

論文 内外ケーブル比率の変化に伴う外ケーブル方式プレキャストセグメント PC 梁の曲げ性状

新井崇裕*¹・日紫喜剛啓*²・夏目忠彦*³

要旨：内外ケーブル比率の変化に伴い、外ケーブル方式プレキャストセグメント PC 梁（以下、PEPC 梁と略す）の曲げ性状がどのように変化するかについて検討するために、小型模型供試体を用いて載荷実験を行った。実験より内外ケーブル比率によって曲げ性状が異なること、また、内ケーブル比率を大きくすることで、ひび割れ分散がよくなること、破壊断面におけるひずみ分布が改善でき、最大荷重、終局変位、外ケーブルひずみの増加量が大きくなることが明らかになった。また、複合非線形フレーム解析で PEPC 梁の力学的挙動及び最大荷重を精度よくシミュレートできることを検証した。

キーワード：内外ケーブル比率、外ケーブル、プレキャストセグメント、曲げ性状、複合非線形解析

1. はじめに

近年、プレキャストセグメント工法による橋梁が数橋建設されているが、そのほとんどにおいて内外ケーブルを併用した構造形式が採用されている。しかしながら、内外ケーブルを併用した場合の PEPC 梁の曲げ性状について、過去に研究された例は少なく、特に、内外ケーブル比率の変化に伴ってこの種の構造部材がどのような挙動を示すかについては十分明らかにされていないのが現状である。そのため、現在、この構造の設計における内外ケーブル比率の設定は明確な根拠に基づいておらず、その設計は必ずしも合理的なものとなっていない。そこで、内外ケーブル比率の変化に伴って PEPC 梁の曲げ性状がどのように変化するかについて検討することを目的に、内外ケーブル比率を実験因子とした小型模型供試体による載荷実験を行った。供試体は実構造物の約 1/8 縮尺のものをを用いたが、供試体の設計の際には、ケーブル比（コンクリート断面積に対する）及び導入応力度を実構造物と同程度にすることで、実構造物と同様な力学的挙動を示すように配慮した。

また、PEPC 梁の力学的挙動を解析でシミュレートが可能であるかについて検討した。

2. 実験概要

2. 1 縮尺模型実験の基本的な考え方

本研究では、縮尺模型で実構造物の挙動を再現することを念頭に置いたため、ケーブル比及び導入応力度を実構造物と同程度にした。また、自重による影響を再現するために、自重分は載荷することにした。載荷は油圧ジャッキによる静的 2 点単調載荷で、自重分の等分布荷重を載荷できるよう載荷位置を約 3 等分点にした（図-1）。また、自重分を載荷したときのケーブル応力度が実構造物と同程度の $0.55P_u$ （ P_u ：ケーブルの引張強さ）になるように配慮した。

