

論文 外ケーブル方式二径間連続はりの曲げ終局耐力に関する研究

梅津健司*¹・藤田学*²・玉置一清*³・山崎淳*⁴

要旨：外ケーブル方式二径間連続はりについて、静的曲げ破壊実験を行い、モーメントの再分配、破壊モード等を確認した。その結果、はり全長に関する外ケーブル位置のコンクリートひずみ分布を、局所的に突出させず均等に近づけるような、荷重の載荷、外ケーブルの配置であれば、曲げ破壊に至るまでの外ケーブルの張力増加が大きいことを検証した。また、材料非線形および幾何学的非線形を考慮した解析プログラムによるシミュレーションを行い、解析値が実験値に精度よく整合していることを検証した。

キーワード：外ケーブル、連続はり、モーメント再分配、非線形解析

1. はじめに

外ケーブル構造はりの実験・解析等の研究実績は、単純はりについては多いが連続はりについては極めて少なく、連続はりの曲げ破壊時に至る挙動は未だ解明されていない点が多い。また、曲げ破壊時における外ケーブルの引張応力度増加量を定量把握したデータが少ないため、現行の外ケーブル構造の設計手法では、曲げ耐力算定において引張応力度の増加を考慮しない方法が一般化されている。本研究は、外ケーブル方式二径間連続はりについて、破壊モードやモーメント再分配、曲げ破壊時の外ケーブルの張力増加等について、定性的、定量的に把握するものである。

2. 実験はりの概要

2. 1 形状と載荷方法

構造寸法、外ケーブル配置形状を図-1に示す。外ケーブルの導引引張応力度は、P C桁での一般的な有効引張応力度を想定し、引張強度のほぼ50%である92kgf/mm²とした。外ケーブルの偏心は、中間支点では図心からはり上縁までの距離の3/4である225mm、支間Mmax断面では145mmに設定し、2.2に述べる設計荷重時の引張縁応力度が両断面で同程度になるようにした。(表-3参照)なお、コンコダント配置としている。鋼製デビエータ(SS400)における外ケーブルの曲げ半径は、1.0mとし、研磨仕上げした接触面と外ケーブルの間には、テフロン(厚さ 0.6mm)を挿入した。外ケーブル緊張時の張力分布より算定した角変化1ラジアン当りの摩擦係数 μ は、0.07であった。

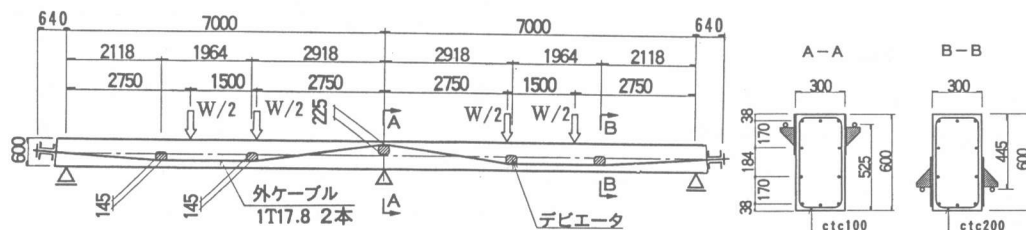


図-1 実験はりの構造寸法、外ケーブル配置形状

- * 1 住友建設(株) 技術研究所 (正会員)
- * 2 住友建設(株) 技術研究所 主任研究員、工修 (正会員)
- * 3 住友建設(株) 土木設計部、工修 (正会員)
- * 4 日本大学教授 理工学部土木工学科、工博 (正会員)

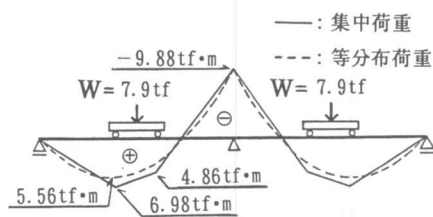


図-2 集中荷重と等分布荷重による
曲げモーメント

集中荷重の載荷位置は、
図-2に示すように集中
荷重による曲げモーメント
分布が、はり全長にわた
る等分布荷重による曲
げモーメント分布とほぼ
相似形となるように設定
した。

