

[119] ポリマー含浸コンクリート板を永久型枠として用いた PC梁の基礎的研究

正会員 小沢満三（小沢コンクリート工業 技術研究所）
正会員○鶴田 健（小沢コンクリート工業 技術研究所）
正会員 内藤隆史（大成建設 技術研究所）

1. まえがき

最近問題になっている塩害によるPC梁の劣化防止対策に、不透水性で耐久性及び機械的強度にすぐれたポリマー含浸コンクリート（以下、P I C）^{1), 2)}の平板を、PC梁の永久型枠として使用する方法を開発した。これは、海洋コンクリート構造物の防食指針（J C I）の第2種防食法における「腐食因子のしゃへい性に優れたパネルを永久型枠として使用する方法」³⁾である。このとき、P I C型枠には、①塩素イオン等のしゃへい能力 ②コンクリート構造物としての耐久性 ③コンクリート本体との一体性 ④施工性 等々が要求される。①及び②については、別の機会にゆずり、③について実験的検討を行なったので、その結果について報告する。

まず、P I Cに関して、この間、実施した物性試験結果をとりまとめて表-1に示す。

さて、一体性に関する実験では、基礎的な実験として、コンクリートとの付着性状を検討するため、様々な表面形状をもつP I C板を製作し、曲げ試験及びせん断試験を実施した。

次に、基礎実験の結果にもとづき、付着性状の良好なP I C板で型枠を作り、ポストテンションPC梁を製作した。PC梁に静的及び動的

表-1 P I Cの物性試験結果

載荷を行ない、その挙動について、一般のPC梁と比較検討した。

2. P I Cの製造方法

2・1. P I Cの使用材料及び配合

コンクリート材料は、普通ポルトランドセメント、渡良瀬川産の砂ならびに砕石（比重2.60）、及び高性能減水剤を使用した。粗骨材の最大寸法は、10mm、W/C=37%、単位セメント量450kg/m³、スランプは8±1cm及び空気量は2~3%であった。

ポリマー含浸材料は、メタクリル酸メチル（モノマー）と2-2'アゾイソブチロニトリル（触媒）を使用し、その配合割合は、100:1（重量比）である。

2・2 製造工程

今回の試験に用いたP I C部材は図-1に示す工程及び条件で製作した。

3. 付着性状に関する実験

P I C板とコンクリートとの付着性状を検討するため、図-2に示すようなP I C板を製作し、以下の曲げ試験及びせん断試験に使用した。

3・1 曲げ試験

本試験は道路公団の試験方法⁴⁾に準じて、図-3に示す試験体をP I C板1種類に付き、各3本製作した。

試験項目	試験内容	試験結果
1. 機械的強度	圧縮強度 $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ 曲げ強度 $10 \times 10 \times 40 \text{cm}$ 引張強度 $\phi 15 \times 15 \text{cm}$ 弾性係数 $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ ボアソン比 $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ 比重 線膨脹係数 $-40^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$ の範囲	1500kg/cm^2 240kg/cm^2 120kg/cm^2 $4.5 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ 0.18 2.4 $1.1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$
2. クリープ	載荷応力 500kg/cm^2 、圧縮強度 1600kg/cm^2 $28 \pm 2^\circ\text{C}, 50 \pm 5\% \text{R.H.}$ 載荷日数 195日 外径 $20 \text{cm} \times$ 高さ $60 \text{cm} \times$ 厚さ 3cm の円筒供試体	クリープひずみ 9×10^{-5} クリープ係数 0.08
3. 疲労強度	応力比 60, 70, 75, 80%、各 5 本づつ 最小応力 12%、 $\phi 7.5 \times 15 \text{cm}$ 供試体 圧縮強度 2000kg/cm^2	1000万回疲労限 63%（応力比） S-N曲線はプレーンコンクリートと同傾向
4. 凍結融解試験	(1) 空気中 $-40^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$ 1cycle/day 30cycle $4 \times 4 \times 16 \text{cm}$ 供試体 (2) 水中 $-30^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$ 2cycle/day 230cycle $4 \times 4 \times 16 \text{cm}$ 供試体	強度低下 なし 強度低下率 4%
5. 耐薬品性	(1) H_2SO_4 2% 溶液浸漬 1000時間 $5 \times 6 \times 2 \text{cm}$ 供試体 (2) NaOH 2% 溶液浸漬 1000時間 $5 \times 6 \times 2 \text{cm}$ 供試体	強度低下率 39% 強度低下 なし
6. 耐候性	カーボンアーチ 3000時間照射、2時間に15分間の割合でシャワー、 $5 \times 6 \times 2 \text{cm}$ 供試体	重量減少 なし 強度低下 なし

