

ねじり抵抗の大きなプレキャストコンクリート くいに関する研究

村 田 二 郎*
奥 山 勝 也**
国 府 勝 郎***

1. 緒 言

プレキャストコンクリートくいを利用したパイルベントが検討されているが、地震時における水平力の作用方向によっては、くいに大きなねじり力が作用すると考えられる。また、市街地におけるくい打ち作業においては騒音と振動を防止することが要求されている。オガー掘削後にくいをねじり貫入定着する方法は、この要求に適したものと思われる。

市販のプレキャストコンクリートくいのねじり抵抗は、著しく小さいことが報告されている¹⁾。コンクリート部材のねじり抵抗を増大させるためには、コンクリートのひびわれ強度を増大させることが重要であって、プレストレスの利用がこれに最も適した方法と思われる。本研究は、機械的なプレストレスおよび膨張コンクリートによるケミカルプレストレスによってひびわれ強度を増大させることを目的としたものであり、昭和49年から52年の3年間にわたって行ったものである。

本文は、このようなねじり抵抗の大きなくいの製造方法、ねじり強度、変形および繰返し荷重に対する挙動等について検討したものである。本実験によって、外径300mmのA種およびC種のPCくいに相当する場合、ひびわれ強度で約1.5倍、終局強度で約3倍のねじり抵抗が得られた。また、鋼管に膨張コンクリートを充填したくいでは、ひびわれ強度で約3倍、終局強度で約8倍のねじり抵抗を有するくいを開発した。

2. 使用材料

使用したセメントおよび膨張材は、小野田社製の普通ポルトランドセメントおよび石灰系膨張材エキスパンである。これらの化学成分を表-1, 2に示す。

骨材は、細・粗骨材ともに鬼怒川産の川砂および玉石砕石を使用した。これらの試験成績を表-3に示す。

くいの軸方向鉄筋には、線径7mmのPC鋼線を使用し、らせん鉄筋には、線径3mmまたは4mmの普通鉄線を用いた。鋼管は、板厚1.2mm, 1.6mmおよび3.2mmの一般構造用圧延鋼材を溶接して用いた。これらの鋼材の機械的性質を表-4に示す。

表-3 骨材の試験成績

骨材の種類	比 重	吸 水 率	粗 粒 率	単位容積重量
川 砂	2.59	1.95%	2.42	1 650 kg/m ³
玉石砕石	2.63	0.94	6.51	1 540

表-4 鋼材の機械的性質

記 号	名 称	径または厚 (mm)	降 伏 点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	適 用 個 所
SWPR 1	PC 鋼 線	7	154	166	6.7	軸 筋
SWM-B	普通鉄線	3	60.0	66.4	7.8	らせん鉄筋
		4	50.2	54.6	10	
SS 41	一般構造用 圧延鋼材	1.2	29.0	43.5	35	鋼 管
		1.6	28.3	42.0	39	
		3.2	28.0	42.3	38	

表-1 普通ポルトランドセメントの物理試験成績と化学成分

比 重	ブレン値	ig. loss	insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	合 計
3.17	3140 cm ² /g	0.6%	0.1%	22.3%	5.4%	3.2%	65.2%	1.2%	1.7%	99.7%

表-2 エクスパンの物理試験成績と化学成分

比 重	ブレン値	ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	合 計
3.18	2440 cm ² /g	0.9%	11.4%	2.7%	1.6%	79.4%	0.8%	3.3%	100.1%

* 東京都立大学工学部

** 日本コンクリート工業(株)

*** セメント協会研究所

3. 試験くいの製造方法

3.1 くいの種類および寸法

試験したくいの種類は、コンクリートの種類、軸方向の機械的プレストレスの有無、円周方向の補強方法によって表-5 に示す5種に分類される（以後略号でもって示す）。

表-5 試験くいの種類

略号	コンクリートの種類	軸方向の機械的プレストレス	円周方向の補強方法	養生方法
RCくい	普通コンクリート	0	らせん鉄筋	蒸気養生
PCくい		47, 100		
CPくい	膨張コンクリート	0	鋼管	オートクレープ養生
CPCくい		47, 100		
SCくい		47		

くいの寸法は、外径 300 mm、試験区間の長さ 1550 mm、コンクリートの壁厚 60 mm であり、両端部に載荷点用としてコンクリートブロックを有している。

軸方向の配筋は、軸方向の機械的なプレストレスを導入しない場合および 47 kg/cm² とした場合には、線径 7 mm の PC 鋼線を 6 本使用し、100 kg/cm² のとき 16 本使用した。

軸方向の機械的なプレストレスの導入は、プレテンション方式によった。

らせん鉄筋は、鉄筋比 0.12% から 1.54% に変化させ、壁厚の中央だけに配置したものとかぶり 10 mm の位置にも配置した二重配筋のものがある。SC くいの鋼管鋼材比は 2.59% から 7.17% の範囲にある。

これらの試験くいの断面寸法を 図-1 に示す。

3.2 コンクリートの配合、成形および養生

使用したコンクリートの配合は、表-6 に示す通常の

表-6 プレキャストコンクリートくいの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				混和剤
			セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材 G	
20	37	39.5	420	153	708	1101	4.2

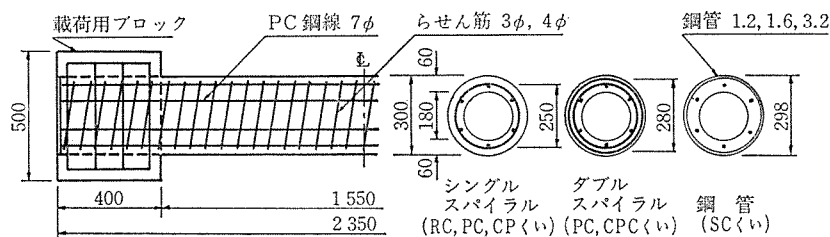


図-1 試験くいの断面寸法

プレキャストコンクリートくに使用されているものを基本とし、これに膨張材 40 kg/m³ から 45 kg/m³ をセメントに置換えもしくは添加したものとなっている。スランプは 12 cm を標準とした。コンクリートの締固めは遠心力締固めとし、前置き 2 時間後に蒸気養生を行った。試験くいの端部に載荷用のブロックを打設後、材令 4 日より約 1 週間水中養生を行った。SC くいの場合には蒸気養生 (70°C, 8 時間) 後にオートクレープ養生 (180°C, 9 時間) を行った。

膨張コンクリートを使用したくいの製造方法を検討するため、試験くいと同一断面で長さ 450 mm、軸方向の PC 鋼線に線径 7 mm を 6 本、らせん鉄筋には線径 4 mm を 30 mm ピッチに配置した供試体の蒸気養生中の鉄筋歪を測定した。その結果は 図-2 に示すように、軸鉄筋の歪に比較してらせん鉄筋の値は非常に小さく、単位膨張材量 55 kg/m³ 以上においてらせん鉄筋の歪に相違が認められない。これは型枠の剛性が著しく大きいため型枠によって円周方向の膨張が制限され、また中空部に向けてコンクリートが自由膨張すること等により、脱型にともなう歪の増加も小さいと考えられる。ケミカ