図-3に計測項目、表-1に材料特性を示す。

2. 2 実橋に例えたときの設計荷重、終局荷重

設計荷重時とは、中間支点上縁の合成曲げ応力度を0kgf/cm²とする荷重状態と想定し、そのときの集中荷重強度は、表-3より7.9tf/支間である。終局荷重時とは、設計荷重時の曲げモーメントの1.7倍を得る荷重状態と想定し、そのときの集中荷重強度は、15.0tf/支間である。

表-2 弾性解による曲げモーメント(tf·m)

	中間支点 断面	支間Mmax 断面
①自重	-2.75	1.55
②集中荷重(7.9tf/支間)	-9.88	6.98
③設計荷重時 (=①+②)	-12.63	8.53
④終局荷重時 (=③×1.7)	-21.47	14.50

表-3 はり主要断面の曲げ応力度(kgf/cm²)

	中間支点断面		支間Mmax断面	
	上縁	下縁	上縁	下縁
①自重	-15.3	15.3	8.6	-8.6
②プレストレス	70.4	-27.9	-9.0	51.4
③(自重+プレストレス)時 (=①+②)	55.1	-12.6	-0.4	42.8
④集中荷重(7.9tf/支間)	-54.9	54.9	38.8	-38.8
⑤設計荷重時 (=③+④)	0.2	42.3	38.4	4.0

はりの断面定数:Z=18000.0cm³

3. 非線形解析の手法

本手法は、はりや外ケーブル等により構成された構造物の解析に適用でき、次の特徴を有する。

- ①荷重増分に伴い座標を更新することにより、付加曲げモーメントや、外ケーブル偏心量がはりのたわみに従い変化するというような幾何学的非線形性を考慮する。
- ②P Cはりの、コンクリート・鉄筋・P C鋼材が混在した断面構成をファイバーモデル化し、ファイバー毎に材料非線形性を考慮する。
- ③更新された荷重ベクトルに対して力のつり合いが満足される(残差ベクトル=0となる)まで収束計算を行うことにより、剛性の非線形性と不静定構造物特有の応力の再分配を評価する。

図-4に解析フロー、図-5に荷重ベクトル-変位ベクトル、図-6に解析モデルを示す。

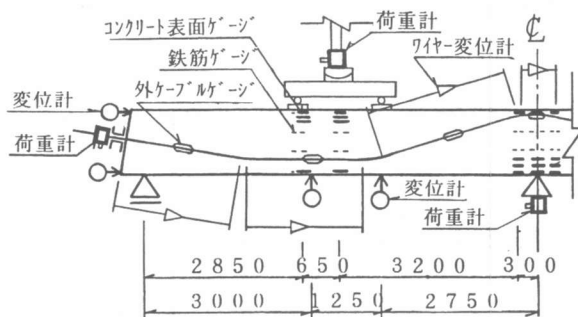


図-3 計測項目

表-1 材料特性一覧 (kgf/cm²)

コンクリート	圧縮強度	引張強度	曲げ強度	弾性係数
	424	37.7	57.9	2.58E+05
外ケーブル (P C鋼より線)	導入引張応力度	降伏点	引張強度	弾性係数
1T17.8 SWPR19 2.084cm ² /本	9160	16000	19000	1.98E+06*
鉄筋 SD295A	軸方向筋 D10	3640*	5100*	2.1E+06
	スターラップ D13	3750*	5300*	2.1E+06