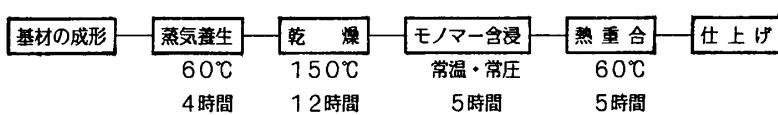


図-1 P I Cの製造工程

試験体は、鉄筋の降伏で破壊しないようにD-10を3本使用し、載荷点中央部に切欠部を設けるようにP I C板を下面に配置し、コンクリートを打設した。コンクリートの配合は、最大骨材寸法15mm、W/C=50%、単位セメント量350kg/m³とし、スランプは4±1cmであった。打設後蒸気養生を行ない、その後載荷まで乾燥しないように湿布で覆った。試験は材令3週で実施した。

載荷方法は一点集中載荷とし、接着面付近及び切欠部付近のひずみ分布がわかるように、図-3に示す位置にストレンケージを貼付した。

コンクリートとの付着力の評価については、図-4に示すように、①あるいは④の位置のひずみの変曲点（いずれか荷重の低い方）を、他のひずみの変化も考慮しながら、付着破壊開始荷重と判断した。付着破壊が開始したときの応力度 τ_i は次式から求めた。

$$\tau_i = \frac{E_c \cdot \Delta \epsilon \cdot a \cdot b}{b \cdot c} \text{ (kg/cm²)}$$

ただし、E_c : P I C板の弾性係数(kg/cm²)

△ε : 付着破壊開始時のひずみ

a : 切欠部の深さ (cm)

b : 試験体の幅 (cm)

c : 測定ゲージ間の距離 (cm)

また、梁は全てせん断破壊であった。

試験結果及び計算結果を表-2に示す。同表から、まぶしコンクリート10型が破壊までの追随能力および付着力にすぐれていることがわかる。

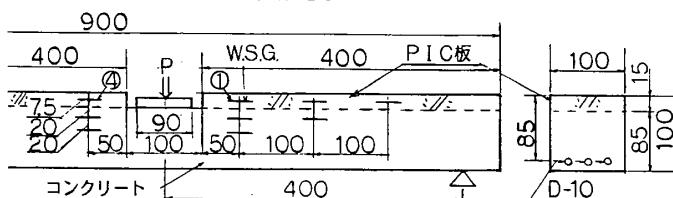


図-3 曲げ試験用試験体及び載荷方法

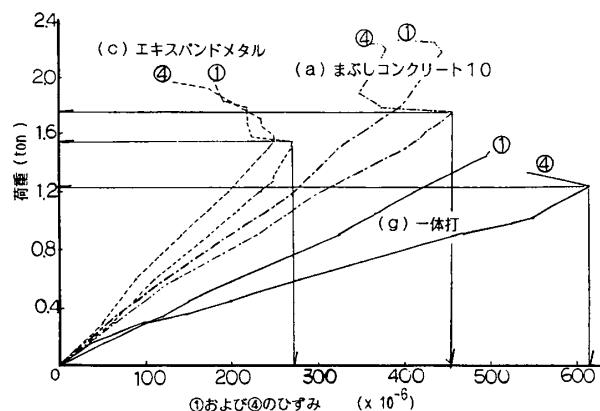


図-4 曲げ試験での荷重-ひずみ関係 (例)

