

コンクリートにおけるケミカルプレストレスの 利用に関する基礎研究

FUNDAMENTAL STUDY ON THE USE OF CHEMICAL PRESTRESS IN CONCRETE

辻 幸 和*
By Yukikazu TSUJI

1. 序 論

膨張混和材あるいは膨張セメントを用いてコンクリート構造物のひびわれを防止する試みは、現在、地下壁、屋根スラブおよび水槽などに実用され、良好な成果が得られている。しかしながら、膨張混和材あるいは膨張セメントをケミカルプレッシングを目的として利用する試みは、ヒューム管などの一部工場製品を除いてほとんど実用されていない^{1)~3)}。機械的なプレストレスと比較して、利用できるケミカルプレストレスの量はまだ小さいが、鉄筋コンクリート構造物などにこのケミカルプレストレスを利用すれば、その力学的特性を著しく改善でき、構造物の使用性状の向上あるいは軽量化が可能となり、ひいては、経済化の実もあがるものと思われる。しかしながら、現場打ちコンクリートも含めて、各種の鉄筋コンクリート構造物にケミカルプレストレスを利用するためには解決すべき問題点も多いのである。

第 1 の問題点は構造物にいくらのケミカルプレストレスが導入されるかを推定することである。鉄筋などの拘束鋼材を断面对称、一軸方向に配置した場合に導入されるケミカルプレストレスについては、これまで、自由膨張ひずみに基づいた推定方法^{4),5)}などが提案されているものの、計算に必要な膨張コンクリートの弾性係数およびクリープ係数などが明らかにされない限り、推定の精度は劣るようである。また一般の部材のように、鋼材を断面非対称に配置した場合に一軸方向に導入されるケミカルプレストレス、および多軸方向に導入されるケミカルプレストレスの推定方法についての研究は、ほとんど公表されていない現状である。任意の拘束状態におけるケミカルプレストレスを精度良く推定する方法をまず確立する必要がある。

ケミカルプレストレスを導入した部材の力学的特性を解明することが第 2 の問題点としてあげられる。ケミカルプレストレスを導入して部材の曲げひびわれ特性を改善する試みは、実用化を目標として、これまで活発に研究されてきた⁶⁾。そして、これらの研究の成果から、ケミカルプレストレスを応用したヒューム管などが開発され、年々生産高も増加の一途をたどっている。しかし、現在実用化されている工場製品は、実物大試験の結果、実用上支障のないように製作されてはいるものの、ケミカルプレストレスをさらに合理的に利用するためには、曲げひびわれ特性に及ぼすケミカルプレッシングの効果を詳細に検討する必要がある。また、曲げひびわれ特性のみならず、ケミカルプレストレスを導入することにより、部材の斜めひびわれ特性などの力学的特性も改善できる可能性があるが、これらの点についてはほとんど研究されていない現状であって、ケミカルプレストレスを導入した部材の優れた力学的特性を定量的に解明する必要がある。

本文はケミカルプレストレスの利用における前記の問題点を解明するため、著者が東京大学大学院在学中に、工学部土木教室で行った実験結果をとりまとめたものである。すなわち、拘束鋼材の量および配置方法が異なる一軸拘束供試体、ならびに床版などの膨張量の測定結果から、“単位体積あたりの膨張コンクリートが拘束鋼材に対してなす仕事量”の概念を基礎にした一軸拘束状態におけるケミカルプレストレスの推定方法を提案するとともに、この方法を多軸拘束にも適用する場合についての見解を示した。さらに、膨張混和材を用いた鉄筋コンクリート部材の曲げ試験結果などから、曲げモーメントおよびせん断力を受けるこの種部材の力学的特性を提示するとともに、ケミカルプレストレスの効果について論じ、ケミカルプレストレスを実際の鉄筋コンクリート構造物に合理的に利用するための基礎を築こうとしたもので

* 正会員 工博 足利工業大学助教授 土木工学科

ある。

本研究は東京大学審査学位論文を要約したものであって、その実施にあたっては、終始懇切なるご指導、ご鞭撻を賜りました国分正胤先生、数多くの適切なご助言とご示唆とを頂きました岡村 甫先生に謹んで厚くお礼申し上げます。また、東京大学大学院在学中には先輩諸兄をはじめ、数多くの方々には有益なご助言と激励を頂きました。そして、実験の実施にあたっては、高橋正泰、鈴木正治、榎本松司各職員をはじめとする東京大学土木教室コンクリート研究室の諸氏、電気化学工業(株)の木下 旭、町山延昭、木田 勉、戸松春夫諸氏および日曹マスタービルダース(株)の佐藤敬司、宮崎祐三両氏など多くの方々には多大なるご援助を頂きました。ここに謹んで厚くお礼申し上げます。

2. 使用材料および試験方法

(1) 使用材料および配合

試験に用いた膨張混和材は3種類であって、いずれも現在わが国で市販されているものである。化学成分、比重および粉末度の一例は表-1に示すようであった。

セメントは大部分日本セメント(株)製の早強ポルトランドセメントを用いたが、水和反応速度を変えるため、普通ポルトランドセメントおよび超早強ポルトランドセメントも用いた。また、骨材は富士川産の良質な川砂、川砂利を用い、比重はそれぞれ2.62および2.66程度のもの、粗粒率はそれぞれ3.03および6.93(最大寸法25mm)程度のものであった。

鉄筋はJIS G 3112 鉄筋コンクリート用棒鋼に適合している市販品のうち、主として公称直径が10mmから32mmの異形鉄筋を用いたが、スターラップには直径が6mmおよび9mmの丸鋼も使用した。PC鋼棒は

JIS G 3109 PC鋼棒のC種1号に適合する呼び名9.2mmから23mmのものを用いた。

表-1 膨張混和材の試験成績

膨張混和材	化 学 成 分 (%)								比表面積 (cm ² /gr)	比 重
	Igloss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Total		
A	1.0	4.0	10.0	1.2	52.5	0.6	28.3	99.0	2280	2.93
B	0.6	1.3	7.2	0.4	59.7	0.6	30.2	100.0	2250	3.04
C	0.4	13.1	2.9	2.0	76.9	1.1	3.0	99.4	2050	3.21

拘束の程度がケミカルプレストレスに及ぼす影響を検討するため、表-2に示す範囲内において、セメントおよび膨張混和材の種類、単位セメント膨張混和材量、単位膨張混和材量、単位水量ならびに養生方法などを相違させた約50種類の膨張コンクリートを用いた。拘束の方法が異なる場合の仕事量、および部材の力学的特性を検討する場合に用いたコンクリートの配合は表-3に示すようであって、膨張混和材はコンクリートの収縮を補償する目的の場合に比べて、約1.5倍から2.0倍程度使用した。これらの配合は、表-2に示す範囲内から試験の結果、ケミカルプレストレスを導入するのに適当と判断したものである。なお、膨張混和材はA一種類に限ったが、他の膨張混和材を用いても、ケミカルプレストレス

表-2 拘束程度とケミカルプレストレスとの関係を試験したコンクリートの配合および養生方法

膨張混和材の種類	A, B, C	
膨張混和材量	置 換 率	0.09~0.20
	単 位 量	40.5 kg/m ³ ~90kg/m ³
セメントの種類	普通, 早強, 超早強各ポルトランドセメント	
水、セメント膨張混和材比	0.385~0.55	
単位セメント膨張混和材量	300 kg/m ³ ~450 kg/m ³	
空気量	1.5%~4.4% ポゾリス No. 5L ツイゾール	
養 生	20℃水中および 20℃ 100% RH	

表-3 部材および拘束の方法が異なる場合の仕事量に用いたコンクリートの配合

用 途	水、セメント膨張混和材比 (%)	膨張混和材の置換え率 (%)	単位水量 W (kg/m ³)	単位セメント量 C (kg/m ³)	単位膨張混和材量 M (kg/m ³)	細骨材率 (%)	セメントの種類	減 水 剤	スランプ (cm)	空 気 量 (%)
A, B, D シリーズ, 一軸*	38.5	0	173	450	0	36	早 強	—	3.0~5.5	1.5~1.6
		15		382.5	67.5			—	3.0~5.5	1.5~1.6
Cシリーズ	55	0	165	300	0	42	普 通	—	5.0~7.0	1.5~1.6
		15		255	45			—	5.0~6.5	1.5~1.6
Eシリーズ	45	0	180	400	0	37	早 強	—	7.5	1.5
		15		340	60			—	7.3	1.5
F, G シリーズ版	38.5	0	173	450	0	36	早 強	ポゾリス No. 5L 単位セメント膨張混和材量の0.25%	9.5	3.3
		13		391.5	58.5				8.7	3.3
		15		382.5	67.5				9.0~12.5	3.5~3.7
版	45	15	177	335.1	59.1	40	普 通	—	10.3	1.5