*)試験成績書より

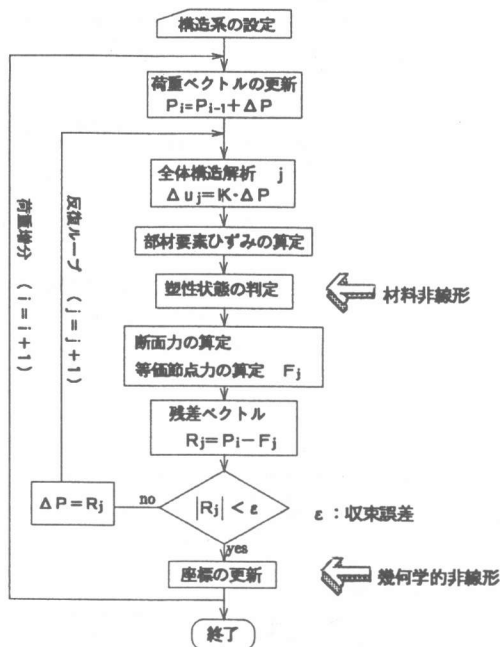


図-4 解析フロー

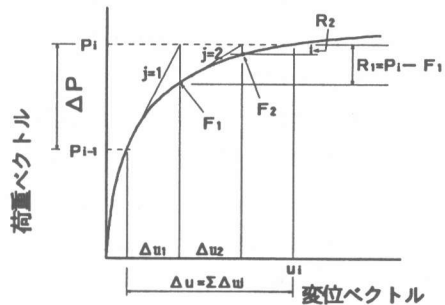


図-5 荷重ベクトル-変位ベクトル

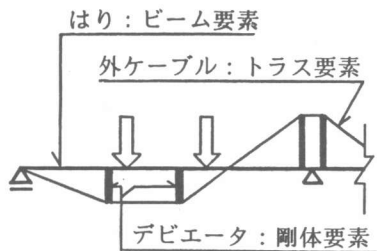


図-6 解析モデル

4. 実験結果と考察

4. 1 たわみおよびコンクリートひずみ

図-7・8に荷重に伴う支間たわみ、コンクリート圧縮縁ひずみの実験値と非線形解析値を示す。解析値は実験値に精度よく整合している。図-8で両者にやや差が見られるが、解析でコンクリート材料の引張強度を0としているためと思われる。

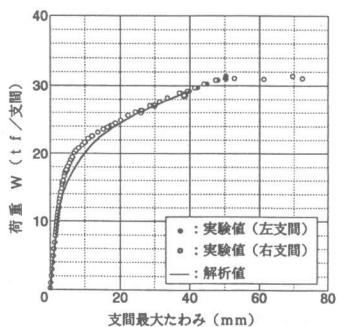


図-7 荷重-支間最大たわみ図

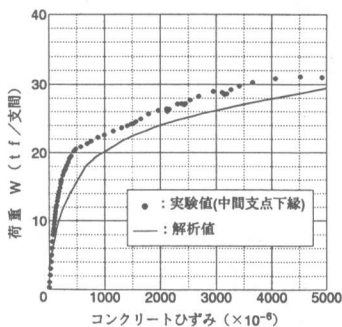


図-8 荷重-コンクリート圧縮縁ひずみ図

4. 2 外ケーブルの張力増加

荷重と定着端での外ケーブル張力増加の関係を図-9に示す。載荷初期のひび割れ発生前までは、荷重の増加に伴うケーブル張力の増加は微少であった。これは曲げによって生じる引張力をコンクリートが殆ど負担していたからである。ひび割れ発生後、2段目の鉄筋が降伏点に達する

22tf 載荷時までは、引張力を主に鉄筋で負担するので、ケーブルの張力増加程度は緩やかであった。それ以後は引張力増加を主にケーブルで負担するようになるので、張力増加が顕著となった。右支間圧壊時である 30.8tf(支間)載荷時の引張応力度増加量は 37kgf/mm² であった。これは、外ケーブルの導入引張応力度から降伏点に至るまでの量(68kgf/mm²)の 54% に相当する。

4. 3 変形の適合条件

変形の適合条件 [1] 「載荷による外ケーブルの伸び δ は、部材全長に関する外ケーブル位置でのコンクリートひずみ増加 εc の総和に等しい」は、式 (1) で表せられる。

$$\delta = \sum \varepsilon_{pi} \cdot \Delta L_i = \int_L \varepsilon c(\ell) d\ell \tag{1}$$

