

論文 複合非線形フレーム解析による外ケーブルプレキャストセグメント PC 梁の耐力解析

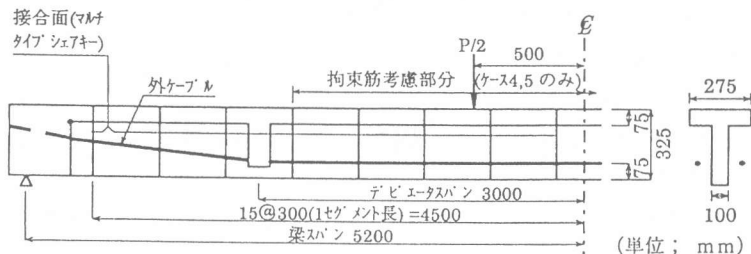
相沢旬*1、沖見芳秀*2、小関喜久夫*3、徳山清治*4

要旨：外ケーブル方式を用いたプレキャストセグメント工法によるプレストレストコンクリート梁の耐力性状確認実験に対して、複合非線形（幾何学的非線形・材料非線形）フレーム解析による実験シミュレーションを行った。その結果、軟化及び拘束効果等、各実験要因を適切にモデル化することにより、耐力力については実験結果と良い一致が得られた。変形能については実験結果より安全側の結果を得たが、定性的には実験で得た各要因の影響をシミュレートでき、本解析の有効性を示すことができた。

キーワード：外ケーブル、プレストレストコンクリート、プレキャストセグメント、構造解析

1. はじめに

外ケーブルプレキャストセグメント PC 橋は、省力化、急速施工及び維持管理の点から、第 2 東名神高速道等での建設が期待され近年益々注目されている。しかしながら、付着のある内ケーブル方式と異なり断面内の平面保持が適用できないため、我が国では適切な断面耐力算定方法が確立しておらず断面設計を基本とした従来の設計法とは整合しないのが現状である。そこで、外ケーブルプレキャストセグメント PC 梁の耐力性状を把握するため埼玉大学と共同実験を行い、接合方法やセグメント長の違い、拘束筋の有無及び内ケーブルの有無が耐力力、変形能に及ぼす影響を確認した。本実験にあわせて、著者らが開発した複合非線形フレーム解析による実験シミュレーションを行った。本論文では、軟化及び拘束効果等、各実験要因を適切にモデル化することにより比較的精度良く且つ安定してシミュレートできたので報告する。



図－1 供試体形状(ケース 1,2,4～6)

表－1 検討ケース

ケース	接合方法	セグメント長 Ls (cm)	配筋		ケーブル		比較項目
			上／下筋	拘束筋	仕様 (本数)	導入力 (tf/本)	
1	ドライ	30	4-D6/3-D10	×	SSWPR7A Φ 15.2 (2)	13.5	接合方法
2	エポキシ	30	4-D6/3-D10	×	SWPR7A Φ 15.2 (2)	13.5	基本ケース
3	エポキシ	60	4-D6/3-D10	×	SWPR7A Φ 15.2 (2)	13.5	セグメント長
4	エポキシ	30	4-D10/3-D10	D10@50mm	SWPR7A Φ 15.2 (2)	13.5	拘束筋 による靱性
5	エポキシ	30	4-D10/3-D10	D10@100mm	SWPR7A Φ 15.2 (2)	13.5	
6	エポキシ	30	4-D6/3-D10	×	SWPR7A Φ 12.4 (外 2 内 1)	9.0	ケーブル有無

2. 実験概要

代表的な供試体形状を図－1に示す。供試体は、梁長560cm、スパン長520cm、デビエータスパン長300cmであり、断面形状は高さ32.5cmのT型を有し、接合面にマル

*1 鹿島 情報システム部

(正会員)

*2 鹿島 情報システム部

*3 鹿島 土木技術本部

(正会員)