* 表-4に示す一軸拘束供試体を参照のこと

が部材に及ぼす効果はほぼ同等であると考えられる。

(2) 試験方法

拘束の程度とケミカルプレストレスとの関係を試験する方法は、図-1 に示すような端板と PC 鋼棒とを溶接した溶接定着一軸拘束装置を用い、PC 鋼棒の太さを変えることにより、拘束の程度を拘束鋼材比にして 0.667% から 4.22% の範囲で 4 種に変化した。一軸拘束装置としては、これまで PC 鋼棒をナットでとめる方法がよく用いられてきたが、ナット部の遊びおよびなじみが測定値に大きな影響を及ぼすことが明らかになったため⁷⁾この部分を溶接により固定する方法を考案した⁸⁾。PC 鋼棒の膨張ひずみはダイヤルゲージ法により求めることにした。なおこの方法は拘束膨張量測定の詳細試験方法にもなり得るものと考えられる。

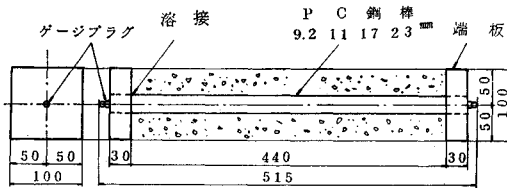


図-1 溶接による定着一軸拘束装置

拘束鋼材の断面重心がコンクリートの断面図心と異なる場合に導入されるケミカルプレストレスを試験した供試体は、表-4 に示すような断面寸法および鉄筋を配置した部材である。多軸拘束としては、図-2 に示すような鉄筋コンクリート床版を作製し、各方向に配置する異形鉄筋の径を D 10 mm から D 16 mm に、またその本

表-4 鋼材の配置方法が異なる場合の仕事を果たした供試体の断面諸元等

供試体名	b (cm)	h (cm)	A_{s1} (cm ²)	A_{s2} (cm ²)	A_{s3} (cm ²)	d_1 (cm)	d_2 (cm)	d_3 (cm)	供試体の長さ (cm)
A	10	20	3.97	3.97	0	5	15	—	120
B	10	20	1.43	3.97	0	5	15	—	120
C	10	40	1.43	3.97	0	10	30	—	210
D	10	20	0	3.97	0	0	16	—	180
E	10	20	3.97	3.97	0	4	16	—	180
F	10	20	1.43	3.97	0	4	16	—	120
G	10	30	1.27	7.94	0	5	25	—	150
H	10	30	1.27	7.94	1.27	5	25	15	150
I	10	30	2.87	7.94	1.27	5	25	15	150
J	10	30	5.07	7.94	1.27	5	25	15	150

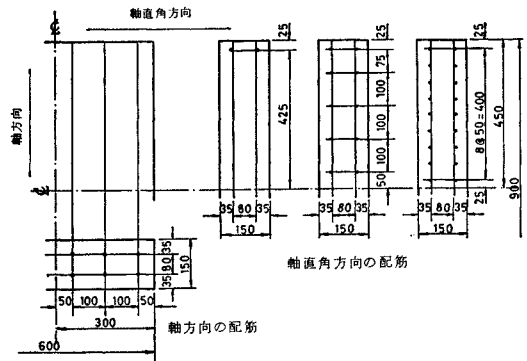
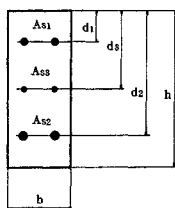


図-2 二軸拘束供試体(スラブ)の断面寸法および鉄筋配置の一例

数を変えることにより、拘束の方法とその程度を変化させた。

部材の力学的特性を試験した供試体の断面寸法などは図-3 に示すように、いずれも断面对称に鉄筋を配置した複鉄筋矩形ばりである。これは断面に一樣なケミカルプレストレスを導入させ、部材の基本的な力学的特性を検討するためである。斜めひびわれ特性に及ぼすケミカルプレストレスの効果は、せん断破壊形式によって異なることも考えられたので、せん断スパンと部材の有効高さとの比 a/d を 1.67 から 4.5 に変化させた。腹鉄筋としては、 $\phi 6$ mm および $\phi 9$ mm の丸鋼、あるいは D 10 mm の異形鉄筋のスターラップを所定の間隔で配置した(表-5 参照)。また図-3 の A および G シリーズには、鉄筋の両端におじ切り加工を施し、プレテンション方式により機械的にプレストレスを導入したものもある。

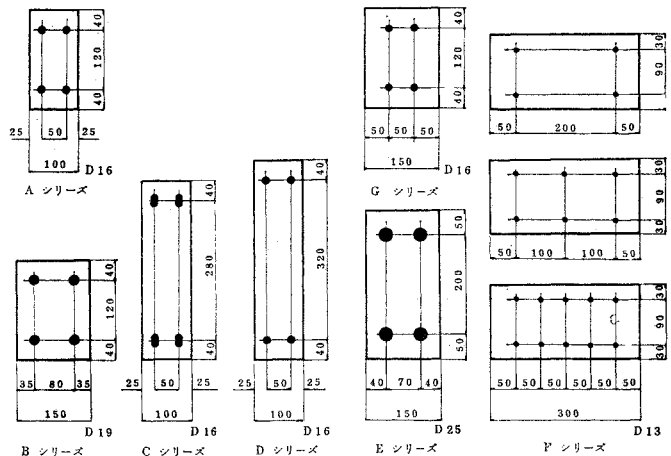
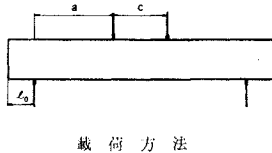
図-1 の溶接定着一軸拘束供試体を除き、部材に生じた膨張ひずみは、大部分、部材中央部の鉄筋の表面にあらかじめ貼ったワイヤストレインゲージのコンクリート打込み前からのひずみを、固定抵抗法によって測定したが、このひずみはコンタクト型ひずみ計によって測定した鉄筋位置のコンクリートの膨張ひずみとほぼ等しいひずみ増加を示し、この方法によって測定した鉄筋の膨張ひずみの値は信頼できるものと信じている。

拘束の程度がケミカルプレストレスに及ぼす影響を試験した場合を除いて、大部分の供試体は脱枠後 20°C の水中養生を行った。また、部材の力学的特性を試験した大部分の供試体は、ケミカルプレストレスの増加、すなわち、鉄筋の膨張ひずみの増加がほとんど終了するまで水中養生を行い、試験の 1 日から 2 日前に水中より取出して実験室内に放置した後載荷試験を行った。導入されるケミカルプレストレスは養生方法によって著しく異なるが、水中養生以外の養生方法をほとんど採らなかったのは、本研究の目的から、ケミカルプレストレスを効果的に導入でき、管理も容易である、水中養生を行った場合

表—5 部材の載荷方法および強度試験結果

シリーズ名	$\frac{a}{d}$	a (cm)	c (cm)	l_0 (cm)	ケミカルプレストレス (kg/cm ²)		曲げひびわれ応力度 (kg/cm ²)	斜めひびわれ発生時のせん断応力度 (kg/cm ²)	破壊時のせん断応力度 (kg/cm ²)	破壊型式 ⁺⁺⁺	試験材令 (日)
					軸方向	鉛直方向					
A	3.5	56	26	21	18.3*	0	40.4	15.6	24.7	SC	7
					36.7*	0	71.1	18.8	24.3	SC	7
					50.4*	0	97.0	22.3	24.6	SC	7
					51.8	0	119.6	20.3	28.7	SC	14
					56.0	10.0**	126.0	28.1	35.4	F	14
					54.3	22.6***	129.3	31.3	36.5	F	14
					-18.4	0	24.2	14.1	23.9	SC	28****
					13.3	0	56.6	18.7	28.7	SC	55****
					-20.0	0	16.2	13.8	21.3	SC	115****
					10.0	0	61.4	17.2	21.4	SC	115****
B	2.0	32	26	30	0	0	41.7	18.7	44.9	F	14
					27.8	0	77.0	30.2	46.9	F	14
	3.5	56	0	19	0	0	56.1	14.6	19.8	SC	14
					21.1	0	89.8	19.8	28.1	F	14
4.5	72	26	20	0	0	50.5	12.5	17.9	DT	14	
				29.3	0	93.8	17.7	19.8	F	14	
3.5	56	0	19	0	0****	56.1	14.6	31.0	F	14	
				26.1	4.3****	101.0	25.0	30.2	F	14	
C	2.0	64	26	28	0	0	47.4	14.4	28.9	SC	28
					31.5	0	66.5	20.2	37.0	SC	28
4.3	137.6	26	24.4	0	0	46.0	9.4	11.7	DT	28	
				27.4	0	76.5	11.7	14.6	DT	28	
D	1.67	60	70	40	0	0	35.5	16.7	27.3	SC, F	28
					52.3	16.0 ⁺	106.6	34.6 ^{>}	34.6	F	28
E	4.5	112.5	45	25	0	0	36.8	13.4	22.4	F	14
					24.3	5.9 ⁺⁺	91.9	21.4	23.7	F	14
F	4.2	50	50	15	15.0	9.6****	81.9	8.1 ^{>}	8.1	F	21
					20.2	6.4****	88.7	12.6 ^{>}	12.6	F	21
					25.7	7.1****	109.9	20.7 ^{>}	20.7	F	21
					12.0	3.4****	95.5	12.3 ^{>}	12.3	F	70
					0	0	59.2	13.1 ^{>}	13.1	F	70
G	3.13	50	40	10	0	0	45.0	14.6	18.8	DT	80
					43.9	0	135.0	20.5 ^{>}	20.5	F	85
					41.7*	0	85.0	21.7	28.5	SC	81