ここに、 ε_{pi} : 載荷による外ケーブルのひずみ
 ΔL_i : 外ケーブル区間長
 L : 外ケーブル全長 ($= \sum \Delta L_i$)

図-11 に外ケーブルひずみと、ワイヤー変位計によって測定したデビエータ間ひずみ分布を示す。デビエータ間ひずみは、その区間の外ケーブル位置でのコンクリートひずみの平均と見なせる。外ケーブル位置のコンクリートひずみ増加の総和に相当する、部材長方向の軸線と — で囲まれた面積(28.9mm)と、外ケーブルの伸びに相当する ---- で囲まれた面積(27.5mm)は、表-4 で導いたように、ほぼ等しいので、単純桁同様 [2]、変形の適合条件式 (1) を満足している。

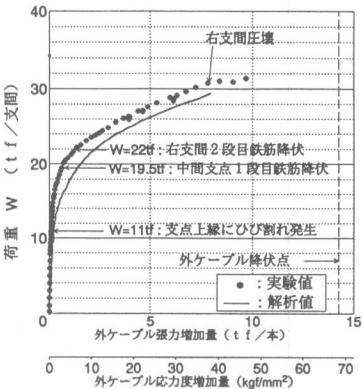


図-9 荷重-外ケーブル張力増加図

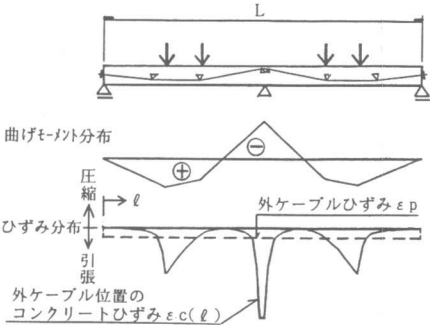


図-10 載荷によるひずみ増加分布

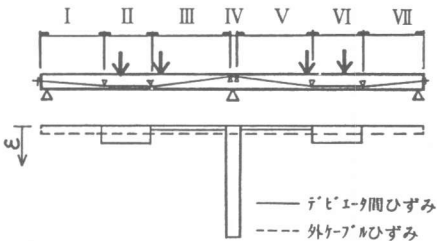


図-11 デビエータ間ひずみ分布と外ケーブルひずみ分布

表-4 コンクリートひずみの総和と外ケーブル伸び (30tf/支間 載荷時)

デビエータ区間名	I	II	III	IV	V	VI	VII	計
区間長 ΔL_i (mm)	2765	1964	2877	130	2877	1964	2765	15342
デビエータ間伸び実験値 δ (mm)	0.14	9.02	2.83	5.20	2.78	8.81	0.12	28.9
コンクリートひずみ $\varepsilon c (= \delta d / \Delta L_i)$	0.000051	0.00459	0.000984	0.040	0.000966	0.00449	0.000043	—
外ケーブルひずみ εp 実験値	0.001723	0.001778	0.001744	0.0013	0.001830	0.001981	0.001784	—
伸び δ (mm) ($= \Delta L_i \cdot \varepsilon p$)	4.76	3.49	5.02	0.17	5.26	3.89	4.93	27.5

図-10において、載荷漸増に従いコンクリートひずみ εc が増加し、いずれかの断面の圧縮縦ひずみが限界ひずみに達したとき、曲げ圧縮破壊すると考えられる。これより、 εc の分布が局部的に突出せずはり全長に均等であれば、曲げ圧縮破壊時の荷重が大きくなり、変形の適合条件よりコンクリートひずみ増加の総和と外ケーブル伸びが大きくなる。本試験はりの以下の特徴、