*4 鹿島 技術研究所

チタイプシェアーキー、断面内にスターラップ (D6@100mm) を設置している。表－1 に示すように、①接合方法、②セグメント長、③拘束筋の有無及びその程度、④内ケーブルの有無、に着目し耐荷性状の比較を行った。初期プレストレス導入力は引張荷重の55%、載荷は油圧ジャッキによる静的2点載荷とし、等曲げモーメント区間を100cmとした。

3. 解析概要

本解析システム (SLAP) [1] は応力・歪みの参照座標系を変形につれて更新する更新LAGRANGE法[2]により幾何学的非線形性を、梁断面をセル状に分割するファイバーモデル[3]により材料非線形性を評価し、さらに座屈点近傍や軟化挙動等の強非線形挙動を示す場合においても自動荷重変位制御[4]を用い安定して解析が行えるシステムである。外ケーブルPC梁の耐荷性状シミュレーションでは、材料非線形性に加え、荷重増加に伴う外ケーブルの張力変化や位置変化による部材の幾何学的非線形性を評価する必要から本解析システムを適用した。

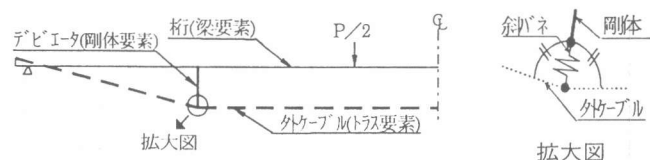
4. 実験シミュレーション解析

4. 1 解析モデル

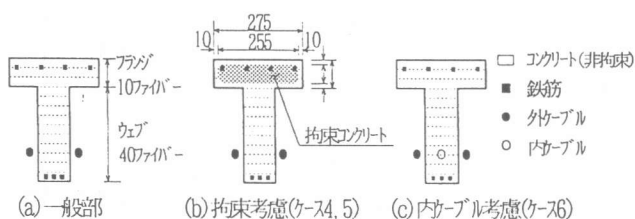
解析モデルを図－2及び図－3に示す。桁はファイバーモデルを用いた梁要素、外ケーブルは軸力のみ受け持つトラス要素とした。デビエータによる桁と外ケーブルの接合については、PC鋼線と接触するデビエータ部分にテフロンシートを設置することにより摩擦を低減させている。そのため、解析モデルでは摩擦を無視できるとして、デビエータを剛体要素とし外ケーブルの軸力がデビエータの左右で等しくなるような斜バネにより結合してモデル化した。

4. 2 応力-歪み関係

鉄筋及びPC鋼線の応力-歪み関係は材料試験結果を基に、それぞれバイリニア、トリリニアでモデル化した。コンクリートの応力-歪み関係は圧縮応力上昇域では



図－2 軸方向解析モデル



(単位 ; mm)

図－3 断面方向解析モデル

表－2 材料特性

材料	ケース	圧縮強度 f'_c (kgf/cm ²)	引張強度 [*] f'_t (kgf/cm ²)	強度時歪 ϵ_{co} (%)	終局歪 ϵ_{cu} (%)	拘束コンクリート部 f'_c (kgf/cm ²)	ϵ_{cu} (%)
コンクリート	1	356	25	0.2	0.72	—	—
	2	393	27	0.2	0.69	—	—
	3	385	26	0.2	0.70	—	—
	4	363	25	0.2	0.71	534	14.3
	5	329	24	0.2	0.74	378	5.32
	6	333	24	0.2	0.73	—	—
材料 (仕様)	ケース	径	降伏点 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 ($\times 10^4$ kgf/cm ²)		
鉄筋 (SD345)	1～6	D6	4607	6570	2.37		
	1～6	D10	3462	5090	2.18		
PC鋼線 (SWPR7A)	1～5	$\phi 15.2$	—	19770	2.00		
	6	$\phi 12.4$	—	17550	2.00		