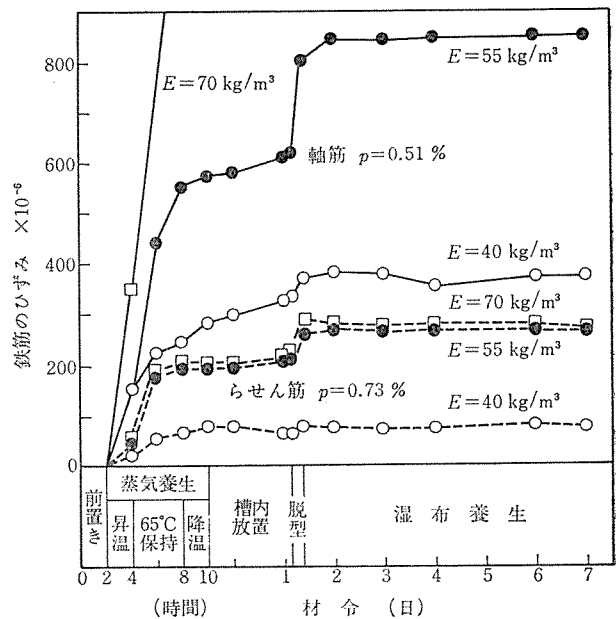


図-2 蒸気養生中の鉄筋歪

表一7 中空円筒供試体の内圧試験結果

鉄筋比 (%)	0.71				0.83	
らせん鉄筋のかぶり (mm)	10		1		1	
型枠の条件	拘束	除去	拘束	除去	拘束	除去
ひびわれ荷重 (ton)	2.38	2.56	2.71	2.88	3.07	3.27

ルプレストレスを十分に活用するためには、脱型後の鉄筋に大きな拘束歪が発生していなければならないので、型枠拘束を早期に解放する必要がある。

コンクリートの膨張を鉄筋が十分に拘束するためには、らせん鉄筋をできるだけ外側に配置するのがよい。表一7 は外径 200 mm の中空円筒供試体のらせん鉄筋かぶりを 10 mm と 1 mm にし、型枠のまま養生した場合と養生の初期に型枠を除去した場合の内圧試験結果^{2),3)}である。同一の鉄筋比で、かぶりを 10 mm とし型枠拘束のまま養生した場合と、かぶり 1 mm 型枠拘束なしで養生した場合では後者が前者の 1.25 倍となっている。

これらの結果より、試験くいの製造においては型枠内面にパラフィンを 2 mm 厚さに塗布して型枠拘束を除去し、らせん鉄筋を壁厚の中央部とかぶり 10 mm の位置の二重に配置した。

4. ねじり試験方法

本実験に使用したねじり試験機は、一端を固定し他端にトルクを加える純ねじり状態で載荷できるものである。試験は、ねじり強度に着目した単純載荷試験、ねじり貫入工法を想定した一方向の繰返し載荷試験および地震時を想定した正負方向の繰返し載荷試験を行った。単純載荷試験は、ひびわれ発生まで所定の回転量だけ増大させてゆき、そのときの荷重を記録した。一方向繰返し載荷試験は、CPC-47 について行い、このくいのひびわれ強度 3.80 tm の約 70% に相当する 2.6 tm で一定方向に 20 回載荷し、その後破壊まで載荷した。正負方向繰返し載荷試験は、ひびわれ強度より小さい荷重に対する挙動を調べるために、CPC-47 についてひびわれ強度の約 70% で正負方向に 30 回載荷した。また、ひびわれ発生後のくいの挙動について検討するため、CPC-47 および CPC-100 についてひびわれ発生時のねじれ角の約 1, 1.5, 2 および 4 倍で正負方向に繰返し載荷を行った。SC くいのねじり試験もそのひびわれ時のねじれ角に基づいて、正負方向に繰返し載荷を行った。

試験くいのねじれ角は、1/100 mm 目盛ダイヤルゲージにより、軸方向中央部 900 mm の区間で回転量を測定し計算によって求めた。またコンクリートあるいは鋼管表面上の 45 度方向の歪も測定した。一部のくいで

は、らせん鉄筋および軸筋の歪を測定した。

5. CPC くいのねじり試験結果および考察

5.1 ひびわれ強度に対するプレストレスの効果

RC, PC, CP および CPC くいの代表的なねじり試験の結果を表一8 に示す。らせん鉄筋比 0.41% の RC および CP くいのひびわれ強度は、それぞれ 1.00 tm および 1.44 tm であった。CP くいのらせん鉄筋比を 0.73% に増大したときのひびわれ強度は 1.66 tm となった。PC くいでは、コンクリート強度 630 kg/cm²、プレストレス 47 kg/cm² の場合、らせん鉄筋比が 0.12% から 1.54% の範囲において 3.33 tm から 3.48 tm であり、ひびわれ強度に対する鉄筋比の影響は認められなかった。CPC くいのひびわれ強度は、らせん鉄筋比 1.54% プレストレス 47 kg/cm² の場合に 3.80 tm であり、同一鉄筋比でプレストレス 100 kg/cm² のとき 4.86 tm であった。CPC くいのひびわれ強度は PC くいに対して 20% 程度の強度増大が認められる。

このようなプレストレスコンクリート部材のねじりによるひびわれが最大主応力説に従うとすれば、ひびわれ発生時のねじりせん断応力度は、次式で示される(記号の説明は末尾に示した)。

$$\tau_c = \sigma_{ct} \sqrt{1 + \frac{\sigma_{cpl} + \sigma_{cpl}}{\sigma_{ct}} + \frac{\sigma_{cpl} \cdot \sigma_{cpl}}{\sigma_{ct}^2}} \dots (1)$$

ひびわれモーメントは

$$M_{tpc} = \frac{2J_c}{d} \tau_c \dots (2)$$

式(1) および(2) は単軸プレストレスの場合には Cowan 式に一致するものである。プレストレスが明確である PC くいのひびわれ強度計算値は実験値の 0.90 から 1.05 に近似された。ただし、計算に用いた引張強度は、圧縮強度 950 kg/cm² に対して 1/15, 500 kg/cm² から 600 kg/cm² に対して 1/13 として計算した。単軸プレストレスの場合のひびわれ強度は、プレストレスがコンクリートの引張強度に等しいときに無筋コンクリート強度の約 1.4 倍に、2 倍のプレストレスにしてもその強度は約 1.7 倍にしか増大しない。CPC くいのように二方向プレストレスの場合には、両方向に引張強度に等しいプレストレスが導入されておれば、そのねじり強度は容易に 2 倍になるのである。図一3 はこのようなプレストレスのねじり強度に対する効果を式(1)を用いて示したものである。

5.2 終局強度

図一4 は、本実験に用いたすべてのくいの終局ねじりモーメントを整理したものである。試験くいの配筋は、らせん鉄筋および軸筋の $p \cdot \sigma_{sy}$ の値がらせん鉄筋の方が

