力10.3tfで、基部におけるコンクリートの圧縮ひずみが 3000μ に達したことより、基部で曲げ破壊が生じたものとみなした。

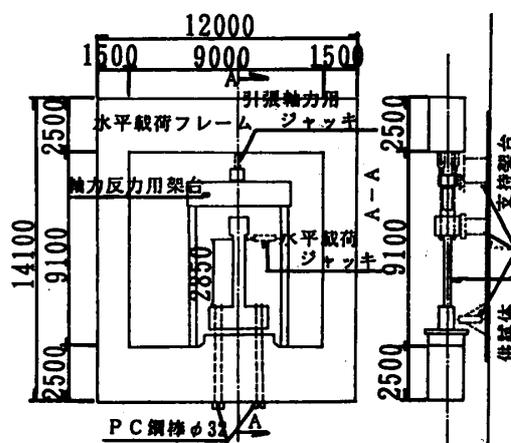
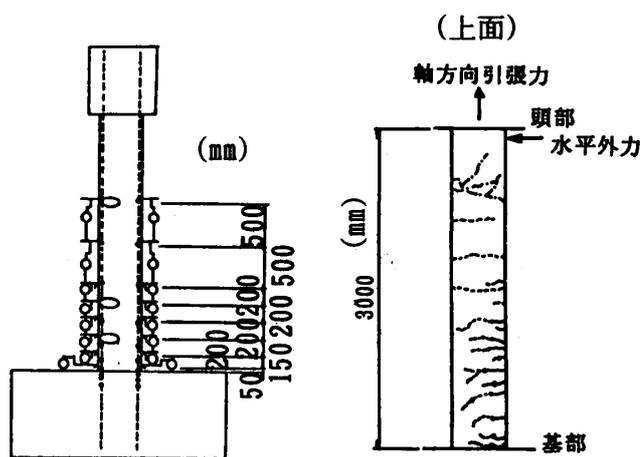


図-6 荷重装置概要 (mm)



○	水平変位測定用変位計
○	曲率測定用変位計
▲	コンクリートゲージ
●	鉄筋ひずみ

—	$N \leq 150\text{tf}$
----	$150 < N \leq 180$
----	$180 < N < 220$

図-7 測定位置

図-8 ひびわれ状況図

図-9に示す応力-ひずみ関係を用いて求めた基部における終局時のN-M相関図を図-10

に示す。なお、図-9のコンクリートに関して、 $\sigma=1/3f'$ の割線勾配が実測ヤング係数と一致するように $\sigma=f'$ のひずみを $\epsilon'=2500\mu$ とした。

図-10に引張軸力の作用方向の変化を考慮した荷重経路、および最終荷重も併せて示している。この図より、解析値と実験値とはよく一致した結果がえられており、とくに高引張軸力下での曲げ耐力の算定は、従来より用いられている方法[2]で問題がないと考えられる

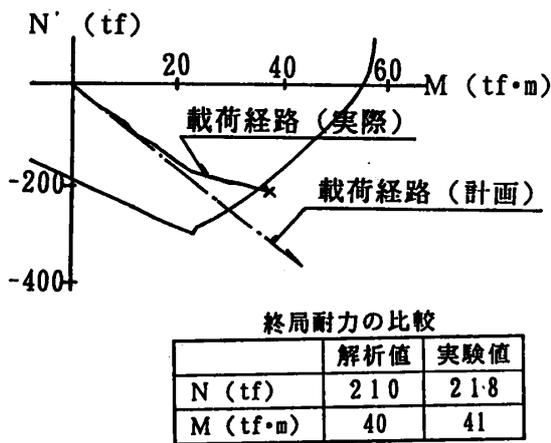


図-10 N-M相関曲線図

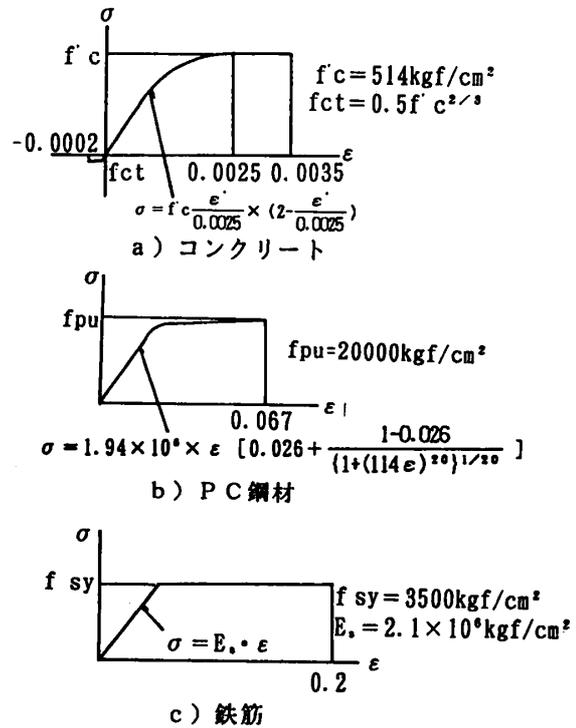


図-9 使用材料の応力-ひずみ関係

図-11は代表的な荷重状態における部材軸方向の曲率分布について実験値と解析値を比較したものである。基部を除き比較的良好一致していると言え、基部における相違は鋼材の抜け出しの影響によるものと考えられる。鉄筋の抜け出しの影響については、研究成果が多数発表されているが[3]、PC鋼材に関する研究は少なく、今後の研究が望まれるところである。