- * プレテンション方式による機械的プレストレス 21℃ 湿潤養生
- ** D 10 mm 異形鉄筋を 20cm 間隔
- *** D 10 mm 異形鉄筋を 10cm 間隔
- **** φ 9 mm 丸鋼を 10 cm 間隔
- + φ 6 mm 丸鋼を 10 cm 間隔
- ++ D 10 mm 異形鉄筋を 25 cm 間隔
- +++ F 曲げ引張破壊 SC せん断圧縮破壊 DT 斜め引張破壊
- **** 1 週間水中養生後 21℃ 50% RH で乾燥



図—3 部材供試体の断面諸元

の力学的特性をまず明らかにしようとしたからである。今後、さらに種々の養生方法のものについても実験を行う必要があるが、ケミカルプレストレスングおよびケミカルプレストレスを導入したコンクリート部材の基本的な力学的特性を明らかにできたものと思われる。

3. 膨張コンクリートが拘束鋼材に対してなす仕事量

(1) ケミカルプレストレスに及ぼす拘束の程度の影響および仕事量の概念

膨張混和材の使用によってコンクリート構造物に導入されるケミカルプレストレスは、コンクリートの配合および養生方法が同じ場合でも、拘束の程度の影響を著しく受ける。すなわち、拘束の程度の指標として、鉄筋などの拘束鋼材の断面積とコンクリートの断面積との比で定義される拘束鋼材比を用いると、すでに報告されているように^{2),4),9)}、拘束鋼材比が大きくなるほど、一般に、ケミカルプレストレスは大きくなるのである(図-4 参照)。

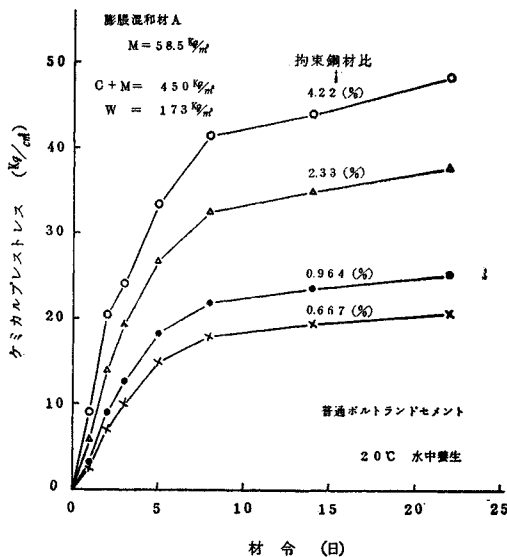


図-4 拘束の程度がケミカルプレストレスに及ぼす影響

著者は表-2 に示す範囲のうち約50種の配合および養生方法を用いたコンクリート供試体を図-1 に示す溶接定着軸拘束装置で拘束した実験を行った。その結果、拘束鋼材比が0.667%から4.22%の範囲においては、いずれの場合にも図-4 に示すように拘束鋼材比が大きくなるほど、ケミカルプレストレスは大きくなり、また反対に、拘束鋼材の膨張ひずみは小さくなるのが確かめられた。そして、拘束鋼材比とケミカルプレストレスとの関係を見出すため、次式で与えられる“単位体

積あたりの膨張コンクリートが拘束鋼材に対してなす仕事量 U ”の概念を適用することを思いつき、実験結果を整理した。

$$U = \frac{1}{2} \sigma_{cp} \epsilon = \frac{1}{2} p E_s \epsilon^2 \dots\dots\dots (1)$$

- ただし、 σ_{cp} : ケミカルプレストレス
- ϵ : 拘束鋼材の膨張ひずみ
- E_s : 拘束鋼材のヤング係数
- p : 拘束鋼材比= A_s/A_c
- A_s : 拘束鋼材の断面積
- A_c : コンクリートの断面積

代表的な実験結果を図-5 に示すが、この図から、単位体積あたりの仕事量 U が $1 \times 10^{-2} \text{ kg/cm}^2$ 程度までならば、仕事量 U は拘束鋼材比が0.667%から4.22%に変化しても、各材令において、ほぼ一定値となることが認められる。ただし式(1)で計算できる仕事量 U には、ケミカルプレストレスの相違によるコンクリートのクリープおよび弾性変形の差を考慮していないため、一般に、拘束鋼材比が大きくなると、仕事量は小さくなっていく傾向がある。この現象は、仕事量が大きく、材令が経過するほど著しくなる。また、セメントの種類を変化させた実験結果から、一般に、水和反応速度の遅いセメントを用いた場合に著しくなることも認められた。

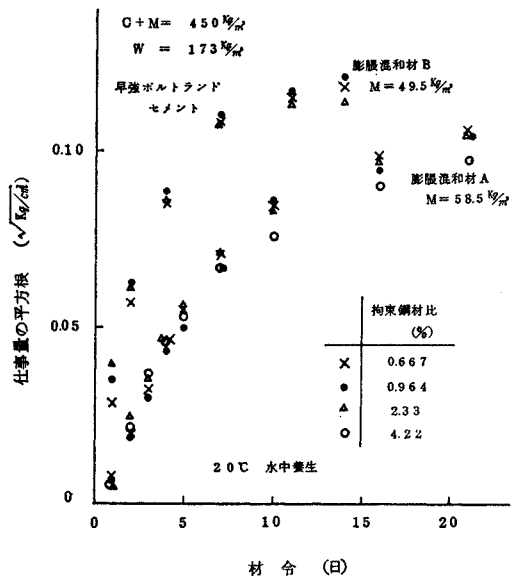


図-5 膨張コンクリートが拘束鋼材に対してなす仕事量

しかしながら、すべての実験結果を通覧すると、単位体積あたりの仕事量 U が $1 \times 10^{-2} \text{ kg/cm}^2$ の範囲で、ケミカルプレストレスの増加がほとんどなくなる材令21日程度までは、拘束鋼材比が0.667%と4.22%の場合の仕事量の相違は約15%から20%までの範囲におさ

まることが認められた。単位体積あたりの仕事量 U の値が $1 \times 10^{-2} \text{ kg/cm}^2$ ということは、拘束鋼材比が 1% の場合、コンクリートの膨張ひずみにして約 1000×10^{-6} に、鋼材の引張応力度にして約 2000 kg/cm^2 程度に相当する膨張エネルギーである。一般に、5. に述べるような鉄筋コンクリート部材にケミカルプレストレスを利用する場合には、十分な量と考えられる。それゆえ、このような場合に、実用上仕事量 U は拘束の程度とほとんど無関係であると仮定できるものと思われる。そして、この仮定を用いれば、式 (1) から断面積が A_s の拘束鋼材に生じる引張力は式 (2) より求まるのである。

$$P = \epsilon E_s A_s = \sqrt{2U} \sqrt{E_s A_s A_s} \dots \dots \dots (2)$$

(2) 鋼材の配置方法が異なる場合の仕事量

(1) では、鉄筋などの拘束鋼材を断面对称に配置した場合について述べたが、拘束鋼材の量が同じでも、鋼材の配置方法によってケミカルプレストレスが異なるのは当然である。しかしながら、この点についてはほとんど研究されていないため、まず、鉄筋を断面非対称に配置した場合について実験を行った。

供試体は表-4 に示すように鉄筋を配置した矩形ばりである。このように鉄筋を配置すれば、断面内の膨張ひずみは一様とならず、高さ方向に分布するのは当然である。鉄筋に貼ったワイヤストレインゲージの値およびコンタクト型ひずみ計によるコンクリート表面の軸方向膨張ひずみの値を検討した結果、図-6 に示すように、いずれの配置方法においても、軸方向の膨張ひずみは高さ方向にほぼ直線分布することが認められた。したがって、膨張ひずみは断面内で直線分布することが仮定できるのである。

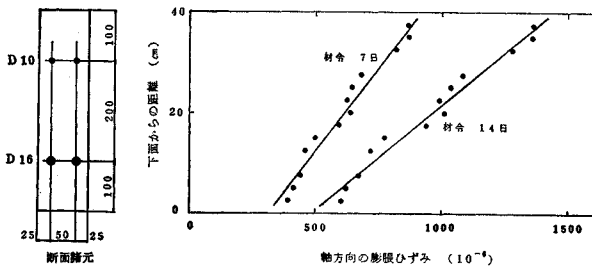


図-6 軸方向膨張ひずみの高さ方向の分布

(1) において導入した“単位体積あたりの膨張コンクリートが拘束鋼材に対してなす仕事量 U ” の概念を適用するためには、拘束鋼材全体を代表する膨張ひずみをどの位置にとるかが問題となる。式 (2) から明らかなように、拘束鋼材に生じる引張力は断面積の平方根に比例することから、この位置として、拘束鋼材断面積の平方根に関する重心位置と仮定した。