表-8 ねじり試験結果および配筋量

配合 (kg/m ³)	養生	記号	プレストレス (kg/cm ²)	軸筋 径-数 (mm-本)	らせん鉄筋		ねじりモーメント		ひびわれ		圧縮強度 (kg/cm ²)
					径-ピッチ※ (mm-mm)	鉄筋比 (%)	ひびわれ M_{tc} (t·m)	終局 M_{tu} (t·m)	角度 (度)	間隔 (cm)	
C=420 E=0	蒸気養生	RC	0	7-6	3-30	0.41	1.00	1.58	48	14	578
		PC-47	47	7-6	3-100	0.12	2.56	1.57	32	(1本)	511
					3-100	0.12	3.48	1.74	30	(1本)	632
					4-30	0.73	3.37	3.01	38	10	
					4-30 4-30	1.54	3.33	3.87	35	6	
	PC-100	100	7-16	3-100	0.12	3.95	2.36	23	(1本)	634	
オートクレープ養生	PC-100	100	7-16	3-100	0.12	4.46	2.58	21	(1本)	956	
C=378 E=42	蒸気養生	CP	0	7-6	3-30	0.41	1.44	1.64	50	16	526
4-30		0.73	1.66	1.90	52	14					
C=420 E=45	蒸気養生	CPC-47	47	7-6	3-50 4-30	1.06	3.27	3.88	—	—	541
					4-30 4-30	1.54	3.80	4.35	45	10	
		CPC-100	100	7-16	4-30 4-30	1.54	4.86	6.75	33	5	530

※ 二段にわたって示した数値のものは二重配筋

小となっているため、くいの終局強度はらせん鉄筋の降伏に支配されると考えられる。したがって横軸にはらせ

ん鉄筋の $p \cdot \sigma_{sy}$ をとって表示した。これより終局強度は補強の大きさに比例するとともに、軸方向のプレストレス量によって影響を受けていることが分る⁴⁾。プレストレスが 47 kg/cm² の場合の終局強度は、100 kg/cm² と 0 kg/cm² の場合の強度のほぼ平均値となっており、プレストレスの大きさと対応している。これはプレストレスが大きい場合ほどひびわれ幅が小となるため、ひびわれ破面の骨材等によるかみ合せが緊密となり、鉄筋のダウエルアクションとともに終局強度の増大に寄与しているものと考えられる。

一部の試験くいにおける鉄筋歪測定結果によると、ひびわれ発生までは歪の値がほとんど増大せず、ひびわれ発生時にそのときのモーメントに抵抗する鉄筋応力まで急増することが認められた。図-5 に模式的に描いたように、鉄筋量が十分であればひびわれ発生後にさらに耐

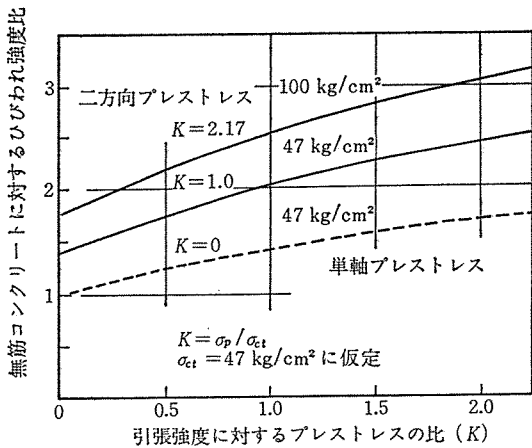


図-3 プレストレスのねじり強度に対する効果

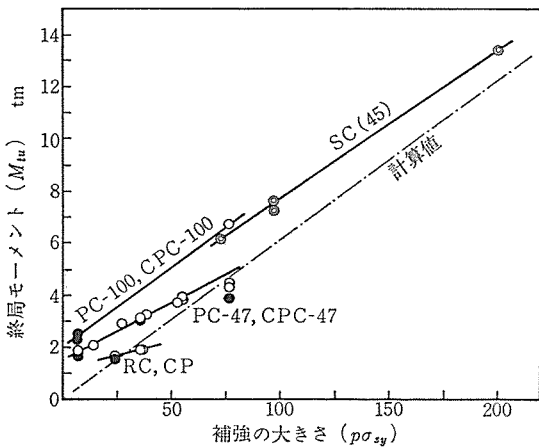


図-4 補強の大きさと終局強度の関係

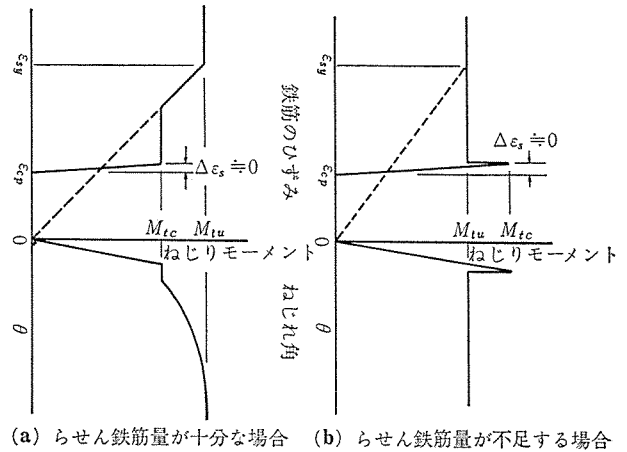


図-5 ねじり強度と鉄筋量の関係

力が增大するが、鉄筋量が不十分であるとひびわれ強度を保持できず耐力が減少しねじれ角が増大する。

5.3 ねじり剛性およびひびわれ

図-6 に示すように、ひびわれ発生前のねじり剛性はくいの種類にかかわらずほぼ一定とみなすことができる。そしてこのねじり剛性は補強材を無視した弾性論による式によって示すことができる。

ねじりによるコンクリートのひびわれ間隔は表-8 に示したように、らせん鉄筋比 0.12% では連続した1本のひびわれが発生し、0.41% では約 15 cm, 1.54% では 5 cm から 10 cm 程度であった。一般にらせん鉄筋量が増大するほどひびわれ間隔は小となり、これはらせん鉄筋がひびわれ発生後の応力分散に寄与しているため

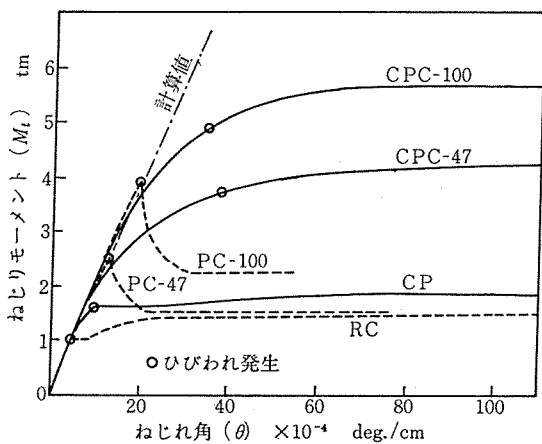


図-6 ねじりモーメントとねじれ角の関係

と考えられる。

ひびわれの角度は、RC くいは約 48 度、PC-47 では 30 度から 38 度、PC-100 では約 22 度となり、主応力度の方向を求める式によってほぼ説明できる。膨張コンクリートを使用したくいでは、CP くいは 50 度から 52 度、CPC-47 では約 45 度、CPC-100 では約 33 度であり、円周方向および軸方向のプレストレスの大きさが推測できる。

5.4 繰返し荷重に対する挙動

軸方向に機械的プレストレスを 47 kg/cm² 導入した CPC くいに、ひびわれ強度の約 70% に相当する 2.60 tm の荷重で一定方向に繰返し載荷したときのねじりモーメントとねじれ角の関係を 図-7 に示した。20 回載荷後のひびわれ強度および終局強度は、それぞれ平均 3.50 tm および 4.44 tm であり、単純載荷の場合との相違は認められなかった。コンクリートの歪測定結果およびねじり剛性等にも異状は認められなかったので、この程度の繰返し荷重によっては部材の強度に特別な影響はないと思われる。ねじり貫入定着する CPC くいは施工時のひびわれに対する安全が保障されなければならないので、施工する際の機械のトルクは、くいのひびわれ強度の 70% 以下で使用するのが適当であろう。