^{*} $f'_t = 0.5 f'_c^{2/3}$

材料試験結果を踏まえ、高強度コンクリートに対し適用できる野口ら[5]の提案式を用い、軟化域については非拘束、拘束ともに修正 KENT & PARK [6] の提案式を用いた。各ファイバーの材料特性を表－2に示す。なお、コンクリート引張強度については、エポキシ樹脂の引張強度がコンクリートの

引張強度より大きいため、エポキシ接合では主筋の有無に関係なくセグメント全域で引張強度を考慮し、ドライ接合では主筋の無い無筋部については引張強度を無視した。

4. 3 桁軸方向要素分割長の影響検討

今回の解析では、セグメントを鉄筋コンクリート部分（RC部）と主筋の無い部分（無筋部）に要素分割しているが、桁を梁要素でモデル化し、また軟化を考慮した応力-歪み関係を用いているため無筋部の分割長が極端に小さい場合、無筋部の歪みを過大に評価してしまうことが考えられるので、ケース2に対して無筋部の要素分割長の影響検討（ケースA～E）を行った。解析結果を表-3に、荷重-中央変位関係を図-4に示す。耐荷力についてはケースAとケースEでも、その差は僅かであり要素分割長による影響は小さ

いと判断できる。しかし変形能については無筋部の分割長が小さいほど軟化挙動が早く現れる。ケースAやケースBのように接合面位置に節点を設けるか否かの違いはあるが、無筋部分割長を実長にすることは現実的ではない曲率集中を招くため、実長よりある程度大きく設定した方がよいと考えられる。実験結果と比較的良好な一致を示したのはケースEであったが、このことは高さ

200mmの圧縮試験から得られたコンクリート応力-歪み関係を用いていることも一因として考えられる。しかしながら現状では変形能を定量的にシミュレートすることは難しいと考え、以下の実験シミュレーションでは、セグメントの形状比率と変形能に対して安全側の評価となることなどから、ケースCの要素分割長（無筋部長:100mm）を用いた。

4. 4 実験結果と解析結果との比較

(1) 荷重-中央変位関係

表-4に各ケースの実験結果（破壊形式、耐荷力、最大変位）及び解析結果（耐荷力、最大変位）をまとめて示す。

①接合方法の影響

ケース1（ドライ接合）及びケース2（エポキシ接合）について、荷重-中央変位関係を図-5に示す。実験結果より接合方法の影響はひび割れ発生後に現れ、エポキシの方が若干変形能を有していると思われる。表-4に示すように、耐荷力に関しては実験結果と解析結果は良く一致しているが、変形能に関しては前述のように過小に評価している。しかし解析結果からも実験同様エポキシの方がドライより若干変形能を有していることがわかり、定性的には変形能についても評価できると考えられ、ドライ接合におけるコンクリート引張強度の取扱いが妥当であったと判断できる。

表-3 ケース2に対する分割長の影響検討結果

ケース	分割長		解析結果	
	RC部 L_r (mm)	無筋部 L_p (mm)	耐荷力 P_{max} (tf)	最大変位 δ_{35} (mm)*1
A	240 (実長)	30 (接合面考慮)	6.28	24.5
B	240 (実長)	60 (接合面未考慮)	6.28	24.5
C	200	100	6.39	35.9
D	150	150	6.49	45.5
E	100	200	6.56	52.9

*1 最大変位 δ_{35} ; コンクリート圧縮縁歪が 0.35% を超過した時の変位とした。

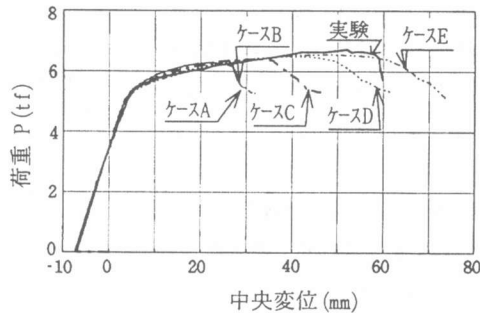
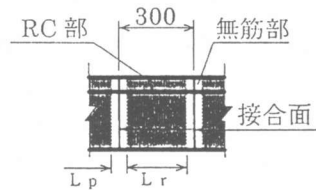