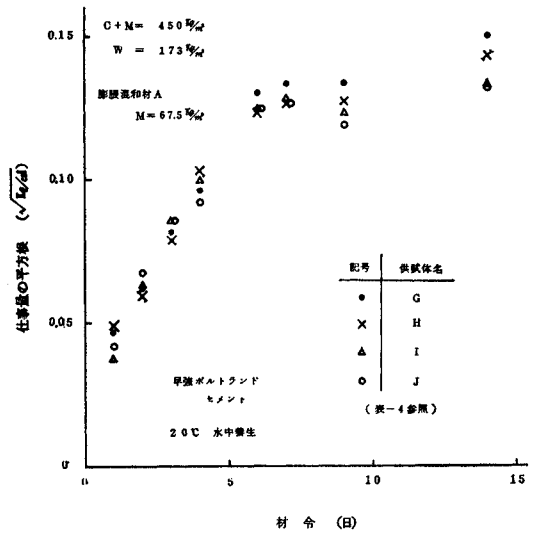


図-7 鋼材の量および配置方法が異なる場合の仕事量

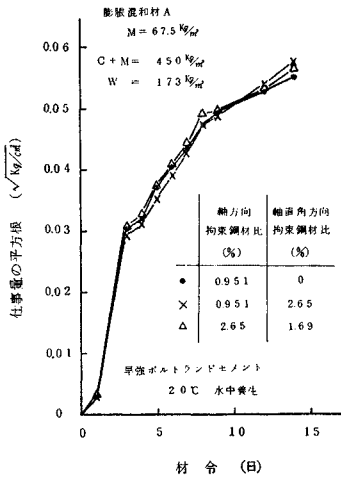
図-7 は、鉄筋の位置を一定とし、鉄筋の径を D 13 mm から D 32 mm まで変化させて配置した場合の上段および下段の鉄筋の膨張ひずみの実測値から、鉄筋断面積の平方根に関する重心位置の膨張ひずみを膨張ひずみの直線分布を仮定して算出し、その位置に全部の鉄筋が集まっているものとして式 (1) により求めた仕事量の平方根を、材令とともに示したものである。この図からも、上記の仮定を採用して式 (1) より求まる仕事量 U は、鉄筋の配置方法を変化させても、各材令を通じてほぼ一定の値をとることが認められるのである。

したがって、(1) に述べた仮定を拡張して、

- a) コンクリートの配合および養生方法が同じならば、拘束鋼材の量およびその配置方法にかかわらず単位体積あたりの仕事量 U は一定の値をとる。
- b) 拘束鋼材断面積の平方根に関する重心位置に、全拘束鋼材が集まっているとして仕事量 U を算出する。
- c) 膨張ひずみは断面内で直線分布する。

と仮定しても実用上支障ないものと考えられる。

鉄筋コンクリート構造物にケミカルプレストレスを利用する場合には、多軸方向に導入されるケミカルプレストレスについても解明しなければならないと考え、図-2 に示すように、鉄筋の本数および配置を変えることにより、拘束の程度とその方法とを変化させた鉄筋コンクリート床版などの多軸拘束状態について、各方向に生じた仕事量 U を算出した。図-8 はその一例であって、仕事量 U は鉄筋表面に貼った床版中央部のワイヤストレインゲージのひずみから計算したもので、



図一〇 二軸拘束状態における仕事量

6~8 測点の平均値である。この図から、拘束鋼材比が 0.951% の軸方向に生じた仕事量は、軸直角方向の拘束鋼材比が 0% から 2.65% に変化してもほとんど等しいことが各材令について認められよう。また、この図に示すような形状および寸法の床版に、D 10 mm 鉄筋の本数を各方向について変えて配置し、拘束鋼材比を 0% から 1.90% に変化させた場合にも上記と同様な結果を得た。すなわち、多軸拘束状態において、ある方向に生じる仕事量は、その方向と直角に配置された拘束鋼材の影響をほとんど受けないことが示されたのであって、実用上、各方向に生じる仕事量はそれぞれ独立であると仮定できるものと考えられる。

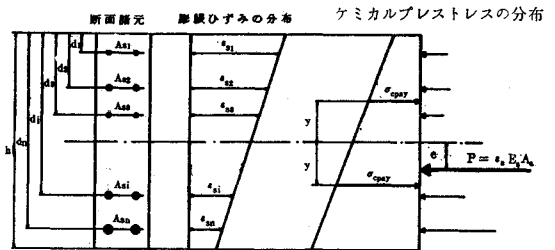
なお、上記で論じた単位体積あたりの仕事量 U は、拘束鋼材により膨張コンクリートが十分に拘束されている場合について適用されるものであって、鉄筋とコンクリートとの付着によってコンクリートの膨張を拘束する場合には、部材端部からある位置までの間は拘束が不十分な部分が存在し、導入されるケミカルプレストレスが小さくなるとともに、コンクリートの膨張量が大きくなって、コンクリートの力学的特性が劣化する¹⁰⁾。したがって、この部分では軸方向鉄筋に定着装置を施したり、スターラップを十分に配置するなどの考慮が必要である。

4. ケミカルプレストレスの推定方法に関する著者の提案

コンクリートに導入されるケミカルプレストレスは、3. に述べたように、コンクリートの配合および養生方法が同じ場合でも、拘束の程度と拘束方法との影響を著しく受ける。拘束鋼材を一軸方向に、断面对称に配置した場合のケミカルプレストレスについては、六車による有効自由膨張量の概念に基づく推定方法⁹⁾、戸川・荒木

による自由膨張量を基礎にした微小時間についての逐次計算方法⁹⁾、および岡村・国島の潜在膨張量の概念を導入した膨張コンクリートの複合モデルによる推定方法¹¹⁾など、有力な推定方法が提案されている。しかしながら、現在のところ、推定の精度に影響を及ぼす膨張コンクリートの弾性係数およびクリープ係数などの定数を正確に見積ることは相当に困難である。また、実験式も提案されているが^{9), 12)}、実験の範囲が狭く、一般に適用するまでに至っていないようである。拘束鋼材を断面非対称に配置した場合に導入されるケミカルプレストレスについては、実験結果も少なく、六車の提案式⁴⁾が報告されているにすぎないようである。また、多軸方向に導入されるケミカルプレストレスについては、膨張混和材を用いた鉄筋コンクリート床版および鉄筋コンクリート管、あるいは鋼管などによる拘束についての実測値^{13)~15), 20)}は報告されているものの、この種の構造物に導入されるケミカルプレストレスの推定方法はほとんど論議されていない現状である。

著者は 3. において、“単位体積あたりの膨張コンクリートが拘束鋼材に対してなす仕事量 U ” の概念を導入し、この仕事量は、各材令において、拘束の程度およびその方法に無関係に一定の値となると仮定しても、実用的に支障のないことを明らかにした。したがって、この仮定を用いることにより、ある基準となる一軸拘束供試体の測定結果から、任意の一軸拘束状態の場合に導入されるケミカルプレストレスを簡便に推定できるのである。すなわち、拘束鋼材が図一〇に示すように任意に配置された部材において、コンクリートの断面圆心から距



図一〇 膨張ひずみ分布およびケミカルプレストレスの分布

離 y の位置に導入されるケミカルプレストレス σ_{cpay} は、ある種類の基準となる拘束鋼材比 p_s をもつ一軸拘束供試体の膨張ひずみ ϵ_s を測定することにより求めた仕事量 U を、この部材に導入される仕事量に等しいと置くことによって、次式により推定できるのである^{9), 21)}。

$$\sigma_{cpay} = \sqrt{2 E_s A_c A_a} \left(\frac{1}{A_c} \pm \frac{e}{I_c} y \right) \sqrt{U}$$

$$U = \frac{1}{2} p_s E_s \epsilon_s^2 \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 p_s : 基準となる拘束鋼材比
 ϵ_s : 基準となる拘束鋼材の膨張ひずみ

e: 拘束鋼材断面積の平方根に関する
重心位置とコンクリートの断面図
心位置との距離

I_c : コンクリートの断面図心軸に関する
断面二次モーメント

$$A_a = \text{拘束鋼材断面積の総和} = \sum_{i=1}^n A_{s_i}$$

なお、式(3)から拘束鋼材が断面对称に配置されている場合に導入されるケミカルプレストレスは、式(4)で求まる。

$$\begin{aligned} \sigma_{cpay} &= \sqrt{2E_s A_c A_a} \times \frac{1}{A_c} \times \sqrt{U} \\ &= \sqrt{2E_s \sum_{i=1}^n p_i} \sqrt{U} = \sqrt{2E_s p_a} \sqrt{U} \end{aligned} \dots\dots\dots(4)$$

ただし、 $p_a = \sum_{i=1}^n p_i = \frac{A_a}{A_c}$

すなわち、拘束鋼材比が基準拘束鋼材比の p_a/p_s 倍の場合に導入されるケミカルプレストレスは $\sqrt{p_a/p_s}$ 倍になるのであって、非常に簡便な推定方法といえよう。