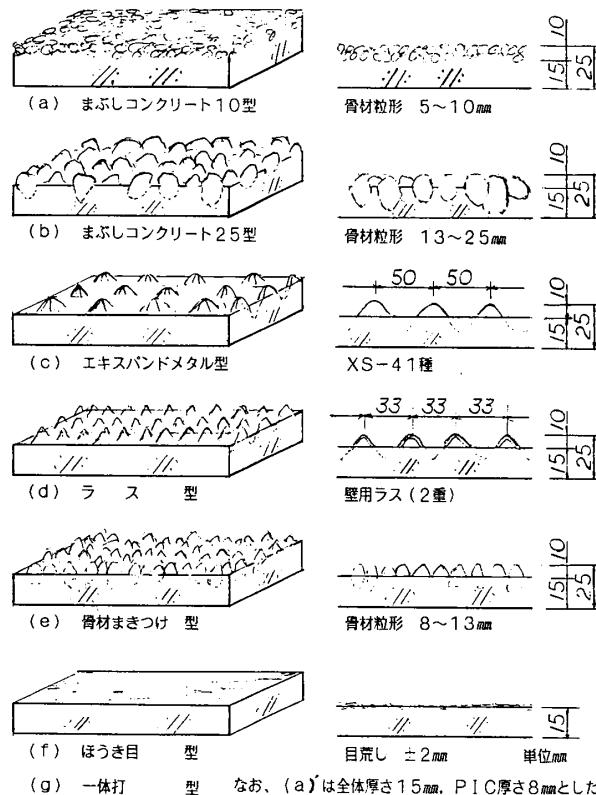


図-2 P I C板の表面形状

表-2 曲げ試験結果

試験体種類	切欠深さ (mm)	σ _c 6b (kg/cm ²)	B _i (kg)	V _u (kg)	B _i /V _u	τ _i (kg/cm ²)
1			1050	2040	0.51	36
2	25	373	1100	1800	0.61	36
3		46	1350	2080	0.65	29
(a) 4			1200	2000	0.60	38
5	15	432	1800	2210	0.81	63
6		57	1750	1960	0.89	53
(a) 1			1420	1520	0.93	36
(a) 2	15	405	1950	2160	0.90	39
3		55	1240	1650	0.75	39
(b) 1			1200	1900	0.63	25
(b) 2	25	373	750	1900	0.39	20
3		46	1200	1950	0.62	27
(c) 1			900	1720	0.52	27
(c) 2	15	405	1550	1980	0.78	34
3		55	700	2000	0.35	20
(d) 1			860	2130	0.40	20
(d) 2	15	442	600	1753	0.34	14
3		51				
(e) 1			900	2050	0.44	24
(e) 2	15	432	1600	2050	0.78	45
3		57	1400	1790	0.78	23
(f) 1			650	2000	0.33	14
(f) 2	15	442	1800	2050	0.88	38
3		51	730	2015	0.36	16
(g) 1			1240	1490	0.83	47
(g) 2	15	363	1580	1910	0.83	34
3		50	1350	1600	0.84	30

σ_c : コンクリートの圧縮強度 φ10×20cm, 6b : コンクリートの曲げ強度 10×10×40cm, B_i : 付着面の付着破壊が始まった荷重 V_u : 梁が破壊した荷重, τ_i : 付着破壊が始まったときの付着応力度

3・2 せん断試験

接着面でせん断破壊するように、図-5(a)に示す試験体をP I C板1種類に付き各3本製作し、同図(b)に示す方法で直接2面せん断試験を実施した。ただし、P I C板のe、d、f型に關し、P I Cの厚さを25mmとした。コンクリートは先の曲げ試験と同様の配合及び養生条件で、圧縮強度は390kg/cm²、曲げ強度は49kg/cm²、材令3週で載荷した。

