

N-81 鉄筋プレパックス・コンクリートばりの強度について

運輸省港湾技術研究所 正員 赤塚 雄三

〇 森口 拓

§1 緒言

著者等の調査¹⁾によると、プレパックス・コンクリートに鉄筋を配置した、いわゆる鉄筋プレパックス・コンクリートの構造物、たとえば場所打ちケーソン・セルラー・ボックス、L型ボックス、ウェルあるいは橋床版など、の施工例もかなりの数に達している。この鉄筋プレパックス・コンクリート部材の設計には、普通の鉄筋コンクリートの設計方法がそのまま適用されているようであるが、その妥当性は現在のところ確認されていない。また、プレパックス・コンクリートの標準供試体による強度と構造物母体の強度との相関性も、明らかにされていないのが現状である。本研究は、上述の2点を究明する事を目的として始められたものであり、本文はその第1報として、鉄筋プレパックス・コンクリート部材として $15 \times 30 \times 180$ cmのはりを取りあげ、モルタル強度とコンクリート強度との相関性、供試体寸法の相違による強度の相違、標準供試体強度と構造物母体強度との相関性および鉄筋プレパックス・コンクリートばりの曲げ試験などの試験結果をまとめたものである。

今後、注入モルタルの配合およびプレパックス・コンクリート部材の形状、寸法を変えた場合についての試験や普通の鉄筋コンクリートばりとの比較試験を行ない、更にこれと並行して、たわみや応力分布などについても試験を行ない、検討を加える予定である。

§2 試験の方法

セメントは小野田普通ポルトランドセメント、フライアッシュは宇都宮ボゾラン、セメント分散剤はボゾリス No. 8、発泡剤は福田全層粉工業 KK のアルミニウム粉末 AA12 (鱗片状、平均粒径 25μ)、砂は神奈川県鶴沼海岸産のもの (比重 2.64、吸水量 2.36%、粒度 25μ 以下、粗粒率 2/6)、利利は神奈川県酒匂川産のもの (比重 2.78、吸水量 1.2%、粒度 $15 \sim 20 \mu$ 50% および $20 \sim 25 \mu$ 50%、空けきり率 37.7%)、鉄筋は SS 41 の普通丸鋼 (降伏点 2900 kg/cm^2 、引張強さ 4300 kg/cm^2)、を用いた。

表-1 注入モルタル

注入モルタルの配合は表-1に示す通りで、容量 370 l のモルタル・ミキサで10分間練り混ぜた。

配 合					流出 時間 (sec)	保水性 (%)	ブリー ン グ 率 (%)	流動率 (%)
F/(c+f)	S/(c+f)	Bz-8/(c+f)	Al/(c+f)	W/(c+f)				
0.25	1.00	0.0025	0.00015	0.44	21.5	70.4	7.1	7.7

*ブリーングによる水量の減少の水量に対する百分率で3時間経過したときの値である。

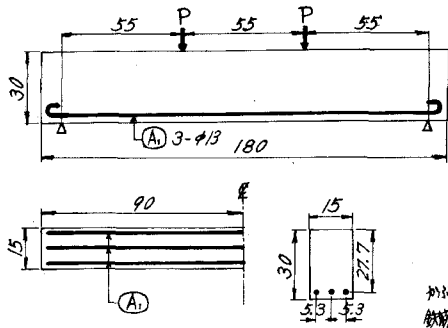
供試体の製作およびその試験、注

入モルタルについての試験などは、著者等の提案する方法²⁾、土木学会規準および土木学会 PC グラウト試験法に準じて行なわれた。

試験ばりの寸法は $15 \times 30 \times 180$ cm で、曲げ試験はスパン 165 cm の3等分負荷により、2材を28日に行ない、No. 1は無筋ばり、No. 2 および No. 3 は鉄筋ばりで、その配筋は図-1に示す通りである。

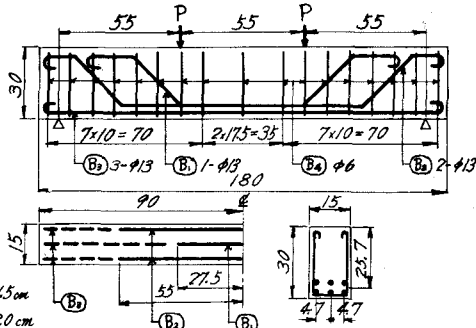
§3 試験結果

強度試験結果は、表-2および表-3に示す通りである。



No. 2 はり

図-1 鉄筋フレパックド・コンフリートはり



No. 3 はり

単位 cm

§ 4 試験結果の考察

表-2 および表-3 の試験結果から、次の事が認められる。

(1) 各種標準養生供試体の諸強度の比較 (材令 28 日)