図-10 は基準となる拘束鋼材比が 0.964% の測定値から、拘束鋼材比 p_a が 0.667%、2.33% および 4.22% の場合に導入されるケミカルプレストレスを推定した値と実測値とを示した一例である。この図から、基準となる拘束鋼材比 p_s を約 1% とすると、通常使用される 0.7% から 4% 程度までの拘束鋼材比 p_a の場合に導入されるケミカルプレストレスを約 15% 以内の誤差で推定できることが示される。

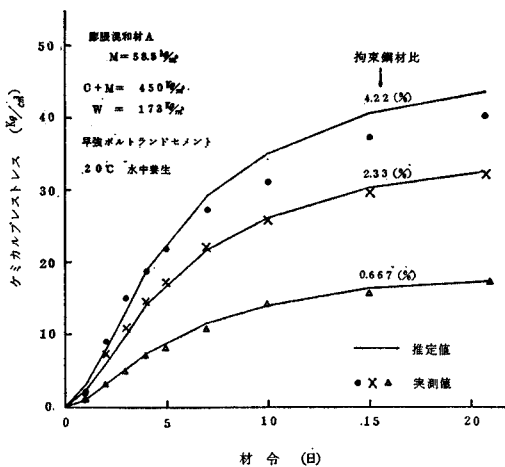


図-10 拘束鋼材を断面对称に配置した場合のケミカルプレストレスの推定値と実測値 ($p_s=0.964\%$)

5. で述べる部材に導入されるケミカルプレストレスの推定値と実測値との一例を表-6 に示す。推定の基準とした膨張ひずみは、2. で述べた拘束鋼材比 p_s が

0.964% の場合の溶接定着一軸拘束供試体から求めた値を用いた。材令が経過するにしたがって、推定値が実測値に比べて大きくなり、その差が増加する傾向があるものの、約 15% 以内の精度で推定できていることが認められる。

鉄筋を断面非対称に配置した場合に、コンクリート上縁と下縁とに導入されるケミカルプレストレスの推定値と実測値とを比較した例を図-11 および表-7 に示している。この場合も、推定の基準とした膨張ひずみは表-6 と同様な一軸拘束供試体の値を使った。図-11 から、材令 14 日までの推定値と実測値とが良く一致している。表-7 は同じ断面で鉄筋の配置を 4 種類に変化させた場合であって、上縁における推定の精度が少し悪いこと、および、材令が経過するにしたがって、上縁では

表-6 部材に導入されるケミカルプレストレスの推定値と実測値 (Fシリーズ)

拘束鋼材比 (%)	材令 (日)			
	推定値 実測値	4	7	21
1.13	推定値 (kg/cm ²)	9.70	14.1	16.8
	実測値 (kg/cm ²)	9.34	11.7	14.5
	推定値/実測値 (%)	104	121	116
1.69	推定値 (kg/cm ²)	11.9	17.2	20.5
	実測値 (kg/cm ²)	13.0	16.4	18.1
	推定値/実測値 (%)	91.5	105	113
2.82	推定値 (kg/cm ²)	15.3	22.2	26.5
	実測値 (kg/cm ²)	16.2	20.6	22.7
	推定値/実測値 (%)	94.4	108	117

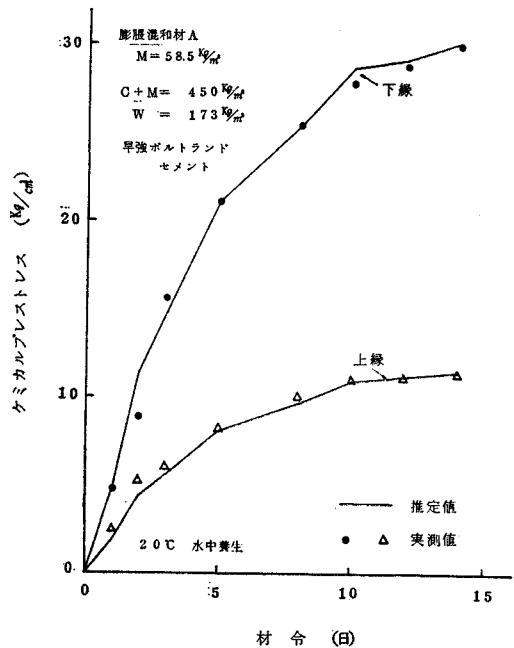


図-11 拘束鋼材を断面非対称に配置した場合に導入されるケミカルプレストレスの推定値と実測値 (供試体 F)

表一7 コンクリートの上縁および下縁に導入されるケミカルプレストレスの推定値と実測値

*供試体名	位置 推定値 実測値 名材令(日)	コンクリート上縁			コンクリート下縁		
		4	7	14	4	7	14
G	推定値 (kg/cm ²)	3.88	5.37	6.44	50.8	70.4	84.3
	実測値 (kg/cm ²)	4.83	6.41	11.7	53.0	73.9	75.9
	推定値/実測値 (%)	80.3	83.8	55.0	95.8	95.3	111
H	推定値 (kg/cm ²)	9.67	13.4	16.1	48.6	67.4	80.8
	実測値 (kg/cm ²)	9.35	14.6	22.8	49.2	63.8	62.7
	推定値/実測値 (%)	103	91.8	70.6	98.8	106	129
I	推定値 (kg/cm ²)	18.8	26.0	31.1	43.8	60.7	72.7
	実測値 (kg/cm ²)	19.3	29.4	36.5	58.2	69.7	65.4
	推定値/実測値 (%)	97.4	88.4	85.5	75.3	87.1	111
J	推定値 (kg/cm ²)	27.8	38.5	46.1	40.3	55.8	66.9
	実測値 (kg/cm ²)	36.4	51.4	54.5	45.4	59.7	62.8
	推定値/実測値 (%)	76.4	74.9	84.6	88.8	93.5	107

* 供試体名は 表一4 を参照

小さめに、下縁では反対に大きめに推定する傾向があるが、ケミカルプレストレスの増加がほとんどなくなる材令 21 日程度までは、一般に、各材令を通じて約 20% 以内の誤差で推定できることが認められる。したがって、鉄筋の量および配置方法が異なる場合に導入されるケミカルプレストレスは、基準となる拘束鋼材比 p_s をもつ一軸拘束供試体の膨張ひずみを実測することによって、式(3)より実用上十分な精度で推定できるものと思われる。

しかし、この方法は、3. で述べたように、単位体積あたりの仕事量 U の算定において、導入されるケミカルプレストレスが相違することによるコンクリートのクリープおよび弾性変形の差を考慮していない。そのため単位体積あたりの仕事量 U が 1×10^{-2} kg/cm² 程度までの範囲でも、一般にこれらの影響を受けて、仕事量が大きくなるほど、基準となる拘束鋼材比 p_a と推定する拘束鋼材比 p_a との差が大きくなるほど、また、材令が経過するほど、推定の精度が悪くなる傾向が認められた。すなわち、基準となる拘束鋼材比 p_s の場合のケミカルプレストレス σ_{cbs} に比べて、導入されるケミカルプレストレスが大きい場合には大きめに推定し、設計上危険側に推定することになる。

したがって、設計においては安全をみて式(3)に定数を導入した式(5)により、ケミカルプレストレス σ_{cpd} を推定しなければならない。

$$\sigma_{cpd} = k\sigma_{cpay}$$

$$\sigma_{cpay} = \sqrt{2E_s A_c A_a}$$

$$\left(\frac{1}{A_c} \pm \frac{e}{I_c} y\right) \sqrt{U} \dots\dots\dots(5)$$

定数 k の値は材令によっても異なるが、著者の実験から、単位体積あたりの仕事量 U が $U \leq 1 \times 10^{-2}$ kg/cm² の範囲内において、材令の影響も含め、式(6)を用いれ

ば実用的には十分であると思われる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_{cpay}}{\sigma_{cbs}} \leq 1.0 \text{ の場合 } k=1.0 \\ \frac{\sigma_{cpay}}{\sigma_{cbs}} > 1.0 \text{ の場合 } k=0.8 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(6)$$

また、多軸拘束状態における各方向に生じる仕事量 U は、その方向に直角な方向の拘束鋼材の影響を受けないと仮定しても実用的に支障のないことから、多軸拘束状態において、各方向に導入されるケミカルプレストレスも、ある拘束鋼材比 p_s をもつ一軸拘束供試体の測定値に基づいて、一軸拘束の場合と同様に式(5)および(6)からそれぞれ独立に推定できるものと思われる。

推定の基準となる一軸拘束供試体は、実際の構造物と同じ材料および配合の膨張コンクリートを用いるとともに、養生方法を一致させる必要がある。また、断面が大きくなると導入される仕事量が減少する傾向も認められるため、せめて、構造物の最小厚さと一致させることも必要と考えられる。拘束鋼材比としては、通常の鉄筋コンクリート構造物に用いられている鉄筋比に近い値の 1% 程度が適当である。拘束装置として著者は端板と拘束鋼材とを溶接で固定する方法を推奨するが、従来のように、ナットで固定する方法を用いる場合には、コンクリートでなく拘束鋼材の膨張量を測定しないと、仕事量を大きめに算定することになる⁷⁾。また、コンクリートと異形鉄筋などの付着で拘束する場合には、拘束の程度が一定となる部分の膨張量を測定するように、供試体の長さを定めること¹⁰⁾もケミカルプレストレスの推定の精度を上げるためには必要であると考えられる。