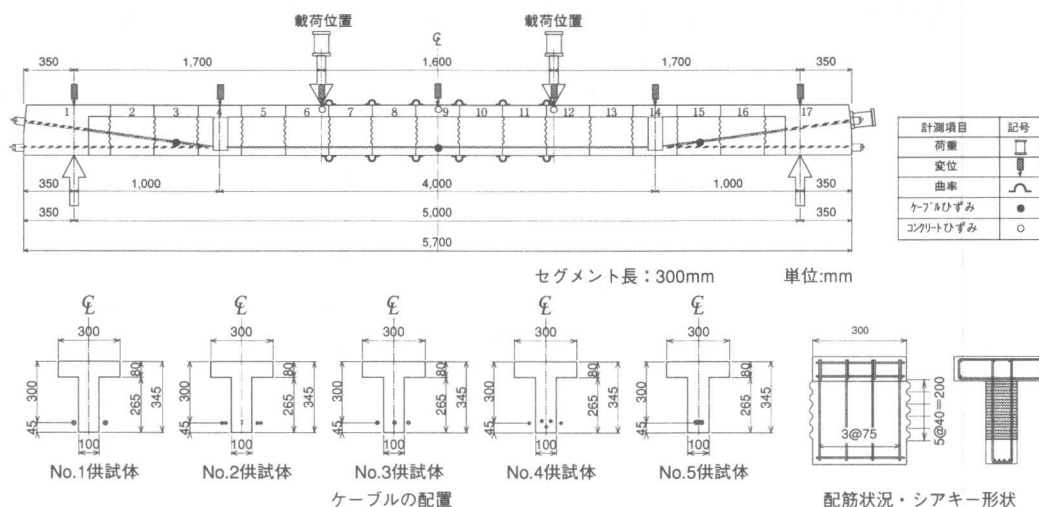
2. 2 供試体諸元と実験因子

図-1 に供試体諸元、計測項目、計測位置及び載荷位置を、表-1 に実験因子を、表-2 にケー

* 1 鹿島建設（株）技術研究所第一研究部第 1 研究室研究員（正会員）

* 2 鹿島建設（株）技術研究所第一研究部第 1 研究室室長、工修（正会員）

* 3 鹿島建設（株）技術研究所第一研究部第 1 研究室主管研究員



図－1 供試体諸元・計測項目・計測位置・載荷位置

ブル及び補強筋の機械的性質を示す。

実験因子は内外ケーブル比率（断面積比）のみとし、その他の要因は全て一定となるようにした。全ての供試体で、プレキャストセグメント（以下、セグメント）はロングライン＝マッチキャスト方式で製作し、一つのセグメント長は 300 mm

とした。セグメントには軸方向補強筋として引張鉄筋比及び圧縮鉄筋比とも 0.28%（D6×4本）の鉄筋を、横方向補強筋としてせん断補強筋比 0.85%（D6@75mm）の鉄筋を配置した。セグメントの組立の際には、接合面にエポキシ樹脂（圧縮強度：70.8N/mm²、引張強度：22.1N/mm²）を塗布した後、圧着接合（圧縮応力度：0.28N/mm²）した。導入プレストレス量は 0.55Pu（261.8kN）とし、デビエータ部にはコンクリート梁部材（以下、桁）と外ケーブルとの摩擦を低減するためにテフロンシートを配置した。内ケーブルには、プレストレス導入後セメントペーストによるグラウトを行った。

表－1 実験因子

供試体 No.	内外ケーブルの比率		ケーブル断面積 (mm ²)		使用 P C 鋼より線		コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)		グラウト圧縮強度 (N/mm ²)
	内	外	内	外	内	外	奇数セグメント	偶数セグメント	
1	0%	100%	—	277.40	—	SWPR7A 15.2×2	49.7	45.6	—
2	12%	88%	33.03	242.58	SWPR2×1 SWPD3×1	SWPR7A 9.3×2 10.8×2	52.1	47.6	25.6
3	33%	67%	92.90	185.80	SWPR7A 12.4×1	SWPR7A 12.4×2	50.3	47.6	20.1
4	63%	37%	172.90	103.22	SWPR7A 9.3×2 10.8×1	SWPR7A 9.3×2	52.2	48.9	22.8
5	100%	0%	277.40	—	SWPR7A 15.2×2	—	51.1	46.9	22.8

* コンクリート及びグラウトの圧縮強度は実験時における強度を示す。

表－2 鋼材の機械的性質

鋼材の種類	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
SWPR2	1906.2	2012.1	1.87×10 ⁵
SWPD3	1917.3	2023.2	1.88×10 ⁵
SWPR7A 9.3	1714.8	1838.8	2.01×10 ⁵
SWPR7A 10.8	1716.4	1851.3	1.93×10 ⁵
SWPR7A 12.4	1668.5	1747.0	1.94×10 ⁵
SWPR7A 15.2	1600.6	1708.7	1.92×10 ⁵
SD295 D6	320.8	478.5	2.10×10 ⁵

3. 実験結果

3. 1 ひび割れ性状

図－2 に実験終了時のひび割れ状況及び破壊断面（図中に圧壊位置と記述）を示す。全般的に

ひび割れは荷重スパン内のセグメント接合部に集中しており、内ケーブル比率が大きくなるに従って、ひび割れの分散がよくなる傾向が見られた。

3. 2 曲げ性状

図-3に荷重とスパン中央鉛直変位(以下、変位)の関係を、図-4に荷重と外ケーブルひずみ増加量の関係を、また、表-3に実験結果及び4章で述べる解析結果との比較を示す。

