

論文 繰返し荷重を受けるプラスチック製シースの付着特性のモデル化

松田 明*1・高田 康平*1・椿 龍哉*2

要旨: PC 構造物の PC 鋼材を保護するために用いられるプラスチック製シースが繰返し荷重を受けた場合の付着性能のモデル化を行った。モデル化には、簡易的にシースの付着性能を測る事ができる供試体での正負交番載荷試験の結果を用いた。本モデルは、載荷履歴を表現するためのパラメータを組み込む事で、プラスチック製シースを用いたポストテンション方式 PC 構造物の繰返し荷重作用下の挙動を調べる有限要素解析等に用いる事ができる。

キーワード: プラスチック製シース, 正負交番載荷, モデル化

1. はじめに

海洋または海岸環境における PC 構造物では、海水や潮風による塩害が起こり、また、寒冷地においては凍結防止剤散布による塩害等により、コンクリート中に塩分が浸透し、PC 鋼材の腐食・損傷等が発生する。そのような場合、鋼製シースに代わりプラスチック製シースを用いる事により、コンクリート中に塩分が浸透しても PC 鋼材の手前で塩分を遮断する事が可能である。

その他にも、鋼製シースに比べプラスチック製シースの摩擦係数が 60%程度である事から PC 鋼材の緊張力のロスが少なくなる点や、電気溶接時に発生する火花がプラスチック製シースならば表面を滑るため鋼製シースのような穴あきが発生しない点などの優位点がある。

以上のような事から、塩害対策等、特に耐久性が要求される場合には、プラスチック製シースを用いる事が原則とされている¹⁾。

しかし、コンクリートとプラスチック製シースが地震力等の大きな繰返し荷重を受けた場合の付着性能については明らかになっていない。

そこで本研究では、「プレストレストコンクリート用プラスチック製シースの付着性能試験方法(案)(JSCE-E710-2010)」²⁾に基づいて作製した供試体の正負交番載荷試験を行った。その結果を用いて、一般的なプレストレストコンクリートに用いられるコンクリート及びグラウトの強度の、プラスチック製シースを用いたポストテンション方式 PC 構造物の繰返し荷重作用下の付着すべり関係に関連する挙動を有限要素解析等の検討に用いる事ができるように、荷重変位関係のモデル化を試みた。

今回の実験では付着変位を 7mm 及び 14mm で制御して行っており、これは一般的な地震で想定される付着変位量を越えている。したがって、本モデルは終局状態の様子を再現する事が可能である。付着変位とは、供試体載荷側端面とグラウト部載荷面との相対変位である。鋼

製シースと異なり、プラスチック製シースを用いたプレストレストコンクリート構造物の終局状態の変形挙動を解析する場合、シースとコンクリートの間の付着特性を考慮する事がより重要となるため、本モデルのような付着特性モデルが必要になると考えられる。

2. プラスチック製シースの挙動

2.1 供試体

供試体は文献³⁾で用いられたものと同じである。供試体模式図を図-1に、供試体寸法とシース概要を表-1に示す。試験に用いたプラスチック製シースの内径は、通常の PC 構造に用いられる範囲の 35mm, 55mm, 75mm, 110mm の 4 種類、角形鋼管は 150mm×150mm×100mm, 200mm×200mm×100mm の 2 種類であり、厚さは 4.5mm である。シース内径と角形鋼管の全組み合わせに関して実験を行ったので、供試体は 8 種類ある。プラスチック製シースの材料は高強度ポリエチレンである。角形鋼管の高さは、シースの内径の 3 倍以下と定められているため²⁾、シースの最小内径である 35mm に対応した高さ 100mm に揃えている。コンクリート及びグラウトに使用した材料の特性及び配合をそれぞれ表-2, 3に示す。打込みは二回に分けて行い、第一回目コンクリート打込みの際の流動性を参考にして、第二回目は AE 減水剤の使用量を増やしている。PC グラウトに関しては第一回、第二回共に同配合、同材料を用いている。打ち込み後コンクリート材齢 3 日でグラウトを注入し、材齢 6 日で脱型し 20℃, 60%の恒温養生室にて気中養生を行った。

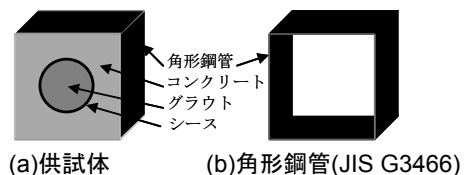


図-1 供試体と角形鋼管模式図

*1 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府都市地域社会専攻 (学生会員)