- ①等分布荷重的に載荷したので、集中荷重を支間に一ヶ所だけ載荷した場合より、はり全体の曲げモーメント分布及び εc 分布がなだらかであったこと
- ②外ケーブルの配置形状を発生する曲げモーメント分布と相似形にしたので、外ケーブルがはり全長に関して、部材引張域に効率的に配置されていたこと
- ③左右径間で対称荷重を載荷したので、外ケーブルは中間支点断面において、滑らず、固定したのと等しかったこと

は、この性質に適応していたので、張力増加量が大きく生じたのだと考えられる。

4. 4 はりのたわみ、端支点水平移動と外ケーブル張力増加の関係

図-12に支間たわみ・端支点水平移動と外ケーブル張力増加の関係を示す。最引張縁の鉄筋が降伏点に達した時点より、たわみ又は端支点水平移動の増加に伴い張力がほぼ直線的に増加した。

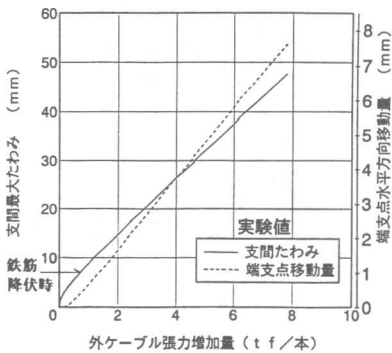


図-12 支間たわみ・端支点水平移動と外ケーブル張力増加の関係

表-5 支間たわみ・端支点水平移動の外ケーブル張力増加に対する寄与率

外ケーブル張力増加量 ΔP (tf/本)	支間最大たわみ			端支点図心位置水平移動		
	たわみ y(mm)	たわみによる張力増加 $\Delta P - \Delta PI$ (tf)	寄与率 Y(%) (=1-X)	移動量 x(mm)	移動量による張力増加 ΔPI (tf)	寄与率 X(%) (= $\frac{\Delta PI}{\Delta P}$)
1.0	8.6	0.68	68	0.6	0.32	32
2.0	14.7	1.14	57	1.6	0.86	43
4.0	26.4	2.0	50	3.7	2.0	50
6.0	37.4	2.9	48	5.7	3.1	52
7.8	47.7	3.8	49	7.5	4.0	51

計算式： $\Delta PI = (x/L) \cdot EP \cdot AP$

x：左端支点図心の水平移動の平均値

L：外ケーブル配置区間の中間支点から定着端までの水平距離(=7650mm)

EP：外ケーブルの弾性係数 (=1.98E+07tf/m²)

AP：外ケーブルの断面積 (=0.0002084m²/本)

表-5よりXとYは約50%ずつであるので、本試験はりでは、支間たわみと端支点水平移動は外ケーブルの張力増加に対して半分ずつ寄与していた。

4. 5 破壊形態

曲げ破壊直前におけるひびわれ幅は中間支点上で 5.6mmであった。最終的な破壊形態は、30.8 tf/(支間)載荷時の右支間上縁での曲げ圧縮破壊であった。これは支間より中間支点のコンクリート圧縮縁ひずみが卓越し、支点上が先に3500 μ に達するという非線形解析結果と異なるものであったが、棒解析では表せられない、はり内の鉛直方向応力の影響が考えられる。圧壊時における載荷点1ヶ所当りの集中荷重が15.4tfであるのに対し、中間支点反力が40.3tfとかなり大きいことから推察されることであるが、F.E.M.解析によれば、はり内の鉛直方向圧縮応力度は支間載荷点より中間支点付近の方が卓越する結果が得られている。また、スターラップD13のピッチは支間圧壊部は20cmであるのに対し、中間支点付近は10cmであるので、はり内の面外方向の拘束

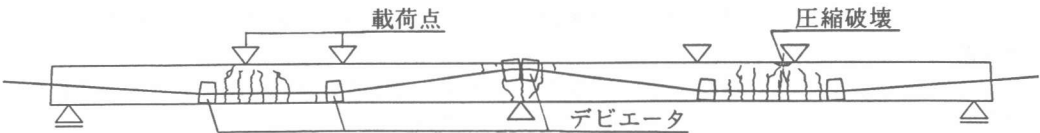


図-13 最終ひび割れ状況

度も支点の方が勝っている。これらの要因により、中間支点上は支間よりも、鉛直方向・面外方向において拘束度が高くなっており、破壊に伴う膨張が抑制され、圧壊が起こりにくい状態になっていたと推察される。そのため、拘束度の小さい支間中央付近で圧壊したものと思われる。