曲げ性状は、No.1(内0%)では、ひび割れ発生後外ケーブルが降伏する前に桁上縁が圧縮破壊(以下、圧壊)して耐力を失った。No.2(内12%)では、ひび割れ発生後内ケーブルが降伏し、外ケーブルが降伏する前に圧壊と内ケーブルの破断がほぼ同時に起こり耐力を失った。No.3(内33%)及びNo.4(内63%)では、ひび割れが発生し、内ケーブルが降伏した後に圧壊した。しかし、圧壊後も急激な耐力の低下はなく、最終的には外ケーブルが降伏した後に内ケーブルが破断して耐力を失った。No.5(内100%)では、ひび割れが発生し、内ケーブルが降伏した後に圧壊したが、その後も耐力を維持し続けた。No.5では実験の安全上、内ケーブルの破断まで荷重を行わなかった。上述の各破壊段階は図中に記号で示した。

曲げ性状及び図-3、4より、以下に示すことが分かる。

- 1) 内ケーブル比率が大きくなるに従って、曲げ性状は脆性的なものからよりじん性のあるものへ、以下に示す3タイプで推移する (a)→(b)→(c) ことが明らかになった。

(a)外ケーブルが降伏せずに圧壊で終局に至るタイプ(内0%)

(b)内ケーブルが降伏した後、圧壊と内ケーブルの破断が同時に起こり、外ケーブルが降伏せずに終局に至るタイプ(内12%)