また同種の CPC くいをひびわれ強度の約 70% の荷重で正負方向に 30 回繰返し載荷して地震時の部材強度を検討した。このときのねじりモーメントとねじれ角の関係を 図-8 に示す。ひびわれ強度の約 70% 程度で

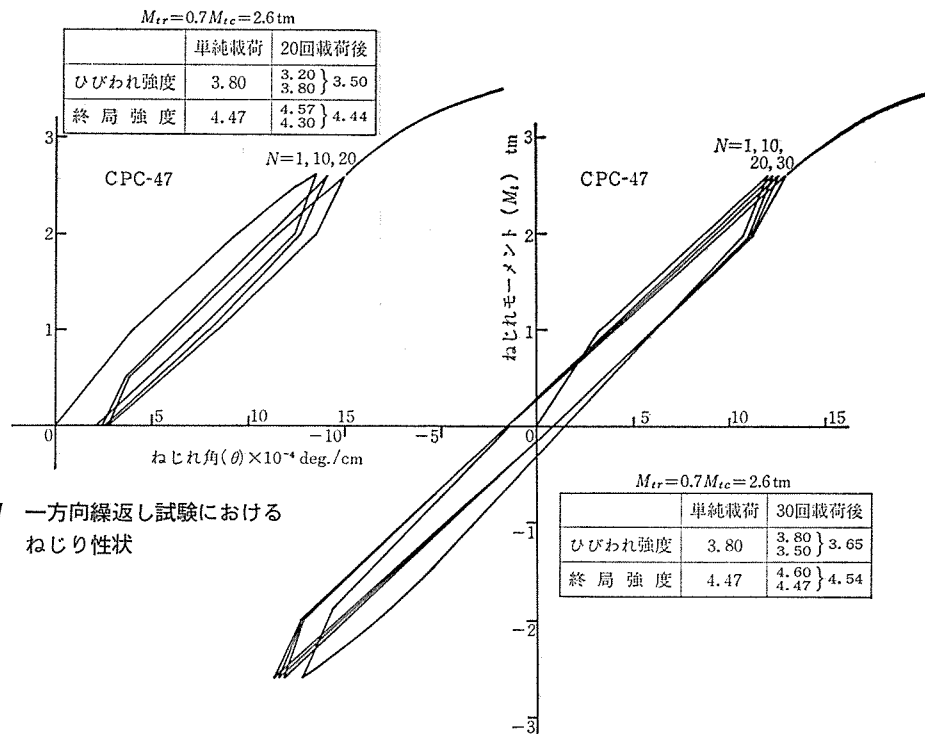


図-7 一方繰返し試験におけるねじり性状

図-8 正負繰返し試験におけるねじり性状

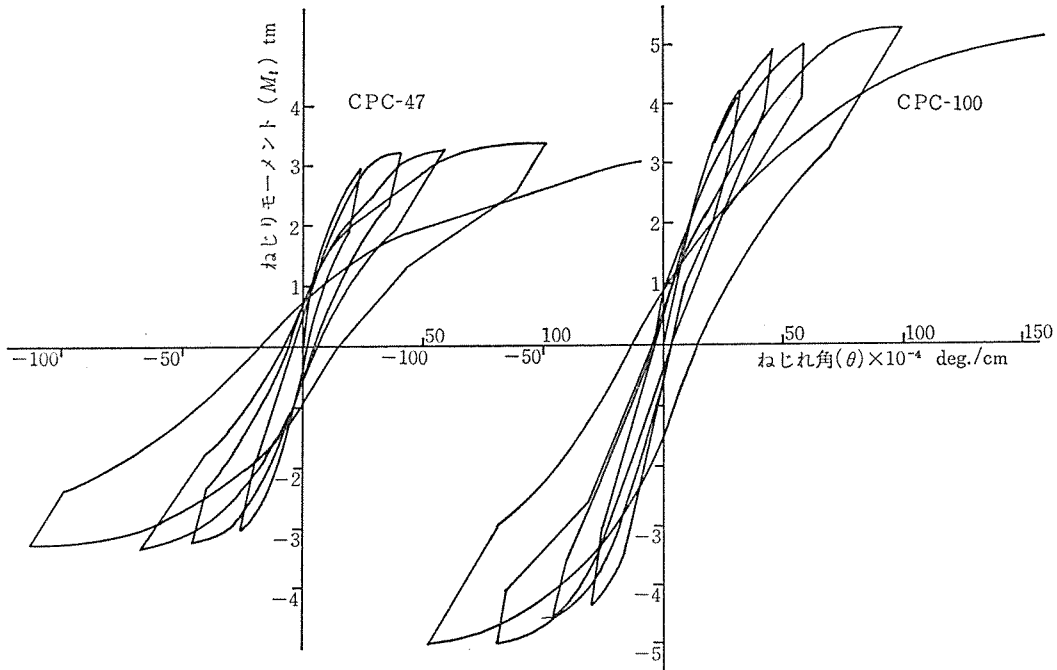


図-9 CPC-47 のねじりモーメントとねじれ角の関係

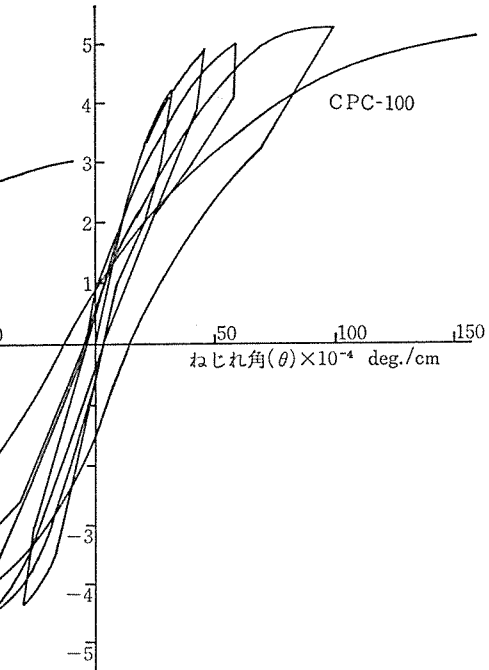


図-10 CPC-100 のねじりモーメントとねじれ角の関係

繰返し荷重が作用しても、CPC くいのねじり性状に特別な影響は認められなかった。

5.5 ひびわれ発生後の耐力

図-9, 10 は軸方向の機械的プレストレスがそれぞれ 47 kg/cm² および 100 kg/cm² 導入された CPC くいを、ひびわれ発生時のねじれ角を基準として、約 1.5, 2 および 4 倍で変形制御により正負方向に繰返し载荷したときのねじりモーメントとねじれ角の関係を示したものである。

これらのくいの終局強度は、CPC-47 が 3.10 tm, CPC-100 が 5.20 tm であった。この値は単純载荷の場合より 25% から 30% 小さくなっている。この原因は図-12 に示すように、正負方向の荷重によってコンクリートが菱形にひびわれし、コンクリートの局部的な圧壊によるものと考えられる。