*2 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 教授 (正会員)

表-1 供試体寸法とシース概要

供試体寸法 (mm)	150×150×100mm				200×200×100mm			
シース内径 (mm)	35	55	75	110	35	55	75	110
シース外径 (mm)	41	67	88	131	41	67	88	131
シース厚さ (mm)	2	3	3.5	5	2	3	3.5	5
シースの凹凸ピッチ (mm)	13	16	16	24	13	16	16	24
シースの凹凸高さ (mm)	1	3	3	5.5	1	3	3	5.5

表-2 材料特性
(a) コンクリート

材料	種類	特性
セメント	早強ポルトランドセメント	密度; 3.14g/cm ³
細骨材(第一回)	千葉県君津市産 山砂	密度; 2.60g/cm ³ , 吸水率; 2.99%
細骨材(第二回)	千葉県君津市産 山砂	密度; 2.69g/cm ³ , 吸水率; 1.20%
粗骨材(第一回)	埼玉県産石灰砕石	密度; 2.69g/cm ³ , 吸水率; 0.59% 最大寸法; 20mm
粗骨材(第二回)	硬質砂岩	密度; 2.66g/cm ³ , 吸水率; 1.02% 最大寸法; 20mm
AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物と分子間架橋ポリマーの複合体	-

(b) グラウト

材料	種類	特性
セメント	早強ポルトランドセメント	密度; 3.14g/cm ³
混和剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物	ノンブリーディング・低粘性型

表-3 配合
(a) コンクリート

	水セメント比	細骨材率	水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
	W/C%	S/a%	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	ml
第一回配合	36.10	41.20	168.96	467.99	683.36	1009.04	140.40
第二回配合	36.10	41.20	168.96	467.99	683.36	1009.04	327.59

(b) グラウト

水セメント比%	混和剤%	使用セメント
40.0	1.0	早強ポルトランドセメント

2.2 試験装置と載荷方法

載荷はコンクリート強度が 40N/mm² 以上, グラウト強度が 30 N/mm² 以上に達してから行った。試験装置及び治具模式図を図-2 に示す。治具の寸法を表-4 に示す。測定治具の寸法は 40×10×1cm である。支圧板の寸法は 25×25×2.5cm で中心の穴の直径はシース径に合わせてそれぞれ 4.5, 7, 9.2, 13.5cm である。加力治具の寸法は全て高さ 6cm で直径はシース径に合わせてそれぞれ 3, 5, 7, 10.5cm である。供試体, 荷重計, 支圧板, 加力治具を正しく据え供試体に偏心荷重が加わらないよう注意した。また, 荷重は衝撃を与えないようなるべく様な速度で加え, 載荷速度は約 1.2mm/分であった。加力治具とグラウトは接触しているだけであり, 正負両載荷時で供試体を上下入れ替えて載荷した。測定項目は荷重及びグラウト部載荷面の変位とし, 変位を制御し載荷を行った。1~4cycle までは変位を 7mm で制御し, 5cycle 目は 14mm で制御している。1cycle 目実験時のコンクリート強度は第一回目が 64N/mm², 第二回目が 53N/mm², グラウト強度は第一回目が 59N/mm², 第二回目が 67N/mm²