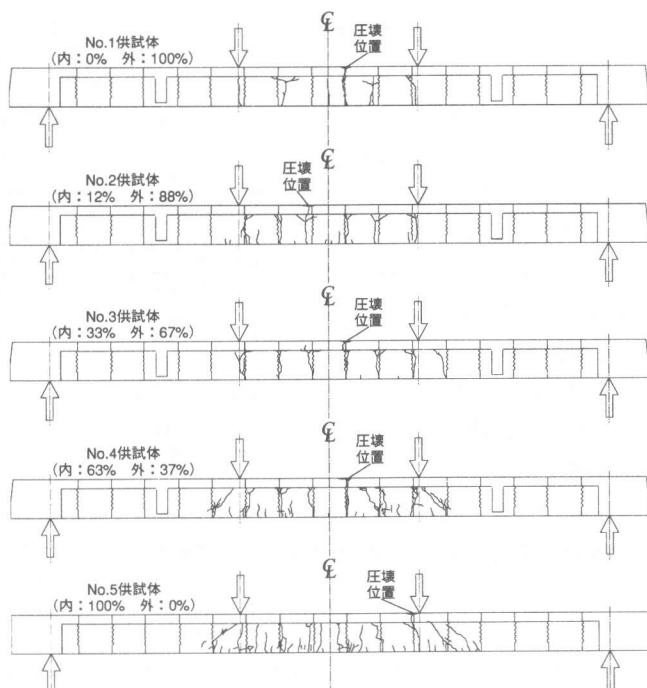


図-2 実験終了後のひび割れ状況

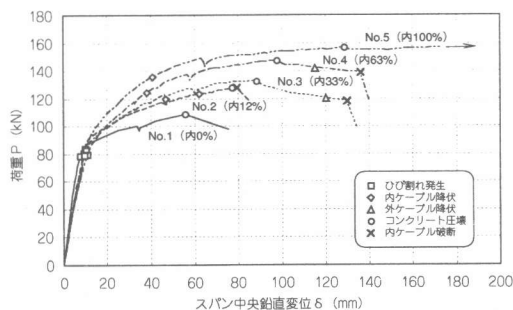


図-3 荷重とスパン中央鉛直変位の関係

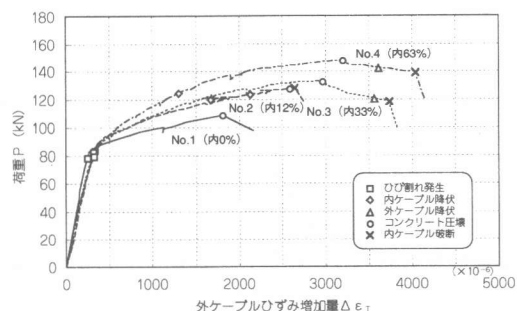


図-4 荷重と外ケーブルひずみ増加量の関係

(c)内ケーブルが降伏し圧壊しても耐力が急激には低下せず、外ケーブルが降伏した後に内ケーブルの破断で終局に至るタイプ（内33～63%）

2）最大荷重は、No.1（内0%）が最も低く内ケーブル比率の増加に従って大きくなった。

3）圧壊後の挙動が以下の2つのタイプに分かれた。

(a)圧壊後に急激に耐力が低下するタイプ

(b)圧壊後も急激には耐力が低下せず、ある程度変形が進行した後に破壊するタイプ

4）終局時変位は、最大荷重同様 No.1（内0%）が最も低く内ケーブル比率の増加に従って大きくなった。

5）外ケーブルひずみ増加量は内ケーブル比率の増加に従って大きくなった。また、内ケーブル比率の増加に従って、外ケーブルは、降伏まで至らず十分な張力増加が得られないものから降伏まで至り十分な張力増加を示すものへ推移した。

4. 解析の適合性

4. 1 解析概要

本章では、材料の力学的非線形性と部材の幾何学的非線形性を考慮できる複合非線形フレーム解析プログラム [1] を用いて P E P C 梁の力学的挙動のシミュレートが可能であるかについて検討した。材料の応力～ひずみモデルは一般的なケースを想定して道路橋示方書のモデル [2] を使用した。なお、①桁上縁の圧縮ひずみが0.0035になった場合（以下、圧壊）、あるいは、②ケーブルが破断した場合、のいずれかを解析上の終局と定義した。

4. 2 解析結果の検証

解析の結果、全ての供試体でケーブルの破断よりも圧壊が先行した。図-5に荷重と変位の関係を示す。図-5及び表-3より解析結果と実験結果を比較し、明らかになったことを以下に示す。

1）最大荷重は、内外ケーブル比率に関わらず、（実験／解析）比で0.92～1.09と精度よく解析できた。

表-3 実験・解析結果

供試体No.		ひび割れ発生荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	圧壊時スパン中央変位 (mm)	終局時スパン中央変位 (mm)	破壊性状
1	実験	78.2	108.2	55.84	55.84	コンクリート上縁：圧壊
	解析	79.7	100.3	42.86	42.86	内ケーブル：—
	実／解	0.98	1.08	1.30	1.30	外ケーブル：降伏せず
2	実験	83.6	127.9	79.22	79.22	コンクリート上縁：圧壊
	解析	84.0	117.1	56.04	56.04	内ケーブル：破断
	実／解	1.00	1.09	1.41	1.41	外ケーブル：降伏せず
3	実験	82.4	133.0	86.66	129.76	コンクリート上縁：圧壊
	解析	82.2	135.8	78.26	78.26	内ケーブル：破断
	実／解	1.00	0.98	1.11	1.66	外ケーブル：降伏
4	実験	79.4	149.5	97.88	135.88	コンクリート上縁：圧壊
	解析	80.7	153.5	87.99	87.99	内ケーブル：破断
	実／解	0.98	0.97	1.11	1.54	外ケーブル：降伏
5	実験	78.9	156.8	128.67	173.74	コンクリート上縁：圧壊
	解析	87.1	171.2	124.43	124.43	内ケーブル：降伏
	実／解	0.91	0.92	1.03	1.40	外ケーブル：—