図-9, 10 から分るようにねじれ角が非常に増大した後に除荷しても残留ねじれ角はきわめて小さく、履歴曲線は S 字形となって復元性が良いことを示している。これは軸方向の PC 鋼線の緊張力によるものと考えられる。復元性を

$$\alpha = (\theta_t - \theta_p) / \theta_t \dots\dots\dots (3)$$

によって整理すると 図-13 のようになる。CPC-47 および CPC-100 とともに、ひびわれ発生時のねじれ角に対する比を基準にすると、ほぼ同程度の復元性を示している。すなわちこれらのくいの復元性は、ひびわれ発生時に約 90%、ひびわれ発生時の 4 倍のねじれ角に達した後も約 85% であった。

履歴曲線のループから、等価粘性減衰定数を

$$\beta = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{W} \dots\dots\dots (4)$$

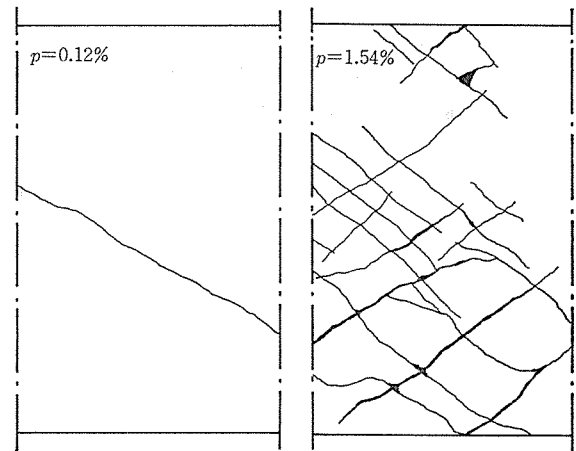


図-11 PC-47, 単純载荷試験ひびわれ展開図

図-12 CPC-47, 正負繰返し载荷試験ひびわれ展開図

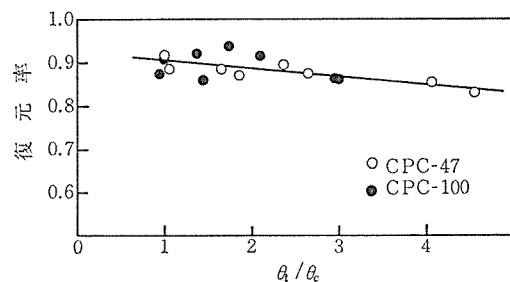


図-13 CPC くいの復元性

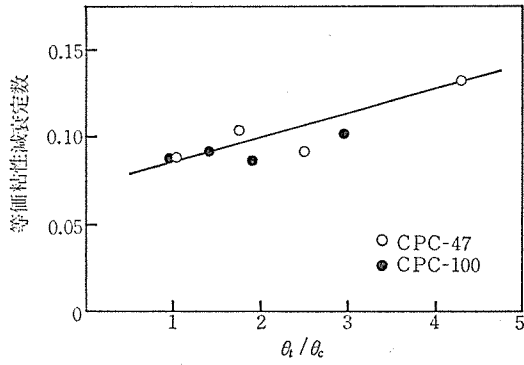


図-14 CPC くい等の等価粘性減衰定数

によって計算した。CPC くい等の等価粘性減衰定数は、図-14 に示すようにプレストレスの大きさによる相違は認められず、ひびわれ発生時に約 0.085、ひびわれ発生時のねじれ角の4倍のとき約 0.125 であった。

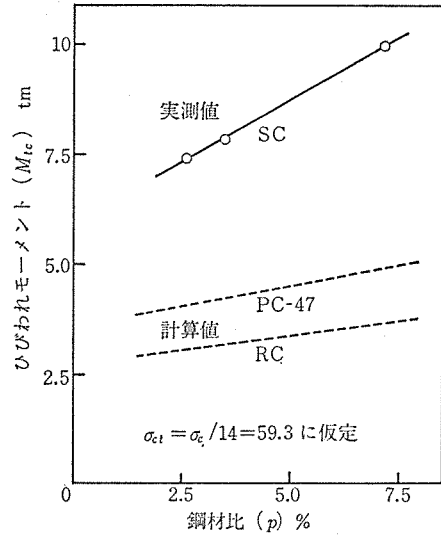


図-15 ひびわれ強度

6. SC くい等のねじり試験結果および考察

表-9 に SC くい等のねじり試験結果を示す。肉厚 1.6 mm の鋼管を使用して、蒸気養生を行ったものと、さらにオートクレープ養生を行ったもののひびわれ強度は、

6.1 ひびわれ強度

表-9 SC くい等のねじり試験結果

配合 (kg/m³)	養生	記号	プレストレス (kg/cm²)	軸筋 径 - 数 (mm-本)	鋼管		ねじりモーメント		圧縮強度 (kg/cm²)
					肉厚 (mm)	鋼材比 (%)	ひびわれ M_{tc} (t·m)	終局 M_{tu} (t·m)	
C=420 E=45	蒸気	—	47	7-6	1.6	3.48	4.50※	7.25	540
	オートクレープ	SC-1.2			1.2	2.59	7.42	6.32	
		SC-1.6			1.6	3.48	8.22	7.45	
		SC-3.2			3.2	7.17	9.98※	13.43	

※ ねじれ角およびひずみ測定結果から決定した。

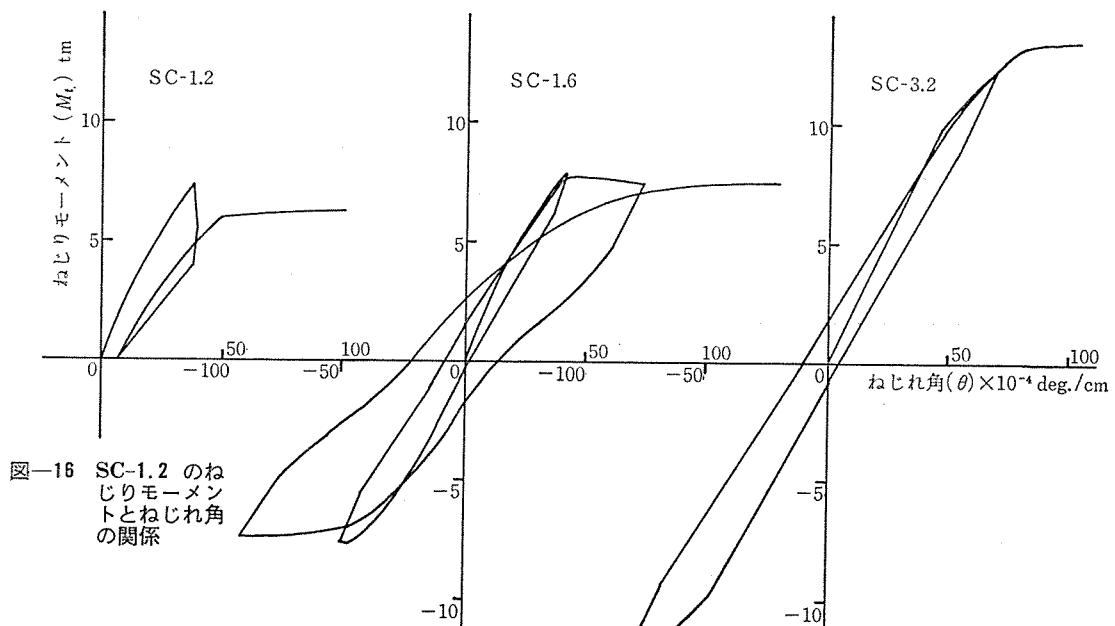


図-16 SC-1.2 のねじりモーメントとねじれ角の関係

図-17 SC-1.6 のねじりモーメントとねじれ角の関係

図-18 SC-3.2 のねじりモーメントとねじれ角の関係

4.50 tm および 8.22 tm であった。肉厚 1.2 mm, および 3.2 mm の鋼管を使用したオートクレーブ養生の SC くいひびわれ強度は、それぞれ 7.42 tm および 9.98 tm であった。