であり, 一般 PC 用強度としては普通程度である。

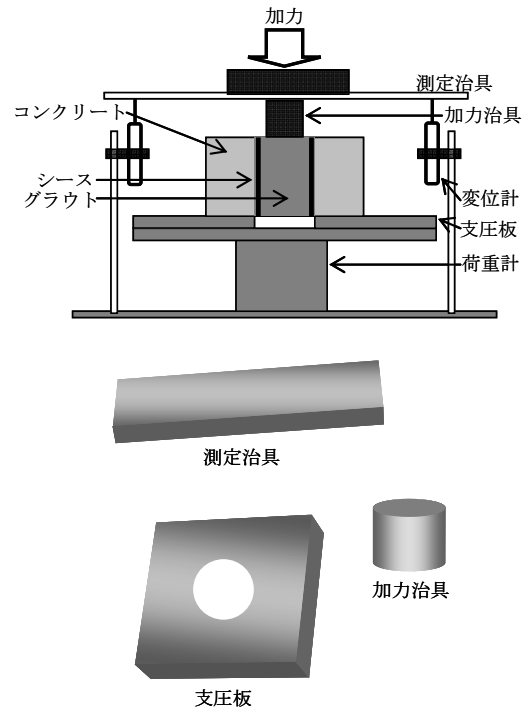


図-2 試験装置及び治具模式図

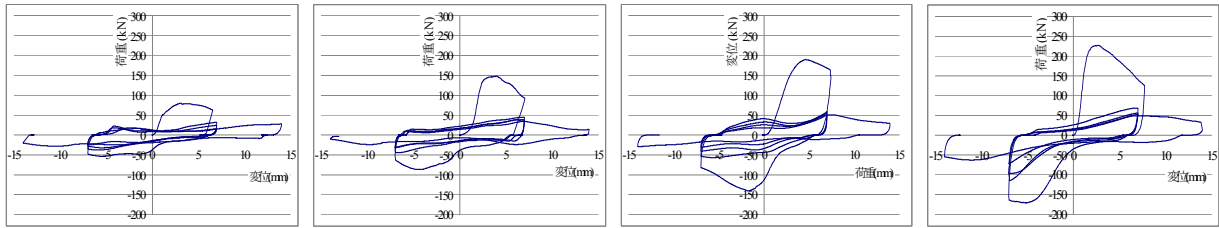
表-4 測定治具寸法

シース内径 (mm)	35	55	75	110
測定治具寸法 (mm)	400×100×10			
支圧板	寸法 (mm)	250×250×25		
	中心穴直径 (mm)	45	70	92 135
加力治具	高さ (mm)	60		
	直径 (mm)	30	50	70 105

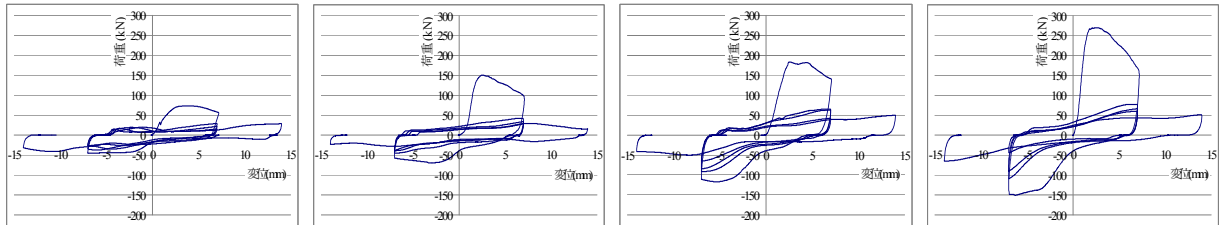
2.3 正負交番載荷試験結果

試験結果を図-3 に示す。上段(a~d)に供試体寸法 150×150×100mm, 下段(e~h)に供試体寸法 200×200×100mm を示し, 左から順にシース内径 35, 55, 75, 110mm を示している。試験は, 除荷後の変位のクリープ回復が落ち着くまで測定を続けている。しかし, 今回は連続した繰返し荷重下における挙動を明らかにする事を目的としている事から, 回復変位量を除いた結果を示している。補正した修正変位量を表-5 に示す。また, 修正変位量の模式図を図-4 に示す。

供試体寸法に関わらず, シース内径が大きくなるほど最大荷重が大きくなる傾向が確認できる。これは, 内径が大きくなるほど付着面積が大きくなるためである。そして, 1cycle 目以降荷重が大きく落ち, 2~5cycle 目までの挙動はほとんど変わらない事が分かる。これは, 1cycle を終え正負両方面からの載荷を受ける事で, プラスチック製シース表面のひだ周辺のコンクリートが破壊されシースとコンクリートの付着が切れた事によると思われる。



(a)150×150×100mm, 35mm (b)150×150×100mm, 55mm (c)150×150×100mm, 75mm (d)150×150×100mm, 110mm



(e)200×200×100mm, 35mm (f)200×200×100mm, 55mm (g)200×200×100mm, 75mm (h)200×200×100mm, 110mm

図-3 荷重変位曲線

また、荷重を始めた直後は荷重が伸びず変位が進展する領域が全供試体に共通して見られる事から、この挙動はプラスチック製シース特有のものであると推察する。

軸のみに適用している。横軸に関しては、実験の段階で変位を制御している事から供試体ごとのばらつきが無く正規化する必要がないと考えた。また凡例に関して、供試体高さは全て共通な事から省略して示している。