5. ケミカルプレストレスを導入したコンクリート部材の力学的特性

ケミカルプレストレスを導入することによる部材の曲げひびわれ耐力の改善については、数多くの貴重な研究結果が報告されており^{9), 10), 13)~17)}、工場製品などにケミカルプレストレッシングが応用されているのも、この効果を主目的としている。また、ケミカルプレストレスの導入による部材たわみの減少¹⁰⁾および斜めひびわれ耐力の改善¹⁷⁾についての実験結果も報告されている。しかしながら、これまでの研究では、膨張混和材を用いない場合との実験値の比較が大半を占め、ケミカルプレストレスの定量的な解明はほとんどなされていないようである。また、ケミカルプレストレスを鉄筋コンクリートに利用すれば、曲げひびわれ幅および斜めひびわれ幅も減少でき、鉄筋およびコンクリートの複合効果を著しく改善できるものと考えられる。したがって、曲げモーメントおよびせん断力を受ける、部材の力学的特性に及ぼす

ケミカルプレストレスの効果を定量的に解明するため、**図-3** に示す断面寸法の供試体について実験を行った。

(1) 部材の曲げ特性

ケミカルプレストレスを導入したコンクリート部材に外力による曲げモーメントが作用する場合の引張鉄筋のひずみ増加を通常の鉄筋コンクリート部材と対比して示した一例が **図-12** である。この図から、すでに多くの研究で報告されているように、ケミカルプレストレスを導入した部材は、曲げひびわれモーメントが増大して、全断面有効として計算できる範囲が大きくなるのがまず第1に指摘できる。第2に指摘できる点は、外力モーメントに抵抗する引張鉄筋のひずみ増加分が、曲げひびわれ発生後においても、鉄筋コンクリート部材におけるよりも著しく小さくなることである。その減少の程度は、ほぼケミカルプレッシング時の鉄筋の膨張ひずみに相当する分に一致しているのである。外力モーメントに抵抗する引張鉄筋の応力度には、ケミカルプレストレス導入時に生じた引張応力度も含まれることを考え

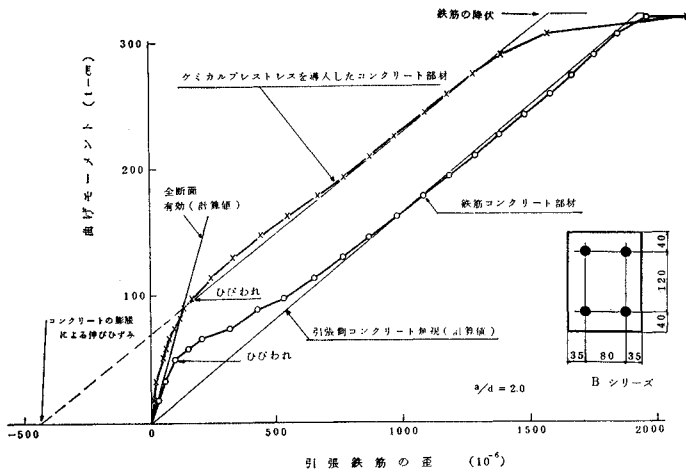


図-12 曲げモーメントと引張鉄筋のひずみとの関係を示す一例

れば、この現象は当然である。

図-13 は断面寸法、鉄筋の種類、鉄筋の径および鉄筋の配置をすべて同じにした部材の曲げひびわれ幅と外力による引張鉄筋のひずみの増加分との関係を、ケミカルプレストレスあるいは機械的プレストレスを導入した部材および鉄筋コンクリート部材について求めた実験結果の一例である。曲げひびわれ幅は部材側面の鉄筋重心位置において、載荷点の間隔に有効高さの4倍を加えた区間に生じたひびわれのうち、最も大きい幅のものから3個をとり、それらの平均値とした。この図から、まず鉄筋コンクリート部材においてはすでに報告されているように¹³⁾、曲げひびわれ幅は外力による引張鉄筋のひずみ

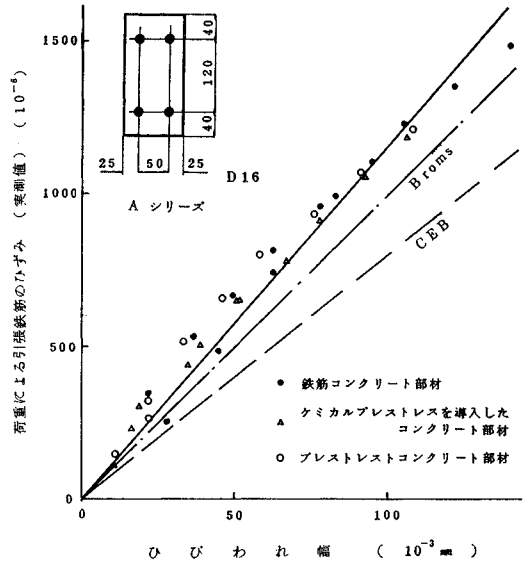
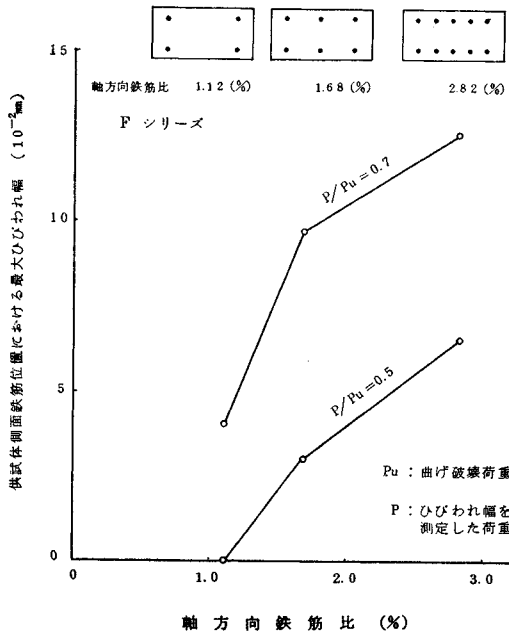


図-13 曲げひびわれ幅と荷重による引張鉄筋のひずみとの関係

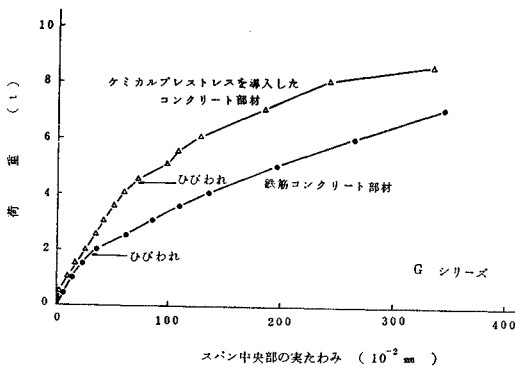
の増加分にほぼ比例している。また、機械的プレストレスを導入した部材およびケミカルプレストレスを導入した部材の場合にも同様に、曲げひびわれ幅は外力による引張鉄筋のひずみの増加分にほぼ比例し、それぞれの比例定数はほとんど等しいと考えてもさしつかえないことも認められる。したがって、**図-12** に示した外力モーメントと引張鉄筋のひずみ増加との関係から、ケミカルプレストレスを導入した部材の曲げひびわれ幅は、鉄筋コンクリート部材に比べて著しく小さくなることは明瞭である。

その減少の程度はケミカルプレッシング時に生じた引張鉄筋の応力度に影響されるのであって、膨張コンクリートの配合および養生方法が同じ場合には、**3.** に述べたように、引張鉄筋と圧縮鉄筋の断面積の合計値とコンクリートの断面積との比で表わされる軸方向鉄筋比が小さいほど、鉄筋の膨張ひずみが大きくなるので、それに応じて曲げひびわれ幅も小さくなるのである。**図-14** はその一例であって、鉄筋の本数を変えることにより軸方向鉄筋比を変化させた場合の曲げひびわれ幅の実測値である。軸方向鉄筋比が1.12%の場合では、曲げ破壊荷重の70%においてもひびわれ幅は著しく小さいが、1.68%、2.82%と鉄筋比が増加するにしたがって、ひびわれ幅が大きくなっていることは明らかである。