図-4 荷重-中央変位関係（分割長影響検討）

②セグメント長の影響

ケース2 (セグメント長; 30cm) 及びケース3 (セグメント長; 60cm) について荷重—中央変位関係を図—6に示す。実験結果を見ると、両ケースはコンクリート圧縮歪みが0.2%を超えるまではほぼ一致した挙動を示すが、それ以降は等曲げモーメント区間における接合面数の違い (ケース2; 4面、ケース3; 1面) から曲率集中の程度が異なるため、セグメント長による影響が現れる。耐荷力の差は僅かであるが、変形能ではケース2の方が5割程度向上している。実験結果と解析結果を同ケースで比較すると、耐荷力では実験結果と良く一致している。最大変位では解析結果が実験結果の60%程度であり一致しないが、セグメント長の影響による変形能は、解析結果もその差は5割程度で符合しており、定性的には変形能を評価できるとと思われる。

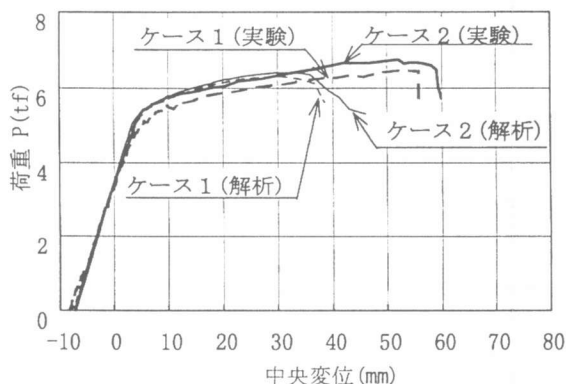
③拘束筋の有無とその程度による影響

ケース2 (拘束筋無) 及びケース4 (拘束筋有; D10@50mm) とケース5 (拘束筋有; D10@100mm) について、荷重—中央変位関係を図—7に示す。実験結果を見ると、横補強筋のコンクリート拘束効果による靱性の向上が見られるが、拘束程度の差による影響は僅かであった。実験結果と解析結果を同ケースで比較すると、耐荷力では実験結果と良く一致している。しかしながら、解析では拘束効果による靱性の向上をうまくシミュレートできていない。これはセグメント無筋部に拘束効果を考慮していないため、その部分が急速に軟化したためと考えられる。そこで、無筋部の実長60mmが拘束筋間隔とほぼ同じであることから、無筋部にもある程度コンクリートの拘束効果が期待できるものとし、無筋部に拘束効果を考慮した解析をケース4を基に2ケース実施した。ケース4Aは図—3 (b) に示した拘束コンクリート部分が無筋部にも考慮したケースであり、ケ

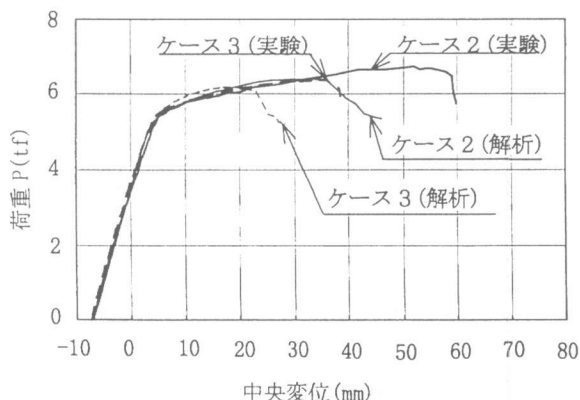
表—4 実験結果及び解析結果

ケース	破壊形式	耐荷力 (tf)		最大変位 (mm)	
		実験	解析	実験	解析 ^{*1}
1	圧壊 (接合面近傍)	6.46 (1)	6.30 (0.98)	54.9	33.7
2	圧壊 (接合面近傍)	6.66 (1)	6.39 (0.96)	57.8	35.9
3	圧壊 (接合面近傍)	6.36 (1)	6.16 (0.97)	37.5	22.9
4	コンクリート上縁剥落 (接合面近傍)	6.51 (1)	6.32 (0.97)	133.4	—
5	「破壊まで載荷不可」	6.48 (1)	6.27 (0.97)	110.1	—
6	内ケーブル降伏後、圧壊 (接合面近傍)	7.93 (1)	7.64 (0.96)	76.1	41.8