コンクリートの引張強度を圧縮強度の 1/14 と仮定して、同一断面の鋼管を有する RC くいおよび PC くいとしてのねじり強度を計算し、図-15 に示した。本実験結果は、プレストレス 47 kg/cm² の PC くいとしてのひびわれ強度推定値の約 2 倍の強さを示している。膨張コンクリートの拘束が鋼管によって十分に行えるもとの、オートクレーブ養生することによってケミカルプレストレスが大きく導入できた結果であることを示している。

6.2 ケミカルプレストレス

これらの SC くいひびわれ強度の実験結果を基にして、それぞれの試験くいの円周方向と軸方向のプレストレスを計算した。計算は次の 3 条件を仮定して行った。

(1) コンクリートの膨張は等方的であり、膨張の拘束圧とこれに抵抗して膨張する変形量の積が、一定とする^{5),6)}。

$$K = \sigma_{cpv} \cdot \epsilon_{ov} = (\sigma_{cpl} + \sigma_p) \epsilon_{ol} = \text{一定} \dots\dots\dots (5)$$

(2) 鋼管に作用する膨張力(内圧)とコンクリート円筒に作用する膨張圧力(外圧)は等しい。このとき、コンクリートを厚肉円筒、鋼管を薄肉円筒とすれば、

$$\sigma_{sv} = \epsilon_{ov} \cdot E_s = -\frac{r_m}{t_s} \frac{b^2 - a^2}{a^2 + b^2} \sigma_{cpv} = -k \cdot \sigma_{cpv} \dots\dots\dots (6)$$

ただし $k = \frac{r_m}{t_s} \frac{b^2 - a^2}{a^2 + b^2}$

(3) 軸方向の膨張力の釣合は

$$0 = \sigma_{sl}(p + p')A_c + \sigma_{cpl}A_c \dots\dots\dots (7)$$

ただし $\sigma_{sl} = \epsilon_{ol} \cdot E_s, p + p' = p_0$

式 (5), (6), (7), および (1) を用いると

$$X \left[X \left\{ \frac{1}{p_0 k} \sigma_{cpl}(X - \sigma_{ct}) - \sigma_{ct}^2 \right\} + 2 \tau_c^2 \sigma_{ct} \right] = \tau_c^4 \dots\dots\dots (8)$$

ただし $X = \sigma_{cpl} + \sigma_p + \sigma_{ct}$

これは、 τ_c をひびわれモーメントより弾性論によって求め、 σ_{cpl} を仮定することにより図式的に左辺と右辺の値が等しい点として、 σ_{cpl} の解を得ることができる。円周方向のケミカルプレストレスは式 (1) より、

$$\sigma_{cpv} = \frac{\tau_c^2}{X} - \sigma_{ct} \dots\dots\dots (9)$$

によって求めることができる。

表-10 は以上に示した計算式によって得られたケミカルプレストレスと鋼管の拘束応力である。肉厚 1.2 mm の鋼管は、コンクリートの膨張によって降伏したと

表-10 膨張による応力計算結果

記号	鋼材比 (%)	ケミカルプレストレス (kg/cm ²)		鋼管応力度 (kg/cm ²)	
		円周方向 σ_{cpv}	軸方向 σ_{cpl}	円周方向 σ_{sv}	軸方向 σ_{sl}
SC-1.2	2.59	(58.2)	57.0	$\epsilon_{sv} = 1.573 \times 10^{-3} > \epsilon_{sy}$	1827
SC-1.6	3.48	59.1	57.1	2501	1420
SC-3.2	7.17	69.5	69.8	1435	903

思われる。ケミカルプレストレスは、円周および軸方向ともに同程度の値であり、鋼材比に応じて 55 kg/cm² から 70 kg/cm² に推定された。

6.3 終局強度およびねじり剛性

SC くいの終局強度は図-4 にしたように補強の大きさに比例している。鋼管の肉厚 1.2 mm の場合にはくいの終局強度はひびわれ強度より減少しており、1.6 mm の場合には終局とひびわれとがほぼ等しく、3.2 mm の場合にはコンクリートのひびわれから終局強度までの耐力の増大が著しい。

パイルメント等に使用するくいは、構造物の安全性のためひびわれから終局に至る耐力の増大が必要と考えられる。

SC くいのねじりモーメントとねじれ角の関係は、ひびわれ発生まで直線的である。ねじり剛性は鋼管とコンクリートとが完全に一体化しているものとして次のように導くことができる。

$$M_t = \int_{d/2}^{D/2} G_s \theta r^2 \cdot 2 \pi r dr + \int_{d'/2}^{d/2} G_c \theta r^2 \cdot 2 \pi r dr = \frac{\pi}{32} [G_s(D^4 - d^4) + G_c(d^4 - d'^4)] \cdot \theta \dots\dots (10)$$

ひびわれ発生後のねじり抵抗は、鋼管のねじり剛性によると考えられるので、鋼管を薄肉円筒と考えると、

$$M_t = 2 A_m r_m t_s G_s \cdot \theta \dots\dots\dots (11)$$

式 (10) を実験結果に適用すると、コンクリートのせん断弾性係数は約 1.38×10^5 kg/cm² となる。肉厚 3.2 mm の SC くいひびわれ発生後のねじり剛性は、測定値より 65.3×10^8 kg·cm²/rad であり、鋼管単体のねじり剛性の計算値 52.0×10^8 kg·cm²/rad より大となっている。これはひびわれ後のコンクリートでも多小ねじり剛性に寄与しているものと考えられる。このくいのひびわれ後のねじり剛性は、ひびわれ前の約 0.4 に低下している。

6.4 復元性および等価粘性減衰定数

SC くいの復元性をひびわれ発生時のねじれ角に対する比によって整理したものを図-19 に示す。これから分かるように SC くいの復元性は、ひびわれ発生時の 3 倍のねじれ角まで変形したとき約 60% となる。そして鋼管の肉厚の大きなくいほど復元性が良好である。

等価粘性減衰定数の計算結果を図-20 に示す。肉厚

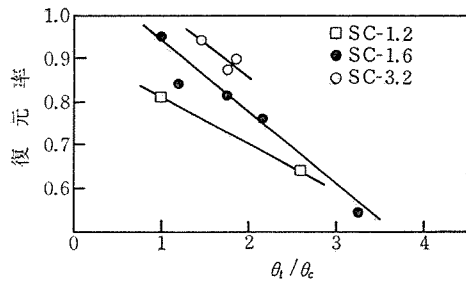


図-19 SC くい の復元性

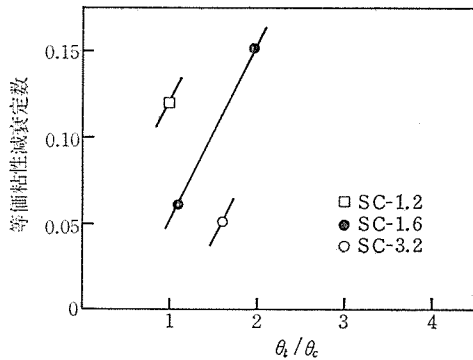


図-20 SC くい の等価粘性減衰定数

1.6 mm の SC くいの場合、ひびわれ発生時の2倍のねじれ角において等価粘性減衰定数は、ひびわれ時の約3倍となっている。CPC くいの場合に比較して値が急激に増大しているようである。このことは、SC くい が構造用部材としてのエネルギー吸収能力が大であることを示し、地震時における破壊に対してねばりのある部材であるといえる。