表-5 修正変位量

	荷重段階	供試体寸法及びシース内径 (mm)							
		150×150×100				200×200×100			
		35	55	75	110	35	55	75	110
修正変位量 (mm)	1cycle 正	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1cycle 負	0.19	-0.06	0.09	0.06	0.13	0.05	0.04	0.08
	2cycle 正	-0.06	0.00	-0.09	0.02	-0.08	-0.08	-0.07	-0.02
	2cycle 負	0.12	0.01	0.05	0.09	-0.03	0.08	0.14	0.02
	3cycle 正	-0.07	-0.02	-0.05	-0.06	-0.07	-0.02	-0.18	0.25
	3cycle 負	0.14	-0.76	0.13	0.09	0.13	-0.97	0.21	0.24
	4cycle 正	-0.02	-0.16	-0.11	-0.08	-0.09	0.02	-0.05	-0.02
	4cycle 負	0.07	0.11	0.05	0.07	0.10	0.07	0.10	0.28
	5cycle 正	-0.04	0.00	-0.09	0.12	-0.31	-0.13	-0.03	-0.06
	5cycle 負	0.23	0.17	-1.97	0.07	0.11	0.14	0.27	0.05

7mm, 1cycle 目の正方向荷重において、供試体寸法 150×150×100mm, シース内径 75mm を除き変位が 2.5 から 3mm 程度の間で降伏している事が分かる。ただし、降伏後緩やかに荷重が落ちる様子は全体的な傾向として類似している。負方向荷重においては、荷重後しばらくは緩やかな傾きで荷重が上がり、変位 0 付近から荷重が伸びその後降伏する様子が見られる。ただし、供試体寸法 150×150×100mm, シース内径 35 と 55mm に関しては、変位 2mm 程度から荷重が大きく伸びている。また、正側に対する負側の降伏強度の比にもばらつきが見られるが、供試体寸法 150×150×100mm, シース内径 110mm を除き降伏後に降伏棚がみられる。

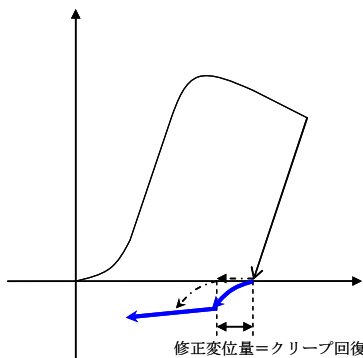


図-4 修正変位量模式図

7mm, 2~4cycle 目の正方向荷重において、変位-5mm 程度で荷重の上昇が落ち着き、その後傾きが緩やかに上昇する様子は全体的な傾向として類似している。7mm 位置での荷重も 0.2 から 0.4 の間にありばらつきが少ない。ただし、シース内径 35mm のものは正負両荷重直後に大きく荷重が上がるという特徴がみられる。負方向荷重においては、最終的な荷重にばらつきがみられるが、これは cycle 数が増加する事によるものであり、変位 5mm 程度で荷重は落ち着きその後傾きが緩やかになる様子は全体的な傾向として類似している。

3. モデル化

3.1 正規化した荷重変位曲線の特徴

モデル化をするに当たり、シース内径及び供試体寸法による荷重変位曲線概形の違いを確認するため、全ての実験結果を正規化し比較を行った。正規化では 7mm, 1cycle 時の正方向荷重の最大荷重で除した。各 cycle における正規化を図-5~7 に示す。なお、今回の正規化は縦

14mm, 1cycle 目に関しては、載荷途中で荷重が減少するものと荷重が増加し続けるものとで大きく 2 つに分けられる。どちらも、正方向載荷時は変位-5mm 程度、負方向載荷時は変位 10 から 12mm 程度で荷重の上昇が落ち着き、その後傾きが緩やかになる様子は類似している。ただし、荷重が減少するものに関しては、正方向載荷時

は変位 7mm 程度、負方向荷重時は変位-10mm 程度において減少を開始する。また、シース内径 35mm は荷重の上下変動が激しいが、これは加力点のグラウトが繰返し数の増加により圧壊し、測定器具の水平を維持する事が困難であった事から正しく荷重を行えなかったためであると思われる、モデル化の対象から除外した。