^{*1} 解析では便宜的にコンクリート圧縮歪が0.35%を超過した時とした。



図—5 荷重—中央変位関係 (ケース1, 2)



図—6 荷重—中央変位関係 (ケース2, 3)

ケース4Bは無筋部の拘束コンクリート部分の面積を半分にしたケースである。その結果、図-8に示すように、無筋部の拘束効果の程度をRC部と同じとしたケース4Aでは実験で見られたコンクリート上縁の剝離的な挙動は評価できないが、無筋部の拘束程度をRC部の半分としたケース4Bでは他のよりも実験に近い変形性状を得られた。このことから無筋部にもある程度の拘束効果があると考えられれば、拘束筋の有無による靱性向上を定性的にはシミュレートできると思われる。

④内ケーブルの有無による影響
ケース2(無)及びケース6(有)について、荷重-中央変位関係を図-9に示す。実験結果を見ると、内ケーブルによる耐荷力及び変形能の向上が見られる。実験結果と解析結果を同ケースで比較すると、耐荷力では実験結果と良く一致している。最大変位では解析結果の方が早く軟化し実験結果とはあまり一致しないが、内ケーブルの有無が変形能に及ぼす影響については定性的に評価できると思われる。

(2) 荷重-張力関係

代表として、ケース2及びケース3について、荷重-張力関係を図-10に示す。変形性状の影響を受ける張力増分については各要因が変形能に及ぼす影響と同様に定性的にはシミュレートできると思われる。

5. おわりに

外ケーブルプレキャストセグメントPC梁の耐荷性状確認実験に対し

て、複合非線形(幾何学的非線形・材料非線形)フレーム解析による実験シミュレーション解析を実施し、以下の知見が得られた。

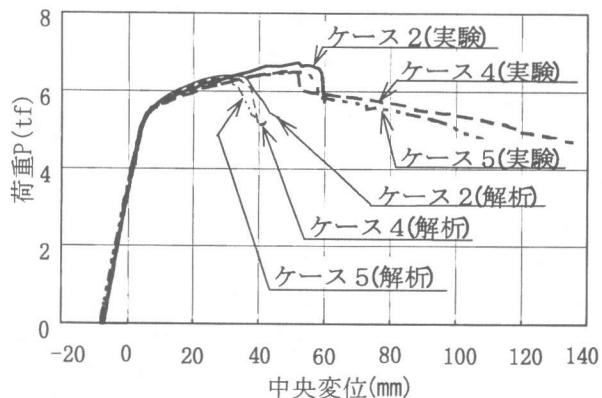


図-7 荷重-中央変位関係(ケース2, 4, 5)

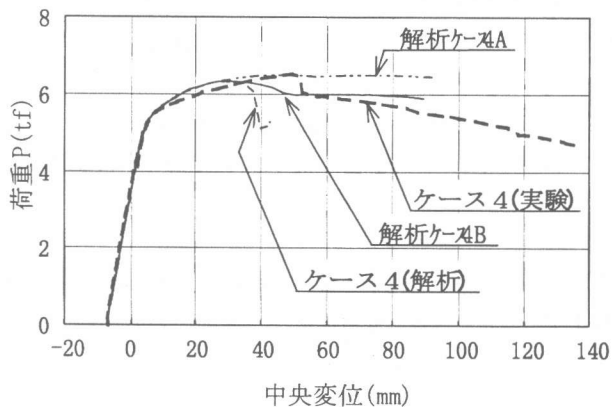


図-8 荷重-中央変位関係(ケース4, 4A, 4B)