6.5 SC くい の設計

本実験における SC くい は、外径 300 mm で鋼管の肉厚を3種類に変化させたものである。これらの実験結果を基にして異なる外径のくいのひびわれ強度、終局強度および必要とされる鋼管の肉厚を算定した。ただし、コンクリートの配合、締固め、養生およびプレストレスの導入等の条件は本実験と同一条件とする。したがって、コンクリートの圧縮強度は約 800 kg/cm²、鋼管の品質は SS 41 を使用するものとし、軸方向の機械的なプレストレスは 45 kg/cm² として計算した。ケミカルプレストレスはくいの断面が変化しても鋼材比に応じて一定値とし、終局強度に対するプレストレスの効果は安全のため無視するものとした。くいの断面寸法は JIS A5335 に示されている値および市販品を参考とした。

SC 杭 の設計図表

- 条件 1. 配合; W/C=0.37, C=420kg/m³ E=45kg/m³
- 2. 養生; 蒸気養生 → オートクレープ養生
- 3. プレストレス; $\sigma_p = 45\text{kg/cm}^2$
- 4. コンクリート強度; $\sigma_c = 800\text{kg/cm}^2$
- 5. 鋼管; SS 41

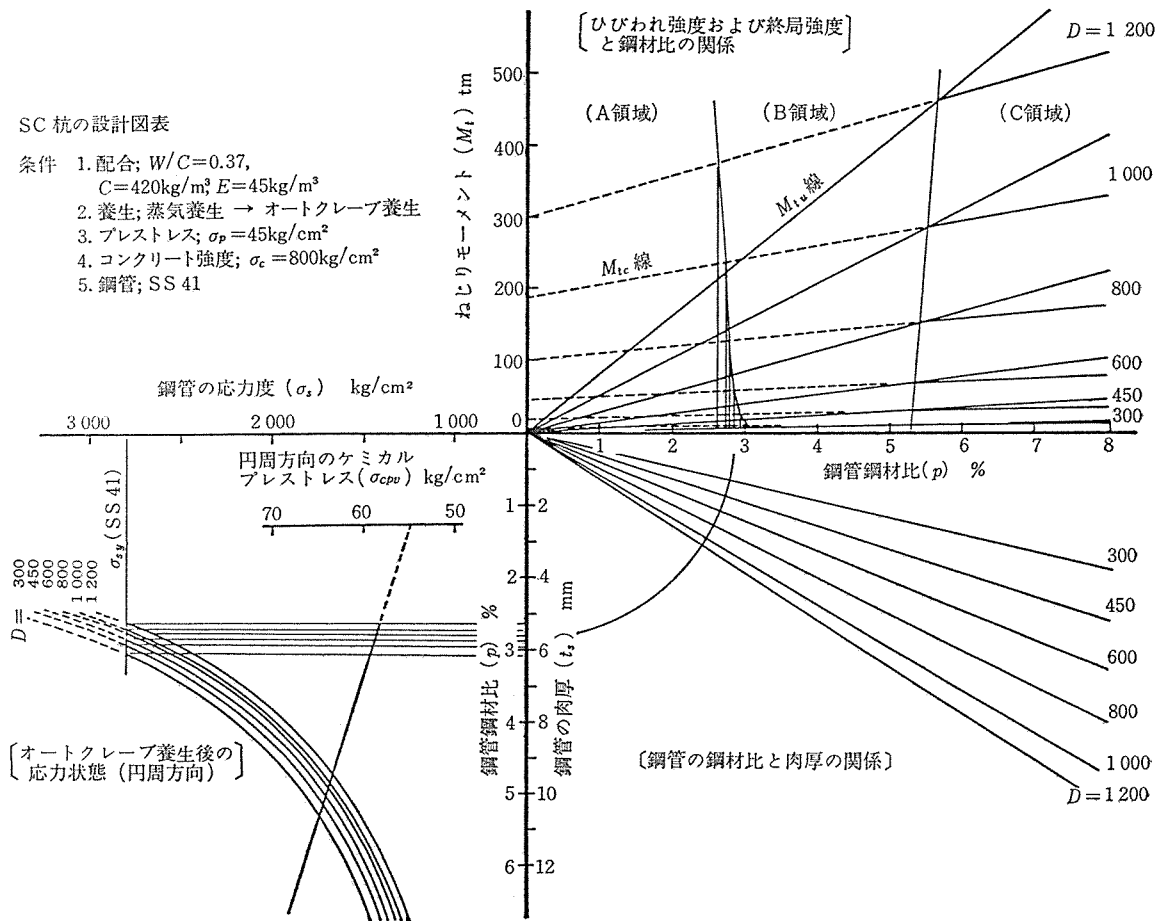


図-21 SC くい の設計図表

ケミカルプレストレスが断面寸法にかかわらず鋼材比に応じて一定とし、本実験結果を基にするとそれぞれのくいの外径に対して養生中の鋼管応力度が求められる。このとき使用鋼材の降伏点によって、鋼材比の下限が存在する。円周方向および軸方向のプレストレスが鋼材比に応じて一定値であると仮定している ので式 (1) によってひびわれ強度が、使用鋼管の降伏点より終局強度が決定される。JIS の規定により、くい外径に対するコンクリートの壁厚が決まっているものとする、鋼材比に応じて所要の鋼管の肉厚が決定される。これらを整理して図-21 に SC くいの設計図表として示した。図中の M_{te} 線はひびわれ強度、 M_{tu} 線は終局強度を示している。A 領域はコンクリートの膨張による鋼管の降伏に支配される範囲であり、鋼材比が約 3% 以下では SC くいの製造は危険である。B 領域は終局強度よりひびわれ強度の方が大きく、鋼材比が約 3% より 5.5% ではコンクリートのひびわれ後に耐力が減少し構造部材として安全なものとはいえないと思われる。鋼材比が約 5.5% 以上となっている C 領域は、コンクリートのひびわれ後にも鋼管によって耐力が増大する。実用に供するくいとしては所要の耐力に合致するくいの断面寸法を鋼材比 5.5% 以上の領域より選定し、復元性等も考慮してさらに腐食代として 2mm 程度を余分に見込んだ鋼管を使用する必要があると考えられる。

7. 結 語

外径 300 mm のプレキャストコンクリートくいに膨張コンクリートによるケミカルプレストレスと機械的な軸方向のプレストレスを併用してくいのねじり抵抗を増大させる実験を行った。そして膨張コンクリートを使用したくいの製造方法、ねじり耐力に対するプレストレスの効果、繰返し荷重に対する挙動等について検討した。

本実験の範囲において次のことが明らかとなった。

1. 膨張コンクリートを使用してくいを製造する場合にケミカルプレストレスを十分に発現させるためには、型枠によるコンクリートの拘束を除去し、膨張の拘束はコンクリート内部の配筋によらなければならない。そしてらせん鉄筋量を増大するとともにできるだけ外側に配置することが望ましい。