図一14 軸方向鉄筋比の相違がケミカルプレストレスを導入したコンクリート部材の曲げひびわれ幅に及ぼす影響

また、図一12 に示される現象から、ケミカルプレストレッシングを利用することにより、部材のたわみ量を減少させることが可能である（図一15 参照）。



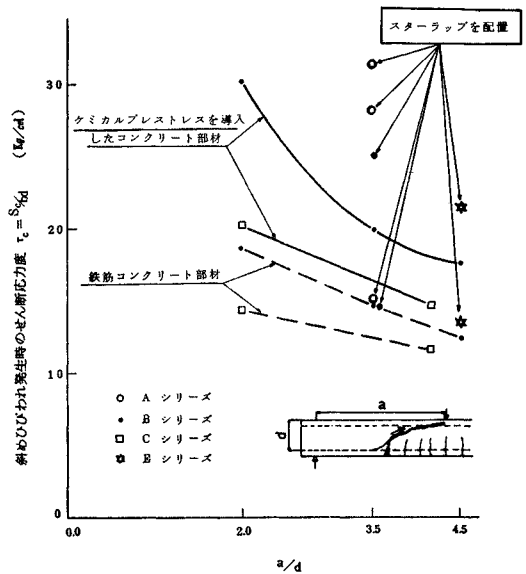
図一15 ケミカルプレストレスを導入したコンクリート部材のたわみ

上記の実験結果から、ケミカルプレストレスを利用することによって、部材の曲げひびわれ耐力を増加させること、および部材のたわみを減少させることが可能であるばかりでなく、曲げひびわれ幅によって制限される鉄筋の許容引張応力度の限度も、ケミカルプレストレスの導入によって鉄筋に生じる応力度に相当する分だけ上げることが認められた。ケミカルプレストレッシングによって鉄筋に生じる引張応力度は、コンクリートの配合、養生方法、鉄筋の量およびその配置方法などにより

異なるが、3. に述べた結果から、軸方向鉄筋比が 1% の場合に、湿潤養生を行えば、1000 kg/cm² 程度にすることは十分可能であって、SD 50 以上の高張力異形鉄筋を有効に利用できるのである。

(2) 部材の斜めひびわれ特性

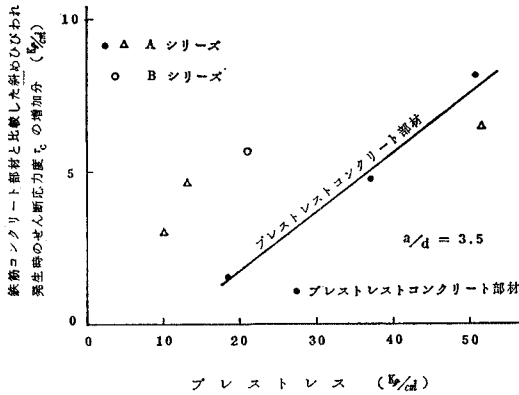
図一16 には、せん断スパンと部材の有効高さとの比 a/d を変化させて求めたケミカルプレストレスを導入したコンクリート部材の斜めひびわれ発生時のせん断応力度 $\tau_c = S/bd$ の実験結果を、鉄筋コンクリート部材と対比して示すが、この図から、ケミカルプレストレスを導入した部材の斜めひびわれ特性として、次の二点が指摘できる。



図一16 斜めひびわれ発生時のせん断応力度

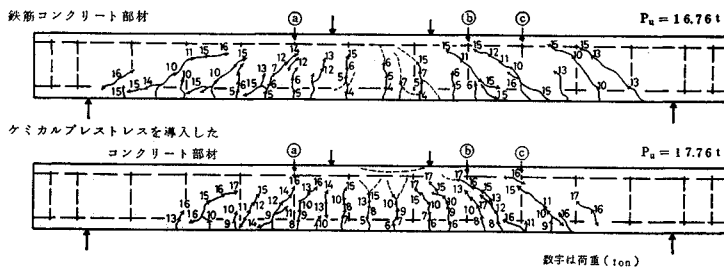
コンクリートの膨張力を軸方向に配置した異形鉄筋で拘束して、軸方向に 20~55 kg/cm² のケミカルプレストレスを導入するだけで、試験した a/d の範囲 (2.0~4.5) では、いずれの場合にも鉄筋コンクリート部材に比べて、斜めひびわれ耐力が 20~40% 増加していることが、第1に指摘できる点である。このケミカルプレストレスの効果を機械的プレストレスと比較した実験結果が図一17 である。鉄筋コンクリート部材との斜めひびわれ発生時のせん断応力度の差をプレストレスと対比したものであって、黒丸印が機械的プレストレスを導入した場合である。実験数が少ないため明確なことはいえないが、斜めひびわれ耐力に及ぼすケミカルプレストレスの効果は、機械的なプレストレスと同等であると考えてもさしつかえないと思われる。

第2に指摘できる点は、鉄筋コンクリート部材に腹鉄

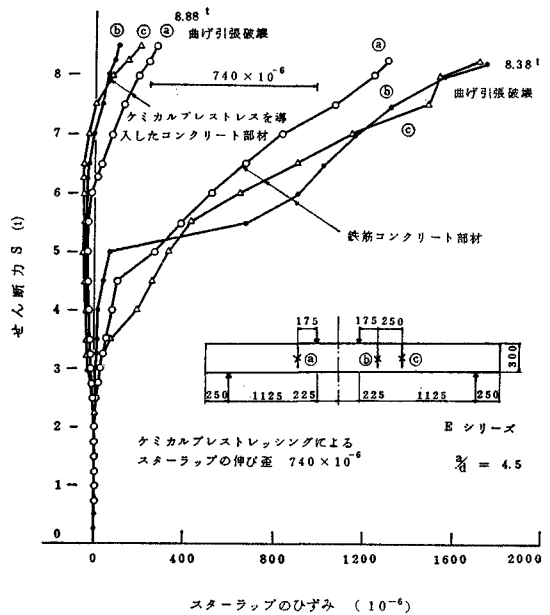


図一17 斜めひびわれ発生時のせん断応力度の増加分とプレストレスとの関係

筋を配置しても斜めひびわれ耐力はほとんど改善できないが、ケミカルプレストレスを導入した部材では、腹鉄筋によっても自動的にプレストレスが導入でき、さらに斜めひびわれ耐力が増加できることである。すなわち、軸方向のプレストレスの効果とを併せると、鉄筋コンクリート部材に比べて1.5倍から2倍程度に増加させることも可能となるのである。このことは 図一18 に一例を示したひびわれ図からも明瞭であって、同一の荷重に対して、ケミカルプレストレスを導入した部材では、斜めひびわれの数が少なく、また斜めひびわれの発達も著しく遅延されているのである。図一19 は 図一18 に示した位置のスターラップのひずみとせん断力との実験結果である。この図から、鉄筋コンクリート部材に斜めひびわれが発生して、スターラップのひずみが急激に増大し、その後ケミカルプレストレスを導入した部材にも斜めひびわれが発生するが、同じせん断力に対するスターラップのひずみは、鉄筋コンクリート部材に比べて著しく小さいことは明瞭である。そして、減少の程度はほぼケミカルプレストレス時のスターラップの膨張ひずみに相当する分に一致していることも認められる。したがって、曲げひびわれ幅の場合と同様に、スターラップを横切る斜めひびわれ幅も小さくなるのであって、この点がケミカルプレストレスを導入したコンクリート部材の重要な特性と考えられる。



図一18 ひびわれ図(㉑㉒㉓)は 図一19 のスターラップのひずみ測定位置を示す)



図一19 外力によるスターラップのひずみ

以上の実験結果から、ケミカルプレストレスを導入したコンクリート部材においては、腹鉄筋の計算をしなくてよい許容せん断応力度を、通常の鉄筋コンクリート部材の場合よりも、相当高く採れるものと期待されるとともに、部材に配置した腹鉄筋の効果を著しく高めることも可能であって、腹鉄筋にも高張力異形鉄筋を有効に利用できるのである。

ケミカルプレストレスを鉄筋コンクリート部材に利用することにより、部材の曲げモーメントおよびせん断力に対する力学的特性を著しく改善できることが明らかになった。特に、現段階では、品質管理の容易な工場製品にケミカルプレストレスを利用することは非常に有効であって、ボックスカルバートの版厚を薄くして、軽量化する試み¹⁹⁾も実用化されはじめてきた。すなわち、ケミカルプレストレスを導入することにより、高張力異形鉄筋を有効に利用でき、ひびわれ耐力および終局強度を低下させずに部材厚を薄くできるのである。軽量コンクリートを利用すればいっそう軽量化も可能となる。軽量コンクリートには斜めひびわれ耐力が低下する欠点があるが、上記に述べたように、ケミカルプレストレスを導入することによって、この点も解消されるのであって、軽量化、ひいては経済化の実が大いにあるものと思われる。ケミカルプレストレス、プレキャスト、高張力異形鉄筋および軽量コンク