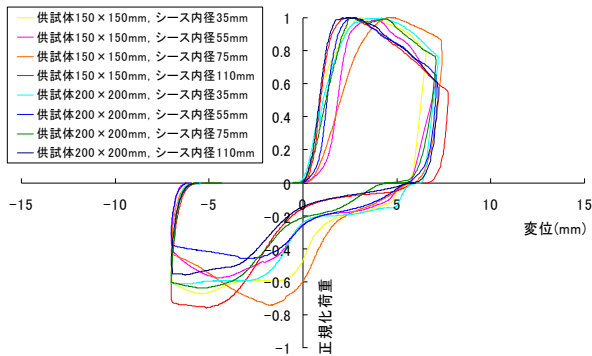


図-5 7mm, 1cycle 目の正規化

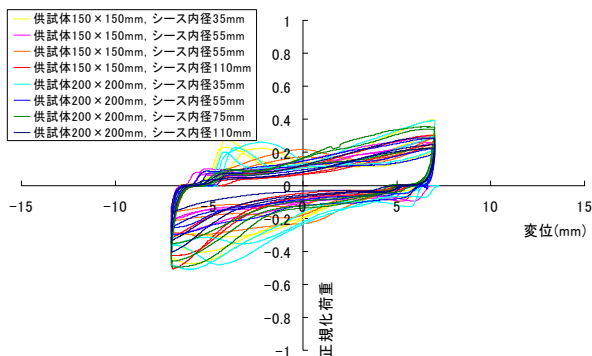


図-6 7mm, 2~4cycle 目の正規化

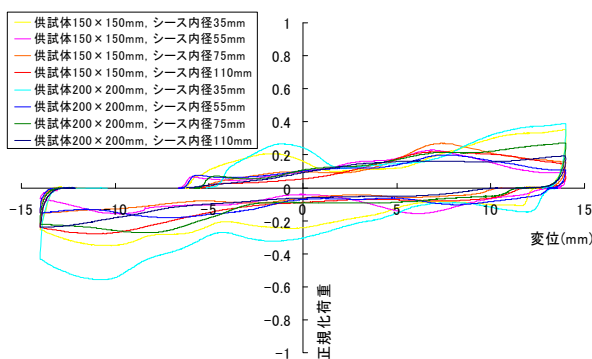


図-7 14mm, 1cycle 目の正規化

3.2 プラスチック製シースの荷重変位曲線のモデル化

正規化したプラスチック製シースの付着特性を表す荷重変位曲線が各種シースに対して、また、2種類の寸法の角形鋼管による拘束状況に対して、同様の傾向を示す事から、繰返し荷重を受けるときの挙動を一つの多直線曲線併用モデルとしてモデル化できる事が分かる。

そこで、プラスチック製シースが正負交番荷重を受け

たときの荷重変位曲線についてモデル化を行った。モデルは、正規化の結果を基に作成し、モデルに用いた各パラメータの値は実験結果から得られたデータの平均値を採用している。変位の値に関しては、供試体寸法及びシース内径の違いが大きくみられなかったため全て統一しているが、荷重に関してはシース内径の違いが明らかに見てとれた事から内径ごとに示している。なお、正規化の際に実験上の問題と思われた 14mm, 1cycle 目のシース内径 35mm のデータは除いている。各 cycle におけるモデルを図-8~10, モデルに用いた各パラメータの値を表-6~8 に示す。全モデルにおいて、領域 a は 2 次関数で、その他の領域 b~e は全て 1 次関数でモデル化を行っている。

モデルの領域 a は、変位の増加に伴う荷重の増加が少ない。これは、荷重に対しプラスチック製シースのひだが変形する事でエネルギーを吸収し、荷重が増加しないと思われる。領域 b では、微小な変形が完全に抑えられグラウト、シース、コンクリートが完全にかみ合い荷重及び変位が増加する。領域 c では、グラウトの破壊強度に達し、荷重が落ちている。領域 d では、変位の増加と比較し荷重があまり増加していない。これは、前荷重によりシース周辺のコンクリート及びシース内のグラウトが破壊され、コンクリート-シース間及びシース-グラウト間の付着が切れている状況での再荷重という事から、付着面積が少なくシース周辺のコンクリートも荷重を受け持てなくなっており、荷重が逃げるためである。領域 e では、変位が 0 に戻った結果、再びコンクリート、シース、グラウトがかみ合い荷重が増加する。領域 f では、グラウトが降伏した結果、一定荷重を維持したまま変位が進展する降伏棚となっている。領域 g では、供試体内部は正負両方向からの荷重により、シース周辺のコンクリート及びシース内のグラウトの破壊が進展し、またシース自体の破断も発生し始める。そのため、シース及びグラウトが滑り、変位の増加のみが卓越している。