せん断破壊性状について、a、b及びe型は載荷面から本体にかけて斜せん断ひびわれが入り、その後接着面で破壊し、g型は同様のひびわれが入り、同面で破壊した。c、d及びf型は接着面にせん断ひびわれが入り、同面で破壊した。

せん断試験結果を表-3に示す。同表のせん断ひびわれ強度及び破壊強度は、それぞれせん断ひびわれ発生荷重及びせん断破壊荷重を接着面積で除したものである。同表より、付着強度はa、b及びe型がすぐれているのがわかる。

3・3 P I C板の接合方法

様々な接合方法が考えられるが、今回はエポキシ樹脂を用いて単純な突き合せ接着方式にした。3体の試験体を製作し、曲げ試験を実施したところ全てP I C部で破壊した。なおP I Cの曲げ強度は240kg/cm²であった。エポキシ樹脂は、ビスフェノールAタイプエポキシ樹脂（主剤）及び芳香族変成アミン（硬化剤）を1:1の割合で用いた。

曲げ試験及びせん断試験結果と製造の難易及び寸法安定性等から検討した結果、a型の付着面をもつP I C板をP C梁の型枠として採用することにした。

4・P C梁による性能試験

4・1 P C梁の製作

試験に用いたP C梁の形状を図-6(a)及び断面詳細を同図(b)に示す。またP I C板の接合位置を同図(c)に示すように2通りにして、荷重に対する接合位置の検討も行なった。なお下面のP I C板も同位置で接合した。比較のため、通常のP C梁（標準型）も製作した。

P C梁は以下の工程 ①所定の形状・寸法のP I C板を図-1の工程で製作 ②エポキシ樹脂で接着しながら型枠の組立て（写真-1） ③配筋 ④コンクリート打設 ⑤蒸気養生の順で製作した。コンクリートは設計規準強度500kg/cm²で、配合は最大骨材寸法15mm、W/C=40%、単位セメント量420kg/m³とし、スランプ8±1.5cm及び空気量4±0.5%であった。早強ポルトランドセメントを使用し、P C鋼材S B P D 130/145、鉄筋D-10及びスターラップφ6を使用した。圧縮強度が450kg/cm²以上に達したことを確認してプレストレスを導入した（材令8~14日）。グラウトを注入し、載荷まで屋外に放置した。グラウトの配合は、W/C=40%、アルミ粉末をセメント重量の0.0075%混入し、載荷時の圧縮強度は、300~350kg/cm²であった。

図-7にプレストレッシング直後のひずみ分布を示す。初期緊張力は41.76ton下緑の圧縮応力度は、標準型で178kg/cm²、P I C型で合成部材として157kg/cm²、また上緑の引張応力度はそれぞれ24kg/cm²及び20kg/cm²である。P I C型の応力度の計算は、P I C板とコンクリートとの弾性係数比から求めた換算断面及び換算断面係数を用いて行なったものである。ただし、プレストレッシング時の弾性係数はコンクリートで 3.0×10^5 kg/cm²、P I C板で 4.5×10^5 kg/cm²とした。計算結果

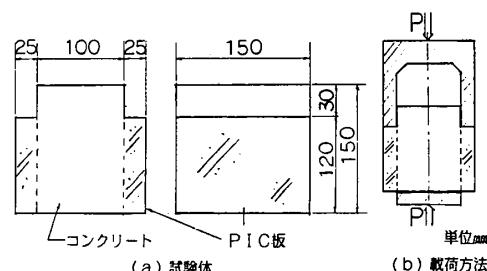


図-5 せん断試験

表-3 せん断試験結果

種類	せん断ひびわれ強度 (kg/cm ²)			せん断破壊強度 (kg/cm ²)		
	1	2	3	1	2	3
a	28	26	37	42	61	54
b	30	27	28	43	55	51
c	14	16	14	22	19	19
d	17	12	14	18	13	18
e	28	28	33	47	50	46
f	9	—	—	11	—	—
g	23	27	25	72	67	74