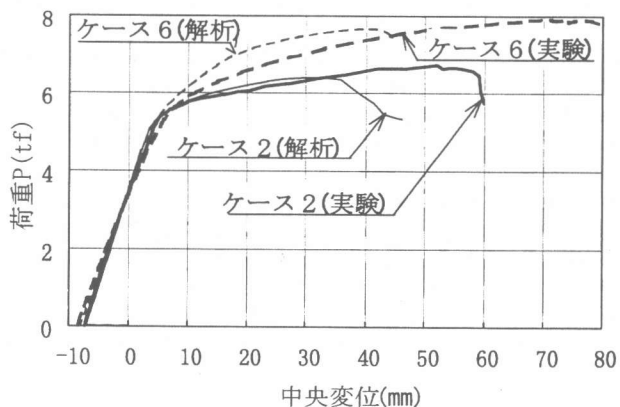


図-9 荷重-中央変位関係(ケース2, 6)

① 軟化及び拘束効果等、各実験を適切にモデル化することにより、耐荷力については実験結果とほぼ一致した結果が得られた。

② 変形能についてはセグメント無筋部の要素分割長により影響を受け、無筋部を実長とすると過度に安全側の結果となり、実験結果との照合からある程度の長さ分割した方がよいことが分かった。

③ 今回のような比率で無筋部を考慮すれば、変形能に対しても各要因が変形能に及ぼす影響を定性的にはシミュレートすることができた。

④ 拘束効果による変形能については、無筋部にもある程度の拘束効果が見込めると考えられる。

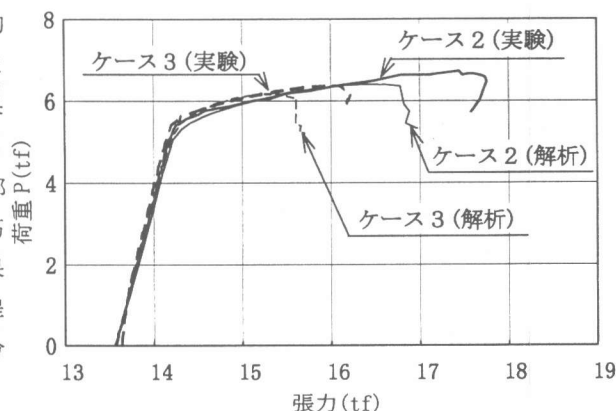


図-10 荷重-張力関係(ケース2, 3)

なお、変形能の定量的評価方法については現在検討中であり、また、外ケーブルプレキャストセグメントPC連続梁の耐荷力解析に関しても適用研究中である。

「謝辞」本研究の内、実験に関しては埼玉大学・鹿島共同研究として行われた。埼玉大学工学部建設工学科の町田教授、睦好助教授、ソムキャット氏、山口統央氏及びアラビントン氏に多大な御協力を頂き、深く感謝いたします。

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] Bathe, K. J. and Bolourchi, S.；“Large Displacement Analysis of Three-dimensional Beam Structures”，Int. J. Num. Meth. Engng, Vol. 14， pp. 961-986， 1979
- [3] Yamada, Y., Iemura, H., Matsumoto, T., Ristic, D. and Ukon, H.；“Stress-Strain Based Inelastic Earthquake Response Analysis of Reinforced Concrete Frame Structures”，Proc. of IABSE International Symposium, Delft, 1987
- [4] Bathe, K. J. and Dvorkin, E. N.；“On the Automatic Solution of Nonlinear Finite Element Equations”，Comp. Struct., Vol. 17， pp. 871-879， 1983
- [5] 飯塚崇文、野口博；“普通強度から高強度コンクリートまでを対象とした圧縮特性の定式化”，構造工学論文集, Vol. 37B, pp. 329-338, 1991. 3
- [6] Scott, B. D, Park, R. and Priestley, M. J. N.；“Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates”，ACI Journal, Vol. 79, No. 1, Jan.-Feb. 1982