4. 6 曲げ耐力

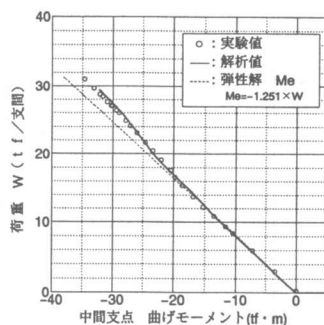
表－6 に曲げ耐力の実験値・計算値を示す。外ケーブルの張力増加が大きかったため、必然、曲げ耐力も増大した。曲げ耐力実験値の、P C 鋼材とコンクリートの付着がある場合の曲げ耐力計算値に対する比率は、中間支点断面で86%、支間Mmax断面で81%である。これは、現行の設計法のひとつである70%掛けの耐力設計値より安全側である。

表－6 曲げ耐力実験値・計算値一覧 (tf・m)

		中間支点	支間Mmax	備 考
曲 げ 耐 力	実験値	-37.5	30.2	30.8tf载荷時
	非線形解析	-34.9	29.4	29.4tf载荷時
	ポント鋼材の場合	-43.3	37.3	—
	(ポント鋼材の場合)×0.7	-30.3	26.1	—
	張力増加=0とした場合	-26.2	23.2	—
終局荷重時作用力(設計値)		-21.5	14.5	表－2より
ポント鋼材の場合、 曲げ破壊時PC鋼材ひずみ計算値 (塑性域)		0.021	0.018	降伏ひずみ： 0.008
曲げ破壊時外ケーブルひずみ実験値		0.0065	0.0065	弾性域

4. 7 モーメント再分配

荷重に伴う中間支点断面の曲げモーメントの推移を図－14に示す。支点及び支間にひび割れが発生した11～15tf载荷時にモーメント再分配の始まりが見られる。曲げ圧縮破壊時には中間支点断面において、弾性解の曲げモーメントに対する発生曲げモーメントの比率は、90%であるので、-10%のモーメント再分配が見られる。非線形解析値は、実験値とよく合致している。



図－14 荷重－中間支点断面曲げモーメント

5. まとめ

以下に本研究で得られた結果をまとめる。

- (1) 外ケーブルひずみとコンクリートひずみの変形の適合条件を連続はりでも確認した。
- (2) はり全長に関する外ケーブル位置のコンクリートひずみ分布を、局所的に突出させず均等に近づけるような、荷重の载荷、外ケーブルの配置であれば、曲げ破壊に至るまでの外ケーブルの張力増加は大きい。
- (3) 支承形式が直接支持である連続はりに対し等分布荷重的に载荷した場合、中間支点下縁は拘束効果により圧縮強度が増大する現象が見られた。
- (4) 本手法による非線形解析値は、実験結果に対し良い精度でシミュレートできていた。
- (5) 本研究では、等分布的かつ左右径間対称载荷という基本的なケースを扱ったが、現実の荷重状態に対応した外ケーブルの張力増加があまり望めないケース、例えば支間に一ヶ所のみ集中荷重を载荷するケースや片径間のみ载荷するケースについて今後解析する必要がある。

参考文献

- 1) 六車熙・渡辺史夫・西山峰広：アンボンドP C 部材の曲げ終局耐力に関する研究、プレストレストコンクリート、Vol. 26、NO. 1、pp. 10-16、1984. 1
- 2) 藤田学・沼田昌一郎・一樹久允・高野晴夫：荷重状態が外ケーブル構造の曲げ終局耐力におよぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16、No. 2、pp. 1027-1032、1994. 6