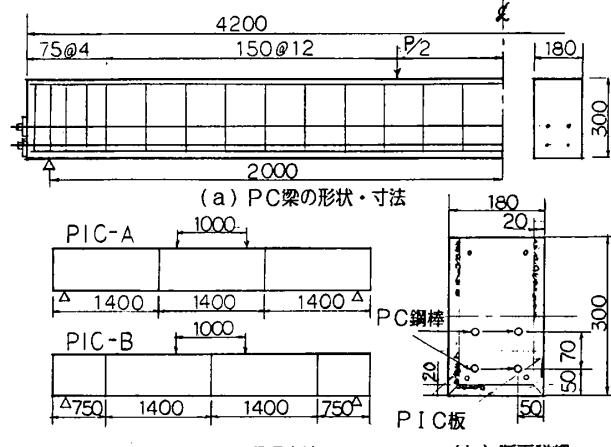


図-6 P C梁の仕様

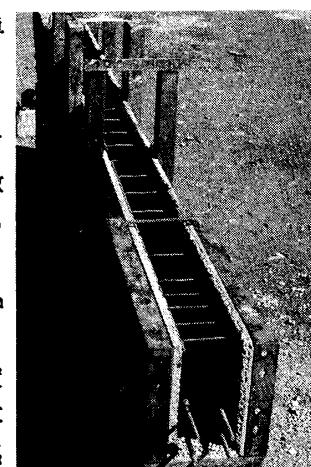


写真-1 P I C型枠

も同図に併記する。同図のひずみ分布及び計算値から、緊張力に対して、P I C板とコンクリートとは一体になっているようである。

4・2 載荷試験

載荷方法：標準型及びP I C-A、B型を各1本づつ静的に曲げ載荷試験（No.1、2、3）、同様にII種PCとして使用状態の荷重で200万回繰返し載荷後、静的に曲げ載荷試験（No.4、5、6）を行なった。繰返し載荷での荷重条件は、標準型PC梁の下縁に30kg/cm²の引張応力が作用するようプレストレスの減少量を考慮して定めた。この条件から求めた上限荷重は6.5ton、また下限荷重は0.9tonとした。

試験機はパルセーター型疲労試験機で、載荷速度は300rpmとした。たわみ及びひずみは10⁶回ごとに試験機を止め、0～6.5tonの間で測定した。

試験結果：ひびわれ発生荷重及び破壊荷重の実測値を表-4に示す。ひびわれ発生荷重を計算によって求めると標準型で7.7ton、P I C型で10.4tonである。また破壊荷重は両者とも15.5tonである。P I C型については、P I C板の曲げ強度が無視できない。そこで、合成断面は平面保持の法則が成り立つものと仮定して、P I Cとコンクリートとの曲げ強度比（240/60=4）から求めた換算断面及び換算断面係数を用いて、断面の見かけの曲げ強度を算定し、ひびわれ発生荷重を求めた。本断面では、見かけの曲げ強度は120kg/cm²となった。この計算値は実測値とおおよそ一致し、この方法でひびわれ発生荷重の評価ができるようである。また、試験結果によると、本断面でのひびわれ発生荷重はP I C型が標準型よりも2～3割高くなっている。

次に荷重-たわみ関係は図-8に示すとおり弾性域ではP I C型は標準型より剛性が高く、ひびわれ発生から破壊に至る過程では標準型と同傾向を示している。また10⁶回ごとの6.5ton載荷したときの中央点のたわみを図-9に示しているが、P I C型は繰返し荷重による影響も少ない。ひびわれ及び破壊状況に関し、ひびわれ本数は標準型の半分で、ひびわれ間隔及び幅は約2倍ほど大きくなり、破壊は全て鋼材が降伏した後のコンクリートの圧縮破壊で、破壊までP I C板が剥離することはなかった。