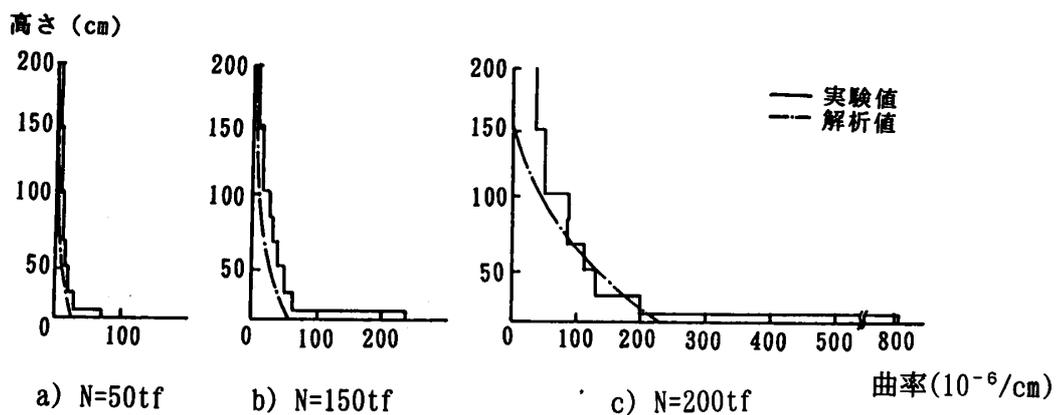


図-11 部材軸方向の曲率分布

終局荷重に近い $N=200\text{tf}$ の荷重ステップでの水平変位について、図-9に示す応力-ひずみ関係を用いて求めた曲げモーメント-曲率関係に基づいて、さらに荷重および鋼材の抜け出しによる変形の影響(いわゆる2次モーメント)を考慮して行った解析値と実験値との比較を図-12

に示しているが、両者は比較的良好一致している。図-13は、鋼材の抜け出しの影響の大きい基部近傍を除いた基部から0.05~2mの範囲について軸力-伸びひずみの関係を示したものである。ひびわれ発生までは、ほぼ初期剛性と一致し、その後ひびわれによる剛性低下がみられ、ほぼ終局時に近い $N=200\text{tf}$ では、ほぼ19%に低下している。解析値では、 $N=200\text{tf}$ で約4%となっているが、これはひびわれ間のコンクリートが寄与する剛性、いわゆる引張剛性を考慮していないことによる。このことより、ほぼ終局時にコンクリートの引張剛性は、初期剛性の15%程度存在していたと考えられる。

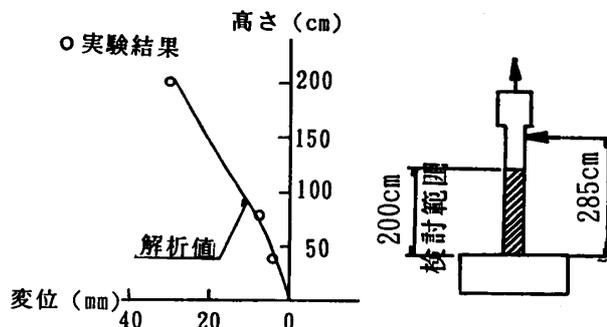


図-12 水平変位の比較

4. 結論

本検討で得られた結果は以下のとおりである。

(1) 斜版橋全体の簡易耐荷力解析結果、PC斜版の主塔結合部の安全度が最も小さくクリティカルとなった。また、この斜版部材は軸剛性の低下が主桁断面力に大きく影響を及ぼす事がわかった。

(2) PC斜版の終局曲げ耐力については、既存の設計理論により求めた計算値と実験結果とはよい一致を示しており、高引張軸力下での曲げ耐力の算定に適用しうると考えられる。

(3) PC斜版に着目した実験の結果、終局時の曲げ変形には、鋼材の抜け出しの影響が顕著に見られ、部材の剛性を評価する上で重要な要因であり、とくに今後PC鋼材の抜け出しに関する検討を行う必要がある。次に、終局時の軸剛性は、初期剛性に比してかなり低下することが、またコンクリートの引張剛性の影響もかなり大きいことが明らかとなった。今後、これらの定量的評価を行い、実橋における詳細な耐荷力解析を行うための基礎資料とする予定である。

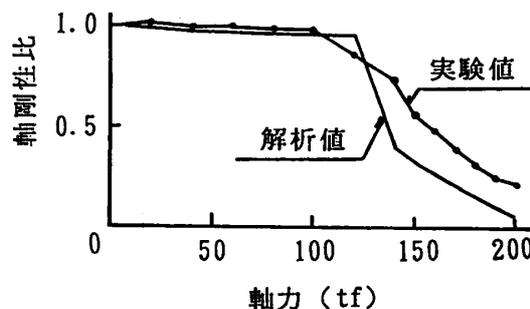


図-13 軸剛性比の比較

最後に、本実験を計画・実施するにあたり、御指導頂いた藤井学京都大学教授、小林和夫大阪工業大学教授、ならびに御審議頂いた阪神高速道路公団技術審議会（コンクリート構造分科会）の委員各位に感謝致します。なお、ここで述べた実験は、斜版主塔結合部に関する実験の一部であり、別途詳細な報告を行いたいと考えています。

参考文献

- [1] 上田芳夫、幸左賢二、郡政人：PC斜版付箱桁橋の設計方法に関する研究、コンクリート工学Vol. 14, No2, 1992
- [2] たとえば、道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート編、pp. 116~126、(社)日本道路協会、平成2年2月
- [3] たとえば 島・周・岡村：異形鉄筋の鉄筋降伏後における付着特性、土木学会論文集N0378/V-6、pp. 213~220、1987. 2