① コンフリート ($\phi 15/30$ cm) の圧縮強度および引張強さ係数は、モルタル ($\phi 5 \times 10$ cm) のそれの、それぞれ 70~79 % および 69~72 % であり、コンフリート ($15 \times 15 \times 180$ cm) の曲げ強度は、モルタル ($4 \times 4 \times 16$ cm) のそれの 47 % 程度である。いずれの場合もモルタルの方がコンフリートよりその強度は大きく、両者の間には何らかの相関関係が存在するものと思われる。

② モルタルの $\phi 5 \times 10$ cm 供試体の圧縮強度は、 $4 \times 4 \times 16$ cm 供試体のそれの 88 % 程度であり、コンフリートの $\phi 15/30$ cm 供試体の圧縮強度は、 $15 \times 15 \times 180$ cm 供試体のそれの 82 % 程度である。これは、普通コンフリート供試体について行った T. Gonnerman の実験結果³⁾と極めて良く一致

表-2 強度試験結果 (試験値は原則として 3 個の平均値)

バッチ番号	供試体の種類	供試体の寸法 (cm)	圧縮強度 (kg/cm^2)			曲げ強度 (kg/cm^2)			引張強さ係数 (kg/cm^2)		
			7 日	14 日	28 日	7 日	14 日	28 日	7 日	14 日	28 日
1	モルタル	$\phi 5 \times 10$	169 (136)	231 (192)	318 (263)	—	—	—	21.8 (12.8)	24.2 (19.2)	28.1 (23.0)
	コンフリート	$\phi 15/30$	146 (105)	172 (149)	221 (164)	—	—	—	15.0 (11.9)	17.0 (15.1)	19.3 (16.8)
		$15 \times 15 \times 180$	188 (116)	191 (156)	270 (211)	22.2 (15.8)	25.8 (17.1)	31.1 (19.1)	—	—	—
		$15 \times 30 \times 180$	—	—	(151)*	—	—	(16.1)	—	—	—
2	モルタル	$\phi 5 \times 10$	193 (149)	214 (226)	280 (283)	—	—	—	20.2 (21.6)	22.3 (24.5)	28.4 (31.3)
	コンフリート	$4 \times 4 \times 16$	200 (233)	277 (292)	320 (324)	47.5 (32.3)	57.7 (32.3)	63.8 (39.6)	—	—	—
		$\phi 15/30$	118 (120)	154 (149)	221 (199)**	—	—	—	12.8 (13.8)	17.4 (17.6)	20.4 (20.2)
		$15 \times 15 \times 180$	—	—	210 (203)	20.6 (20.1)	25.4 (21.4)	30.0 (22.8)	—	—	—
3	モルタル	$\phi 5 \times 10$	—	154	168	—	—	—	—	13.8	17.7
	コンフリート	$4 \times 4 \times 16$	—	254	285	—	50.8	68.0	—	—	—
		$\phi 15/30$	—	137	165***	—	—	—	—	15.1	18.4
		$15 \times 15 \times 180$	—	—	236	—	—	19.9	—	—	—

備考 1. 供試体寸法 $4 \times 4 \times 16$ cm および $15 \times 15 \times 180$ cm の欄の圧縮強度は、曲げ試験終了後のはりの折片を用いて試験したものであり、供試体数は 6 個である。
2. バッチ番号 1 の () 内の数値は供試体を所定の材令まで実験室 (平均温度 19.2°C、湿度 81%) に放置したものとの値である。本バッチの $15 \times 30 \times 180$ cm はりと No. 1 はりと称する。
3. バッチ番号 2 の () 内の数値は供試体を材令 7 日まで麻布で覆い湿潤状態に保ち、それ以後所定の材令まで実験室 (平均温度 15.6°C、湿度 74%) に放置したものとの値である。本バッチの $15 \times 30 \times 180$ cm はりを No. 2 はりと称する。
4. バッチ番号 3 については、供試体を温度 20 ± 2°C、湿度 80 ± 5% の恒温恒湿室で養生した。本バッチの $15 \times 30 \times 180$ cm はりを No. 3 はりと称する。
* 曲げ試験終了後のはりの折片をコンクリートカッターで $15 \times 15 \times 50$ cm に成形したものとの値である。
** 本供試体の破壊強度の 3 分の 2 における静弾性係数は $135,000 \text{ kg}/\text{cm}^2$ である。
*** 本供試体の破壊強度の 3 分の 2 における静弾性係数は $138,000 \text{ kg}/\text{cm}^2$ である。