本モデルは、シース内径を通常の PC 構造に用いられる範囲の 35mm, 55mm, 75mm, 110mm に限定してモデル化を行っている。荷重とシース内径の関係は、7mm, 1~4cycle と 14mm, 1cycle の全てにおいて、荷重が大きいものは相関が見られるが、荷重が小さいものは相関が見られない傾向がある。7mm, 1cycle 目はほとんどに相関が見られるが、 P_E と P_F には見られない。7mm, 2~4cycle 目もほとんどに相関が見られるが、 P_A と P_D には見られない。14mm, 1cycle 目は全体的に荷重が小さいためほとんどに相関が見られないが、 P_B には相関が見られる。

各 cycle において、荷重とシース内径に相関が見られるものの中で代表的な例を図-11 に示す。図に示す通り、

最大荷重とシース内径には多項式で表されるような相関がある。

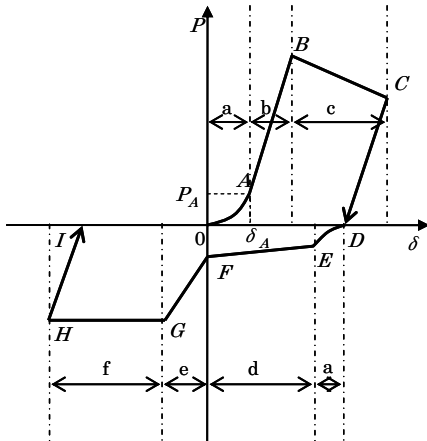


図-8 7mm, 1cycle 目のモデル

表-6 7mm, 1cycle 目のモデルに用いたパラメータの値

変位 (mm)		δ_A	δ_B	δ_C	δ_D	δ_E	δ_F	δ_G	δ_H	δ_I
		0.7	2.7	7.0	6.1	4.3	0.0	-3.1	-7.0	-6.2
荷重 (kN)		P_A	P_B	P_C	P_D	P_E	P_F	P_G	P_H	P_I
シース内径 (mm)	35	6.1	74.5	56.9	0.0	-10.5	-21.7	-45.3	-45.3	0.0
	55	24.8	148.6	91.6	0.0	-16.6	-40.5	-77.3	-77.3	0.0
	75	31.2	186.9	144.8	0.0	-15.1	-55.6	-128.3	-128.3	0.0
	110	45.5	246.2	132.2	0.0	-12.3	-41.0	-150.6	-150.6	0.0

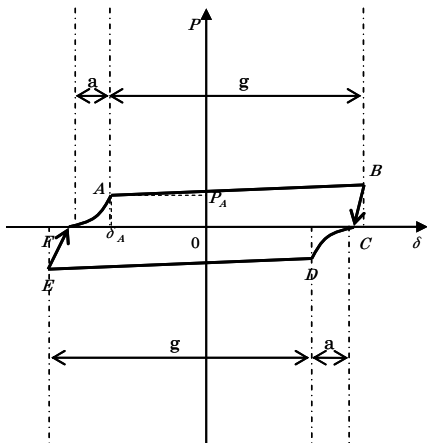


図-9 7mm, 2~4cycle 目のモデル

表-7 7mm, 2~4cycle 目のモデルに用いたパラメータの値

変位 (mm)		δ_A	δ_B	δ_C	δ_D	δ_E	δ_F
		-4.2	7.0	6.1	4.8	-7.0	-6.4
荷重 (kN)		P_A	P_B	P_C	P_D	P_E	P_F
シース内径 (mm)	35	16.7	22.7	0.0	-5.7	-28.4	0.0
	55	11.4	37.7	0.0	-11.5	-38.1	0.0
	75	14.5	54.8	0.0	-7.7	-60.1	0.0
	110	11.3	63.4	0.0	-8.0	-87.4	0.0