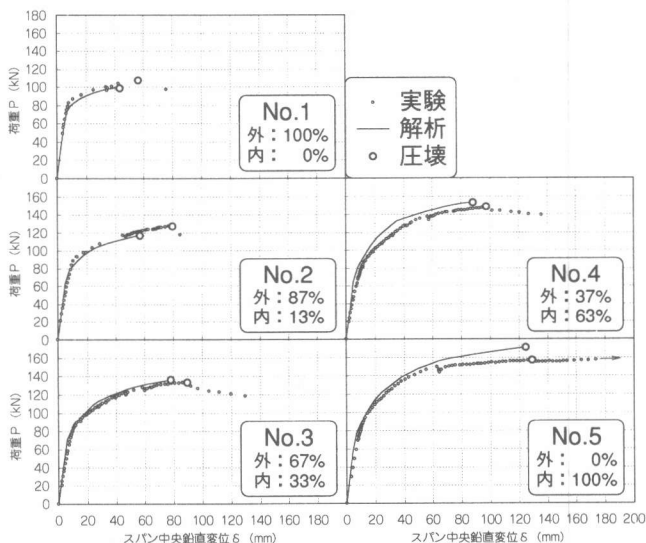


図-5 荷重と変位の関係の比較

- 2) 圧壊時の変位は、(実験/解析) 比で 1.03 ~ 1.41 と若干安全側ではあるがほぼ解析できた。
- 3) 今回の解析では、コンクリートの応力ひずみ関係として道路橋示方書の簡略的な応力～ひずみモデルを用いたが、ひび割れから圧壊までの荷重～変位関係は精度よくシミュレートされており、P E P C 梁の力学的挙動は十分に解析できているものと考えられる。

5. 考察

5. 1 内外ケーブル比率が最大荷重・変位に与える影響

内外ケーブル比率の変化に伴い、最大荷重及び変位が変化すること、また、今回用いた解析手法で精度よく P E P C 梁の力学的挙動をシミュレート出来ることが分かったが、これらの関係をより明確にするため、実験及び解析結果の内外ケーブル比率 - 最大荷重・変位の関係を図-6 に示す。これより、今回行った実験及び解析の範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) (最大荷重・実験結果) より、内ケーブル比率の増加に従って最大荷重は増加するが、特に、内ケーブル比率が小さい範囲での最大荷重の変化が大きいたことが見てとれる。

- 2) (最大荷重及び変位・実験結果)

より、内ケーブル比率が 13% ~ 63% の範囲では、最大荷重及び圧壊時変位は、ほぼ比例的に増加していることが分かる。

- 3) (変位・実験結果) より、内ケーブル比率 33% ~ 100% の範囲では、圧壊時と終局時の変位が

大きく異なることが分かる。これより、内ケーブル比率を 33% ~ 100% の範囲内にすれば圧壊後も急激には耐力が失われず、さらなる変形が可能なが分かる。

5. 2 内外併用ケーブルの最大荷重増加機構について

内ケーブル方式と外ケーブル方式のひび割れ発生から終局状態における過程での破壊断面におけるひずみ分布は、同一載荷荷重時では図-

7(a)(b)に示すような違いが知られている [3]。すなわち、外ケーブル方式では外ケーブルひずみに比べてコンクリートひずみが卓越する構造となり、十分なケーブルの張力増加が生じる前にコンクリート圧縮縁のひずみが終局に達するため、内ケーブル方式に比べて最大荷重が低下する。一方、内外併用ケーブル方式では、ひずみ分布は図-7 (c) に示すようになっていると仮定すれば、外ケーブル方式に比べて同一載荷荷重時にはコンクリート圧縮縁のひずみが小さくなって圧壊が遅れることになり、終局時の外ケーブルひずみの増加量が大きくなって最大荷重が増加する