さらにP I C板の接合位置については、エポキシ樹脂の弾性係数がコンクリートより1桁小さいために、P I C-B型はA型に比べたたわみ及びひずみが1割ほど大きくなつたが、図-8にも示すとおり、とくに弱点とはならないようである。

5.まとめ

P I C板をPC梁の永久型枠として使用する場合の一体性について検討した結果、表面形状を工夫することによって、コンクリートとの一体性が得られ、プレストレスや静的及び動的荷重の作用にも何ら問題点はなく、通常のPC梁と同様に取扱えることがわかった。現在、P I C板のしゃへい性及び耐久性について検討しており、良好な結果が得られれば第2種防食法として使用できるものと考えられる。

謝辞 本実験に際し、貴重な御助言ならびに御示唆を賜りました土木研究センター柳田力常務理事、及び物性試験に関し多大な援助をしてくださいました秩父セメント研究部の方々に深謝致します。

参考文献 1.田沢・小林、他：樹脂含浸セメント製品に関する基礎研究、コンクリートジャーナル、Vol.19 No.1 Jan.1971
2.石崎・浅見、他：ポリマー含浸セメントペースト・モルタルの強度に関する考察、セメント技術年報28 他
3.小林：「連載講座」鋼材腐食によるコンクリート構造物の劣化とその対策、土木施工Vol.25 No.7-Vol.26
4.赤井、大川、他：新旧コンクリート付着強度に与える打離面の処理の効果、セメント技術年報33

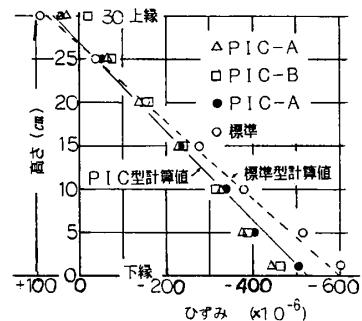


図-7 プレストレス時のひずみ分布

表-4 PC梁の試験結果

No.	試験体種類	コンクリート強度 kg/cm ²		ひびわれ発生荷重 ton	破壊荷重 ton
		6c	6b		
1	標準型	557	62	8.0	16.0
2	PIC-A	567	63	10.0	15.1
3	PIC-B	596	63	9.8	15.4
4	標準型	591	63	8.4	17.2
5	PIC-A	616	62	10.5	16.8
6	PIC-B	546	51	10.8	16.6

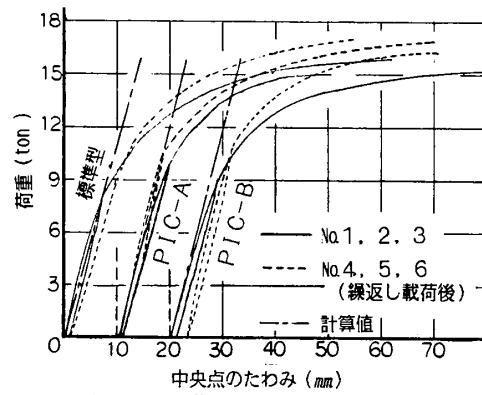


図-8 荷重-たわみ関係

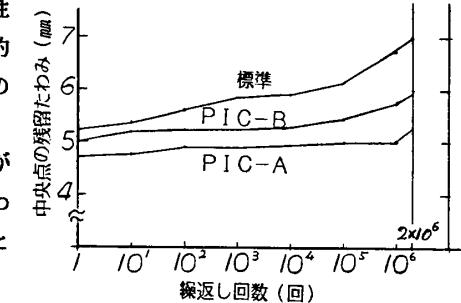


図-9 6.5tonでの残されたたわみ