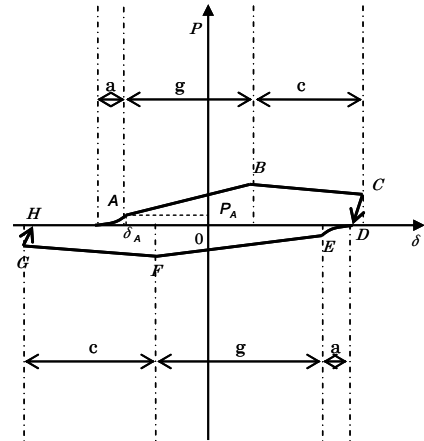


図-10 14mm, 1cycle 目のモデル

表-8 14mm, 1cycle 目のモデルに用いたパラメータの値

変位 (mm)		δ_A	δ_B	δ_C	δ_D	δ_E	δ_F	δ_G	δ_H
		-4.7	8.2	14.0	12.6	10.4	-10.0	-14.0	-12.6
荷重 (kN)		P_A	P_B	P_C	P_D	P_E	P_F	P_G	P_H
シース内径 (mm)	35	6.7	24.7	28.0	0.0	-9.6	-34.3	-25.2	0.0
	55	10.1	31.7	15.3	0.0	-7.3	-25.6	-23.3	0.0
	75	10.8	44.7	39.6	0.0	-8.6	-36.5	-34.3	0.0
	110	6.6	46.6	42.6	0.0	-13.2	-61.5	-59.7	0.0

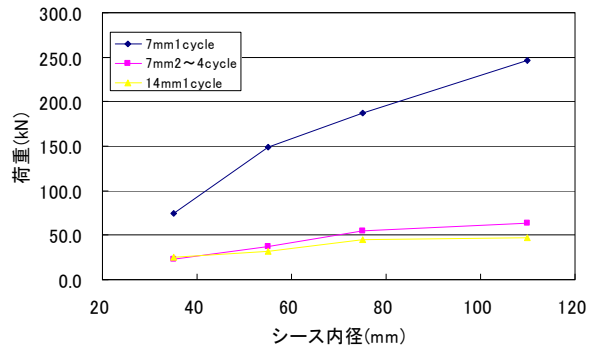


図-11 各 cycle における最大荷重とシース内径の関係

3.3 荷重変位曲線モデルの適用性

荷重変位曲線モデルの妥当性の検証を行うため、実験データとの比較を行った。図-12 に比較結果を示す。シース内径及び繰返し数により最大荷重の大きさが異なる事から、これらで分けて示している。図下の説明は、シース内径、繰返し数の順に示している。本モデルは繰返し荷重の影響を再現している事が分かる。

本モデルで示した繰返し変位以外の繰返し変位については、5cycle 目である 14mm, 1cycle の B 点と C 点(領域 c), F 点と G 点(領域 c)の勾配を使って必要に応じて本モデルを適用する事ができる。ただし、本実験以外に 1つまたは 2つの別の繰返し変位に関するデータが得られた場合は、本データと補間する事により、より一般的に用いる事が出来ると思われる。