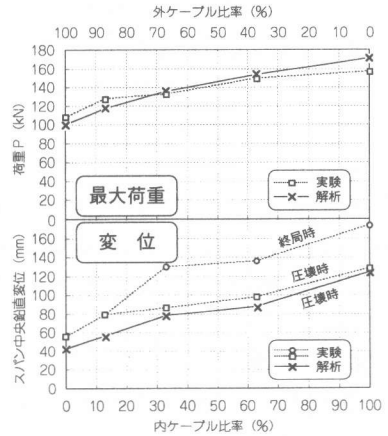


図-6 ケーブル比率の影響

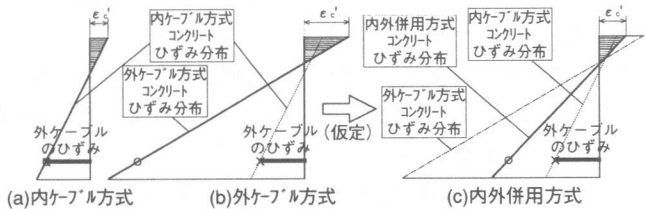


図-7 各ケーブル方式の破壊断面でのひずみ分布

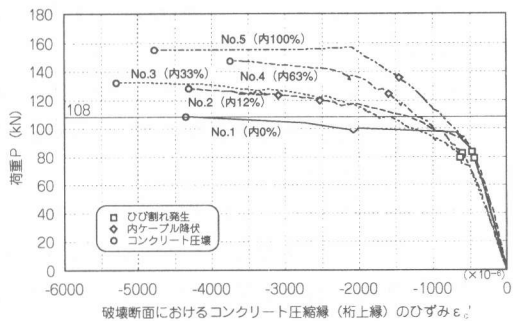


図-8 荷重とコンクリート圧縮縁ひずみの関係

という論理が成り立つ。そこで、仮定したひずみ分布を確認する目的で、同一載荷荷重時における各ケーブル方式の圧縮ひずみを調べることにした。図-8に荷重とコンクリート圧縮縁ひずみの関係を示すが、図中に示した同一載荷荷重時（108kN）における各ケーブル方式の圧縮縁ひずみを比較すれば、ひずみ分布は先に仮定したとおりになっているものと考えられる。従って、外ケーブル方式から、内外併用方式にすることでひずみ分布が改善（内ケーブル方式の分布に近づく）され、圧壊が遅れて外ケーブルの張力増加量が大きくなり、最大荷重が増加するという機構が説明できるものと考えられる。

5. 3 圧壊後の挙動の相違について

内ケーブル比率の大小により圧壊後の挙動に相違が見られたが、これは、内ケーブル比率が小さい範囲（内0～12%）では、圧壊時における中立軸が圧縮縁にかなり近い位置にあるため、圧壊後に圧縮側の抵抗力がすぐに失われて耐力低下を引き起こすのに対し、内ケーブル比率が大きい範囲（内33～100%）では、圧壊時における中立軸が圧縮縁から若干離れた位置にあるため、圧壊後も圧縮側の抵抗力がすぐには失われず、耐力をある程度維持できるものと考えられる。

6. まとめ

実構造物と同様な力学的挙動を示すように配慮したPEPC梁（外ケーブル方式プレキャストセグメントPC梁）の載荷実験を行った範囲内で得られた知見を以下に示す。

- （1）外ケーブル100%では、ひび割れが集中して破壊するが、内ケーブル比率を大きくするに従ってひび割れの分散がよくなる。
- （2）外ケーブル100%に比べて内外併用ケーブルにすることで破壊断面におけるひずみ分布が改善され、コンクリート圧縮縁の圧壊を遅らせることができる。
- （3）（2）の理由により、内ケーブル比率を大きくすることで、最大荷重、終局変位、外ケーブルひずみの増加量のそれぞれが大きくなる。
- （4）内外ケーブル比率によって、曲げ性状が異なることが明らかになった。また、内ケーブル比率の増加に従って、曲げ性状は脆性的なものからよりじん性のあるものへ推移することが明らかになった。
- （5）これらの内外ケーブル比率の変化に伴う曲げ性状は、材料の力学的非線形性と部材の幾何学的非線形性を考慮できるフレーム解析により、精度よくシミュレートできることが明らかになった。

以上より、内外ケーブル比率によってPEPC梁の曲げ性状は大きく変化するため、実設計においてもこの点を十分考慮する必要があるものと考えられる。また、検討にあたっては複合非線形フレーム解析は有効な解析ツールになると考えられる。

参考文献

- [1] 沖見芳秀，右近八郎：複合非線形フレーム解析システムの開発，土木学会誌 技術最前線，Vol.80，pp.14-17，1995.1
- [2] 道路橋示方書・解説 I 共通編 IIIコンクリート橋編，（社）日本道路協会，pp.117，1994.2
- [3] 若林登，沼田昌一郎，一桝久允，玉置一清：外ケーブル構造の曲げ終局耐力に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.2，pp.1021-1026，1994.6