2. CP くいのらせん鉄筋比を 0.73% としたときのひびわれ強度は 1.66 tm であった。軸方向に機械的なプレストレスを 47 kg/cm² および 100 kg/cm² 導入した CPC くいのひびわれ強度は、それぞれ 3.80 tm および 4.86 tm であり、通常の PC くいのひびわれ強度より 20% から 40% 程度の増大が見込まれた。

3. ねじりを受ける部材のひびわれ強度は、最大主応力に支配されるとして導いた式 (1) および (2) によって推定できると思われる。プレストレス量が判明している PC くいの本式による計算値は実測値の 0.90 から 1.05 に近似された。

4. くいの終局強度は、らせん鉄筋比あるいは鋼管の鋼材比に比例する。そして鉄筋比が同一であってもプレストレスの大きなものほど終局強度が大である。

5. PC および CPC くい等のひびわれ前のねじり剛性は鉄筋量にかかわらずほぼ一定の値であり、鉄筋を無視した弾性論によるねじり剛性式で示すことができる。

6. コンクリートのひびわれ間隔は、ひびわれ後の応力を分散させるらせん鉄筋の量によって異なり、鉄筋比 0.4% 程度では約 15 cm、1.5% 程度では 5 cm から 10 cm であった。

7. CPC くいをひびわれ強度の約 70% の荷重で一方向に 20 回、あるいは正負方向に各 30 回繰返し載荷した場合のねじり挙動および繰返し載荷後の強度には特別な変化は認められなかった。またひびわれ発生時、その 1.5 倍、2 倍および 4 倍のねじれ角で正負に載荷した後の終局強度は、コンクリートの局部的な圧壊のために単純載荷の場合の約 70% から 80% に低下した。

8. CPC くいの繰返し載荷における履歴曲線は S 字形となり、復元性は非常に大きく、ひびわれ時の 4 倍のねじれ角に変形した後でも約 85% であった。また等価粘性減衰定数は、プレストレスの大きさにかかわらず、ひびわれ時の 4 倍のねじれ角において 0.125 であった。

9. 肉厚 1.6 mm の鋼管を使用してオートクレーブ養生した SC くいのひびわれ強度は、蒸気養生だけのときの約 1.9 倍となった。肉厚 3.2 mm の SC くいは、ひびわれ強度 9.98 tm、終局強度 13.43 tm であり、これは通常の A 種の PC くいのひびわれ強度および終局強度のそれぞれ約 3 倍および 8 倍である。

10. SC くいのひびわれ発生前のねじり剛性は、弾性論により導いた式 (10) により、またひびわれ後のねじり剛性は、鋼管のねじり剛性を示す式 (11) によって示すことができる。鋼管の肉厚 3.2 mm の場合、ひびわれ後の剛性はひびわれ発生前の約 0.4 に低下した。

11. 肉厚 3.2 mm の鋼管を使用した SC くいの復元性は、ひびわれ時にはほぼ完全に復元すると思われるが、ひびわれ時の 2 倍のねじれ角に達した後では約 85% であった。また等価粘性減衰定数は、ひびわれ時の 2 倍のねじれ角において約 0.1 であった。

12. 本実験における製造条件で SC くいを製造する場合、鋼管の鋼材比約 3% 以下においてはオートクレーブ養生中に鋼管が降伏する危険があり、約 3% から 5.5

%ではひびわれ後にねじり抵抗が低下する。したがって
 実用に供する SC くい、鋼材比 5.5% 以上とし、さら
 に復元性および腐食代を考慮して鋼管の肉厚を決定す
 る必要がある。

謝辞 本実験を行うにあたり、都立大学土木材料実験
 室の越川（現在、日大）、富田、中村（現在、山口組）、
 鈴木、川崎、竹田の各氏にはねじり試験に多大の協力を
 いただいた。また試験くいの製造にあたっては、日本コ
 ンクリート工業（株）技術開発部の伊東、小林の諸氏を
 はじめとする多くの方々の協力を得たことを記し、深く
 感謝の意を表する次第である。

記 号

- M_t ; ねじりモーメント
- M_{tpc} ; プレストレストコンクリートのひびわれモ
 ーメント
- τ_c ; ひびわれ発生時のねじりせん断応力度
- σ_{ct} ; コンクリートの引張強度
- $\sigma_{cpv}, \sigma_{cpl}$; 円周方向および軸方向のケミカルプレスト
 レス
- $\epsilon_{ov}, \epsilon_{ol}$; 円周方向および軸方向の膨張率
- σ_{sv}, σ_{sl} ; 膨張による円周方向および軸方向の鋼材応
 力度
- σ_p ; 軸方向の機械的プレストレス
- θ_t, θ_p ; ねじれ角および残留ねじれ角
- J_c ; 補強材を無視した断面の二次極モーメント

- A_c ; コンクリートの断面積
- A_m ; 鋼管のかこむ面積 ($=\pi r_m^2$)
- t_s ; 鋼管の肉厚
- D ; 鋼管の外径
- d, d' ; コンクリートの外径 ($=2b$) および内径
 ($=2a$)
- p, p' ; PC 鋼線および鋼管の鋼材比
- α ; 復元率
- β ; 等価粘性減衰定数
- ΔW ; 履歴曲線のループの面積
- W ; 位置エネルギー

参 考 文 献

- 1) PC くい技術委員会パイルベント小委員会：PC 杭のねじ
 り耐力に関する実験、プレストレストコンクリート、Vol.
 16 No. 5, 10. 1974
- 2) 越川、国府：セルフアンカーによるコンクリートの曲げ
 強度試験方法、セメント技術年報、昭和 51 年 (1976)
- 3) Murata, Okuyama, Kokubu : Studies on Prestressed
 Concrete Pile with High Torsional Strength, IABSE, 10 th Congress, Preliminary Report, 9.
 1976
- 4) 泉 満明：軽量コンクリートを使用した PC 部材のねじ
 り実験、プレストレストコンクリート、Vol. 16 No. 5,
 10. 1974
- 5) 村田、国府、奥山：ねじり抵抗くいの研究、セメント技
 術年報、昭和 50 年 (1975)
- 6) 国府勝郎：膨張コンクリートと鉄筋との複合効果に関す
 る研究、土木学会第 30 回年次学術講演会講演概要集、
 10. 1975

1978 年版 FIP Notes 購読予約受付について

1977 年版は入手部数の関係上、折角のお申込みに対し一部会員の方々にはお断り申し上げ
 大変失礼いたしました。1978 年版につきましては FIP 本部から若干の増量発送が認められま
 したので、この機会にお早目に下記要領にてお申し込み下さい。予約価格は前年度と変わりませ
 ん。

- 1) 内 容：ロンドンに事務局を置く FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte の略) は、
 PC 技術普及発展のため国際交流機関で、その組織下にある各種委員会の活動状況や世界各国の技術水準を
 知るにふさわしい工事写真、報告、論文等が掲載されている。
- 2) 発 行：隔月刊 (年 6 回)
- 3) 体 裁：A 4 判の英文、頁数 12~16 (不含表紙)
- 4) 価 格：年間 (6 冊分) 3 600 円 (送料手数料共)
- 5) 申 込：希望者は「ハガキ」に必要な部数、送付先 (〒)、氏名、所属会社名記入のうえ協会事務局 (電
 03-261-9151) へ、送金は三井銀行銀座支店 (普通預金) 920-790。なお、部数に制限がありますのでお早目
 にどうぞ。