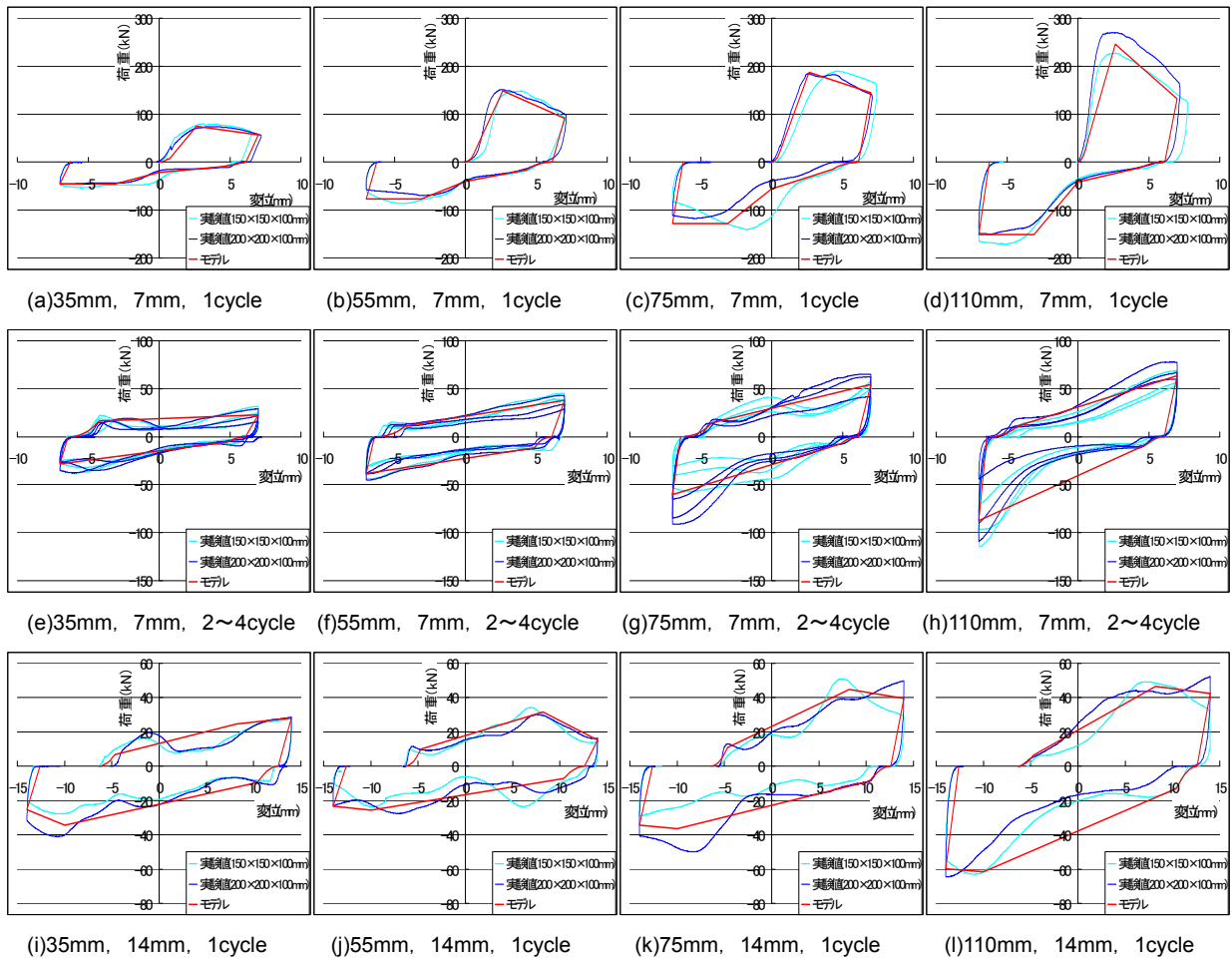


図-11 試験結果とモデルの比較

4. 結論

- (1) 繰返し荷重作用下のプラスチック製シースの付着すべり関係に関する挙動を、有限要素解析等での検討に用いる事ができるよう、正負交番荷重による荷重変位曲線のモデルを多直線曲線併用モデルとして構築した。
- (2) 本モデルは、一般的なPC構造物に用いられるコンクリート強度、グラウト強度を想定している。
- (3) 本モデルは、一般的な地震で想定される変位量を越えている事から、シースの終局状態の様子を再現する事を想定している。
- (4) 変位と荷重のパラメータを導入する事で、正負交番での繰返しの影響を表す事ができる。
- (5) 本モデルの適用シース内径は35mm, 55mm, 75mm, 110mmに限定している。ただし、モデルに用いた主要なパラメータにはシース内径と相関が見られる事から、今回は未検討の他のシース内径についても適用可能と思われる。
- (6) 本研究では2種類の角形鋼管を用いたが、角形鋼管の外径サイズの違いによる繰返し荷重に対する荷重変位曲線に及ぼす影響は小さい。
- (7) 提案したモデルと試験結果の比較から、本モデルが

試験結果を良好に表している事が確認できる。

- (8) 本モデルでは荷重-付着変位でまとめている。有限要素解析では、シースとの間の界面特性をばねで表現する時にそれが利用できる。
- (9) 適用範囲としては、本研究で用いたシースまたは、表-1に示すシース概要と類似したものに限定される。今後、種々の新規のプラスチック製シースに適用範囲を広げるためにはさらに実験データを蓄積する必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書【施工編】、特殊コンクリート、12章プレストレストコンクリート、土木学会、2007
- 2) 土木学会：プレストレストコンクリート用プラスチック製シースの付着性能試験方法（案）(JSCE-E710-2010)、2010年制定コンクリート標準示方書【規準編】、土木学会、2010
- 3) 尾関淳、椿龍哉：プレストレストコンクリート用プラスチック製シースの付着性能の試験方法、プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、Vol.21, pp463-468, 2012.10