表-3 フレパックド・コンフリートはり ($15 \times 30 \times 180$ cm) の曲げ試験結果

(はり)番号	1	2	3			
$P = A_s/bd$	0	0.0096	0.0206			
$m = E_s/E_c$	—	13.5	15.2			
荷重* (kg)	ひび割れ発生	破壊	ひび割れ発生	破壊	ひび割れ発生	破壊
供試体番号	1	2	3	4	5	6
1	—	720	2850	5700	2295	9775
2	—	645	2300	5175	2225	10725
3	—	725	2300	5450	2700	9950
平均	—	697	2500	5440	2405	10150

* 荷重 (kg) は同じくける P の値である。

する。

③ フレパックド・コンクリートの圧縮強度は、曲げ強度および引張強度係数の、それぞれ $51 \sim 74$ 倍および $10.1 \sim 11.5$ 倍である。これは、普通コンクリートの場合に一般に認められている値⁴⁾ ($5 \sim 8.7$ 倍および $10 \sim 13$ 倍) の範囲内にある。

④ フレパックド・コンクリートの材齢による強度の増加は、材齢 7 日と 28 日とを比較すると、圧縮強度 $151 \sim 187$ 倍、曲げ強度 $140 \sim 146$ 倍、引張強度係数 $1.29 \sim 1.59$ 倍であり、曲げ強度と引張強度係数は、普通コンクリートの場合と同様に圧縮強度ほど増加していない。また、圧縮強度の増加率は、普通コンクリートの場合 ($1.33 \sim 1.97$ 倍)⁵⁾ とほぼ一致する。

(2) フレパックド・コンクリートはりについて (普通コンクリートはりで仮定して計算)

① No. 1 無筋はりの曲げ強度および圧縮強度 (曲げ試験断片から採取した圧試体による) は、同じ養生状態の $15 \times 15 \times 53$ cm 供試体のそれの、それぞれ 84% および 72% 程度である。

② No. 2 鉄筋はりは、斜引張応力によって破壊したが、そのひび割れは主鉄筋の方向に対してほぼ 45° の傾斜をなし、3 等分梁の中央スパンにおいてはほとんど垂直であり、腹鉄筋のない鉄筋コンクリートはりには一般に認められているものと相違がない。このコンクリートのせん断強度では、 $\tau = S/bjd = 5450/15 \times 0.801 \times 27.7 = 16.4 \text{ kg/cm}^2$ である。 $200 \text{ kg/cm}^2 \leq \sigma_{cs} < 240 \text{ kg/cm}^2$ の普通コンクリートの許容せん断応力度は 6.5 kg/cm^2 であるので、この場合安全率は 2.5 である。土木学会の鉄筋コンクリート示方書は、腹鉄筋のないはりについて、計算せん断応力度 $14 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$ に対して $4.5 \sim 7 \text{ kg/cm}^2$ を許容値とし、その安全率は約 3 である。上記の計算式を用いてせん断応力度を推定する限りでは、本試験に用いたはりのせん断強度はやや小さいように思われる。

③ No. 3 鉄筋はりは、3 等分梁の中央スパンにおいてコンクリートの圧縮によって破壊し、最大曲げモーメント M は、 $M = Pl/3 + 8L^2/8 = 10150 \times 165/3 + 1.08 \times 165^2/8 = 561925 \text{ kg-cm}$ である。極限設計法として提案されている次の諸式を用いて、本はりの極限抵抗モーメント M_u を計算すると次のようになる。

$$M_u = \sigma_{cs} b d^2 \eta (1 - 0.59 \eta) = 165 \times 15 \times 25.7^2 \times 0.362 (1 - 0.59 \times 0.362) = 465377 \text{ kg-cm}$$

$$M_u = \sigma_{cs} b d^2 \eta (1 - \frac{k_1}{6.18} \eta) = 165 \times 15 \times 25.7^2 \times 0.362 (1 - 0.56 \times 0.362) = 472660 \text{ kg-cm}$$

また、従来の鉄筋コンクリート理論 (弾性理論に基づく計算方法) の次式を用いて計算すると次のようになる。

$$M_u = \sigma_{cs} k_j b d^2 / 2 = 165 \times 0.681 \times 0.773 \times 15 \times 25.7^2 / 2 = 430267 \text{ kg-cm} \quad (\sigma_{cs} A_s j d = 2900 \times 7.96 \times 0.773 \times 25.7 = 458589 \text{ kg-cm})$$