リートの組合せは、お互いの短所を補いあい、それぞれの長所を生かすことになるのであって、今後この方面の研究が望まれる。

6. 結 論

ケミカルプレストレスを鉄筋コンクリート構造物に利用すれば、構造物の使用性状の向上および軽量化が可能となり、ひいては経済化の実をあげることもできるが、このケミカルプレストレスの利用上の最も重要かつ基本的な問題点と考えられる、ケミカルプレストレスの推定方法およびケミカルプレストレスを導入したコンクリート部材の力学的特性について論じた。すなわち、約50種の配合および養生方法を用いた膨張コンクリートを拘束鋼材の量とその配置方法とを変えて一軸方向に拘束した場合の膨張ひずみの測定結果、および床版などのように多軸方向に拘束した場合の膨張ひずみの測定結果から“単位体積あたりの膨張コンクリートが拘束鋼材に対してなす仕事量”を求め、この仕事量の概念を基礎にしたケミカルプレストレスの推定方法を提案した。さらに、膨張混和材を用いた鉄筋コンクリート部材、通常の鉄筋コンクリート部材およびプレストレストコンクリート部材などの曲げ試験を行って、ケミカルプレストレスを導入したコンクリート部材の優れた力学的特性を提示するとともにケミカルプレストレスの効果について論じた。本実験の範囲内で次のことがいえると思われる。

(1) 拘束鋼材を断面对称に配置した場合に、“単位体積あたりの膨張コンクリートが拘束鋼材に対してなす仕事量、 $U = \frac{1}{2} p E_s \epsilon^2$ ”は、セメントおよび膨張混和材の種類、コンクリートの配合、ならびに養生方法などのいかにかわからず、その量が $1 \times 10^{-2} \text{ kg/cm}^2$ 程度以内ならば、通常使用される拘束程度の範囲、すなわち、拘束鋼材比が4%以下においては、拘束の程度の影響を受けないと仮定しても実用的に支障のないことが明らかになった。ただし、 p は拘束鋼材比を、 ϵ は拘束鋼材の膨張ひずみを、また E_s は拘束鋼材のヤング係数を示す。

(2) 拘束鋼材を断面非対称に配置した場合には、各拘束鋼材の断面積の平方根に関する重心位置の膨張ひずみを、拘束鋼材全体を代表する膨張ひずみ ϵ として、(1) で述べた単位体積あたりの仕事量を求めれば、その値は実用上拘束の程度および拘束鋼材の配置の影響を受けずに一定であると仮定できることが明らかになった。

(3) 鉄筋の径と本数とを変えることにより、各方向の拘束の程度を変化させた床版などの実験結果から、多軸拘束状態における各方向に生じる単位体積あたりの仕事量 U は、その方向に直角な方向の鋼材の影響を受け

ないと仮定しても、実用上、その誤差は小さいことが認められた。

(4) したがって、任意の拘束を受ける各方向のケミカルプレストレスは、ある一種類の拘束鋼材比 p_s をもつ一軸拘束供試体についての仕事量 U を実測することによって、次式により実用上十分な精度で推定できるのである。すなわち、拘束鋼材断面積の平方根の重心位置とコンクリートの断面図心位置との距離を e 、拘束鋼材の断面積の総和を A_a 、コンクリートの断面積を A_c 、およびコンクリートの断面図心軸に関する断面二次モーメントを I_c とすると、コンクリートの断面図心から距離 y の位置に導入されるケミカルプレストレス $\sigma_{c p a y}$ は

$$\sigma_{c p a y} = \sqrt{2 E_s A_c A_a} \left(\frac{1}{A_c} \pm \frac{e}{I_c} y \right) \sqrt{U}$$

より簡便に求められるのであって、この方法を実用的なケミカルプレストレスを推定する方法として提案したい。

(5) ケミカルプレストレスを導入したコンクリート部材は、曲げひびわれ耐力が増大するだけでなく、外力モーメントに抵抗する引張鉄筋の応力度の増加が曲げひびわれ発生後においても、鉄筋コンクリート部材に比べて著しく小さくなる。その減少の程度は、ケミカルプレストレッシングによって生じた引張鉄筋の応力度に相当する値であって、コンクリートの配合、養生方法、鉄筋の量およびその配置方法などによって異なるが、軸方向鉄筋比が1%の場合、湿潤養生を行えば、 1000 kg/cm^2 程度にすることは十分可能である。したがって、ケミカルプレストレスを利用すれば、部材のたわみが減少だけでなく、曲げひびわれ幅を著しく小さくでき、ひびわれ幅などによって制限される鉄筋の許容引張応力度の限度を約 1000 kg/cm^2 程度上げることも可能となり、SD 50 以上の高張力異形鉄筋をも有効に利用できる可能性が認められた。

(6) ケミカルプレストレスを軸方向に導入しただけで、鉄筋コンクリート部材に比べて斜めひびわれ発生荷重を約 20% 以上大きくすることができるが、腹鉄筋を配置すれば、その方向にも自動的にプレストレスが導入できるのでさらに効果的であって、斜めひびわれ発生荷重を鉄筋コンクリート部材の場合の約 1.5 倍から 2 倍程度にすることも可能である。加えて、斜めひびわれ発生後においては、腹鉄筋の引張応力度が、同じ外力に対して、ケミカルプレストレッシング時に鉄筋に生じる引張応力度に相当する分だけ小さくなることも確かめられ、曲げひびわれ幅と同様に、斜めひびわれ幅も著しく小さくできるのであって、高張力異形鉄筋が腹鉄筋にも有効に利用できる可能性も認められた。

以上の結果から、ケミカルプレストレスを利用すれば曲げモーメントおよびせん断力を受けるコンクリート部材の力学的特性を著しく改善できることが明らかになった。特に、SD 50 以上の高張力異形鉄筋も有効に利用できる、ひびわれ耐力および終局強度を低下させずに部材厚を薄くすることも可能である。軽量コンクリートを併用すれば、いっそう軽量化が可能となり、プレキャスト製品などでは経済化の実が大いにあがると思われる。そして、部材に導入されるケミカルプレストレスは、著者の提案した推定方法により、実用上、十分な精度で簡便に推定できるのである。

本研究により、ケミカルプレストレスの利用に関するすべての問題点が解決されたわけではない。たとえば、膨張コンクリートの品質管理、あるいは、ケミカルプレストレスを導入した構造物の許容応力度などの問題点が残されている。しかしながら、ケミカルプレストレスの利用に関する最も重要かつ基礎的な事項の目安は得られたものと信じている。

参 考 文 献

- 1) Kokubu, M.: Use of Expansive Components for Concrete in Japan, ACI SP-38, 1973.
- 2) ACI Committee 223: Expansive Cement Concretes—Present State of Knowledge, ACI Journal, Aug. 1970.
- 3) Mikhailov, V.V.: Stressing Cement and Selfstressed Structures in the USSR, ACI SP-38, 1973.
- 4) 六車 照: CSA コンクリートの有効膨張ひずみに関する研究(第1報), 1965.
- 5) 戸川一夫・荒木謙一: 膨張セメントコンクリートのケミカルプレストレスに関する研究, プレストレストコンクリート, April, 1972.
- 6) たとえば, 小笠原一男・飯田秀雄・内田貞雄: CPC パイプについて, セメントコンクリート, No.264 Fed., 1969
- 7) 国分正胤・鈴木正治・辻 幸和: 一軸拘束によるコンクリートのケミカルプレストレスに関する基礎研究, 第26回土木学会年次講演概要集, 昭和46年
- 8) 辻 幸和: ケミカルプレストレスの推定方法について, セメント技術年報, 1973.
- 9) たとえば, 長滝重義・米山紘一: 膨張セメントコンクリート舗装に関する研究, 土木学会論文報告集, 第206号 1972年10月
- 10) 岡村 甫・辻 幸和: ケミカルプレレストコンクリート部材の力学的諸性状, セメント技術年報, 1972.
- 11) 岡村甫・国島正彦: 膨張コンクリートの複合モデル化について, セメント技術年報, 1973.
- 12) Bertero, V.V. and Polivka, M.: Effect of Degree of Restraint on Mechanical Behavior of Expansive Concrete, Proceedings ASTM, Vol. 64, 1964.
- 13) Lin, T.Y., and Klein, A.: Chemical Prestressing of Concrete Elements Using Expanding Cements, ACI Journal, Sept. 1963.
- 14) Benuska, K.L., Bertero, V.V., and Polivka, M: Self-stressed Concrete for Precast Building Units, PCI Journal, March-April, 1971.
- 15) 飯田秀雄・門司 唱: ケミカルプレストレスを導入する鉄筋コンクリート管の拘束条件に関する研究, 土木学会論文報告集, 第225号, 1974年5月
- 16) 桑原 力・山田一字・出頭圭三: 膨張性混和材を用いたコンクリートセグメントに関する研究, セメントコンクリート, No. 303 May, 1972.
- 17) 長滝重義・米山紘一: 膨張性混和材料の土木構造物への応用に関する研究, 第33回土木学会年次学術講演梗概集, 昭和43年.
- 18) ACI Committee 224: Control of Cracking in Concrete Structures, ACI Journal, Dec. 1972.
- 19) 岡村 甫・辻 幸和: ケミカルプレストレスを導入したコンクリート部材の力学的特性, 土木学会論文報告集, 第225号, 1974年5月
- 20) 小林一輔・伊藤利治: 膨張セメントの膨張圧に影響をおよぼす諸要因, 土木学会論文報告集, 第226号, 1974年6月
- 21) 辻 幸和・岡村 甫: コンクリートにおける膨張混和材の複合機構, 第7回複合材料シンポジウム発表報文集, 1974.

(1974. 9. 17・受付)