従って、実際の抵抗モーメントは、計算値の $1.19 \sim 1.31$ 倍であり、安全側にある。

④ No. 2 および No. 3 はりの亀裂モーメント M_2 および M_3 は、それぞれ $M_2 = Pl/3 + 8L^2/8 = 2500 \times 165/3 + 1.08 \times 165^2/8 = 141175 \text{ kg-cm}$ および $M_3 = Pl/3 + 8L^2/8 = 2415 \times 165/3 + 1.08 \times 165^2/8 = 135950 \text{ kg-cm}$ である。塑性理論による次式を用いて、それぞれの亀裂モーメント M_2 および M_3 を計算すると次のようになる。

$$M_2 = p b L^2 \sigma_{ct} + 1.5 A_s E_{ct} d = 0.255 \times 15 \times 30^2 \times 20.2 + 1.5 \times 3.98 \times 253 \times 27.7 = 111377 \text{ kg-cm}$$

$$M_3 = p b L^2 \sigma_{ct} + 1.5 A_s E_{ct} d = 0.255 \times 15 \times 30^2 \times 18.4 + 1.5 \times 7.96 \times 260 \times 25.7 = 143125 \text{ kg-cm}$$

また、従来の鉄筋コンクリート理論 (コンクリートの引張力を考慮) の次式を用いて計算

すると次のようになる。

$$M'_2 = k_f b d^2 \sigma_{cb} / 2 = 0.596 \times 0.801 \times 15 \times 27.7^2 \times 22.8 / 2 = 62638 \text{ kg-cm}$$

$$M'_3 = k_f b d^2 \sigma_{cb} / 2 = 0.681 \times 0.773 \times 15 \times 25.7^2 \times 19.9 / 2 = 51893 \text{ kg-cm}$$

従って、No.2およびNo.3ばりの実際の亀裂モーメントは、計算値の、それぞれ1.27~2.25倍および0.95~2.62倍である。

⑤ No.3ばりの破壊時ににおける断面の中立軸の位置を、ひび割れ状態から推定し圧縮縁維から13.1 cmとすると、コンクリートの縁維曲げ圧縮応力度 σ_{cc} は、次のように計算される。

$$\sigma_{cc} = 2M / k_f b d^2 = 2 \times 561925 / 0.510 \times 0.830 \times 15 \times 25.7^2 = 268 \text{ kg/cm}^2$$

この値は、同じ養生状態の $\phi 15 \times 30 \text{ cm}$ および $\phi 15 \times 53 \text{ cm}$ コンクリート供試体の圧縮強度の、それぞれ1.62倍および1.14倍である。

§5 結言

本実験は一連の研究計画の最初の段階にあるので、明確な結論を導く事は困難であるが、今までに得られた試験結果は、鉄筋フレパックス・コンクリートばりの設計に際して、これを普通の鉄筋コンクリートばりとして計算する事に大きな誤りがない事、を示唆するものと考えられる。また、供試体の形状寸法の相違による強度の相違に因しては、フレパックス・コンクリートを普通コンクリートと同様に取り扱って差しつかえないもののようなのである。

参考文献

1) 赤塚雄三, 佐藤孝一, “港湾フレパックス・コンクリート構造物施工別集覧,” 港湾技術研究所資料に発表予定。

2) 赤塚雄三, 有吉保彦, “フレパックス・コンクリートの圧縮強度試験用供試体製作方法に関する実験的研究,”

赤塚雄三, “注入モルタルの試験方法に関する研究,” 港湾技術研究所報告, 2巻, 1号, 1963年6月。

3) Gonneman, H.F., “Effect of Size and Shape of Test Specimen on Compressive Strength of Concrete,” *Proc. of A.S.T.M., Part II*, 1925.

4) 大とえは, 福田武雄, “鉄筋コンクリート理論,” 山海堂KK, 昭和13年版, p. 79, 84.

5) 大とえは, 吉田徳次郎, “コンクリートおよび鉄筋コンクリート施工方法,” 丸善KK, 昭和32年版, pp. 527~528.

6) ACI-ASCE Committee 327, “Ultimate Strength Design,” *Journal of A.C.I.*, Vol. 27, No. 5, Jan. 1956.

Whitney, C.S., “Plastic Theory of Reinforced Concrete Design,” *Proc. of A.S.C.E.*, Vol. 66, No. 10, Dec. 1940.

7) Alan H. Matlock, Ladislav B. Kriz, and Eivind Hognestad, “Rectangular Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design,” *Journal of A.C.I.*, Vol. 32, No. 8, Feb. 1961.

8) 山田順治, “塑性理論を応用した鉄筋コンクリート部材の破壊理論,” 土木学会論文集, 4号, 昭和24年6月, より引用。