

鉄筋コンクリートボール用ヘリカル角鋼に関する実験

正員 北海道大学工学部 教授 工博 横 道 英 雄
 正員 北海道大学大学院工学研究科 藤 田 嘉 夫
 正員 北海道ピー・エス・コンクリート株式会社 海 上 世 志 雄

I. 概 説

本実験は北海道ピー・エス・コンクリート株式会社の依頼により、昭和33年5、6月に実施したものである。

遠心力鉄筋コンクリートボールの主鉄筋としては一般に丸鋼が使用されているが、これに異形鋼を使用すれば、ボールのひびわれ、破壊およびひびわれ発生状況などは有利になると考えられる。これは異形鋼が丸鋼に比して付着力大であるため鉄筋が有効に働きひびわれ発生間隔が狭く、したがって、ひびわれの幅は小さく数が多くなる。また、ひびわれは荷重の増加に従って成長するが、その割合は小さくひびわれ数が増加する。これに対し丸鋼では付着力が小であるためひびわれ数は少なく、荷重の増加に従ってひびわれ数の増加する割合も少なく少数のものに集中して成長し、ひびわれ幅は大になる。したがって、丸鋼使用の場合は大きなひびわれの位置に力が集中して作用するのに対し、異形鋼使用の場合は力が分散して作用するので有利になると考えられる。

異形鋼としては各種あるが、本実験では従来から使用の丸鋼と同等の力学的性質を有し、角鋼を捩った形状の Helical Square Bar (北日本鋼機工業株式会社製、以後 H 角鋼と記す) につき、下記のような試験を行い、その優位性を比較検討した。

試験項目： 鉄筋引張試験、付着強度試験、桁の曲げ試験

桁の曲げ試験はボールについて行えば直接比較ができて好都合であるが、実験装置および測定上の諸点について問題となる点が多く、比較的計算理論が明確であり、ボールに近い性状を示すと考えられる I 形桁について試験を行つた。

II. 鉄筋引張試験

1. 試験方法

H 角鋼は断面 4.98×4.98 mm、断面積 24.0 mm²、捩りのピッチは公称 100 mm であつて、 $\phi 6.3$ mm の母材を、タイスを廻転しながら冷間加工したものである。丸鋼は $\phi 5.56$ mm、断面積 24.3 mm² の普通鉄筋である。試験片は JIS Z 2201 9号試験片とし、H 角鋼6本、丸鋼6本の計12本とした。

試験方法は JIS Z 2241 に従い、耐力 ($\epsilon = 0.2\%$)、引張強さ、伸び (標点距離 200 mm) および応力・歪曲線求めた。歪の測定はヘリー式ストレンゲーンを用いて測定した。

2. 試験結果

試験結果は表-1 および図-1 のとおりで、H 角鋼には捩りによる加工効果の影響は認められず、両者の力学的性質は同等であつた。

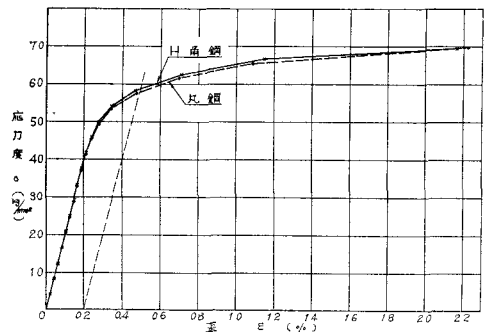


図-1 H 角鋼および丸鋼の応力・歪曲線

表-1 H 角鋼および丸鋼の引張試験成績 (6本の平均)

種 類	寸 法 (mm)	断 面 積 (mm ²)	耐 力 ($\epsilon = 0.2$)		引 張 強 さ		伸 び (%)	ヤング率 (kg/cm ²)
			荷 重 (kg)	応 力 度 (kg/mm ²)	荷 重 (kg)	応 力 度 (kg/mm ²)		
H 角 鋼	4.98×4.98	24.0	1,409	58.7	1,667	69.5	3.7	2.0×10^6
丸 鋼	$\phi 5.56$	24.3	1,409	58.0	1,693	69.9	3.4	2.0×10^6

III. 付着強度試験

1. 試験方法

供試体は $\phi 10 \times 20$ cm の型枠の中心に H 角鋼または丸鋼をそれぞれ 20, 15, 10 cm 垂直に入れてコンクリートを打設し製作した。供試体の本数は鉄筋埋込長 1 種につき 6 本、計 36 本とし、材齢 7 日および 28 日で試験を行った。養生は標準養生とした。

コンクリートの配合は $\sigma_{28} = 450 \text{ kg/cm}^2$ 以上を予定して、単位セメント量 460 kg, 単位水量 184 kg, $W/C = 40\%$, 単位細骨材量 640 kg, 単位粗骨材量 1,180 kg とし、アサノベロセメント、梶川産砂比重 2.72, 富川産砂比重 2.74 (最大寸法 20 mm) を使用した。

試験方法は引抜試験とし、付着強度の計算は最初にすれを生じた時の荷重および最大荷重を、丸鋼の場合は付着面積で割り、H 角鋼の場合は等断面積の丸鋼に換算して算出した。

2. 試験結果

試験結果は表-2 のとおりである。丸鋼の付着力は最初にすれを生じた時と最大 (滑動抵抗) と差はなく、鉄筋の滑動による抵抗は認められなかった。これに対し H 角鋼では最大付着力 (滑動抵抗) は付着強度の約 2 倍の値を示し、付着を失ってから鉄筋の滑動によって大きく抵抗することがわかった。

H 角鋼と丸鋼を比較すると、H 角鋼は丸鋼より、最初にすれを生じた時の付着強度で 1.11 倍以上、最大付着力で 2.77 倍以上の値を示した。付着強度については、H 角鋼は最初振られた面に沿ってすれを生じ、丸鋼に比してそれほど高い値を示さないが、最大付着力については、H 角鋼はコンクリートに対し楔のように作用して滑動し

丸鋼に比して著しく大になったと考えられる。

IV. 桁の曲げ試験

1. 試験桁

桁は図-2 のように I 形断面、支間 150 cm, 桁長 170 cm とし、H 角鋼使用のもの (以後 H 桁と記す) 4 種、丸鋼使用のもの (以後 R 桁と記す) 4 種の計 8 種とし、1 種につきそれぞれ 3 本計 24 本とした。鉄筋はフックを有するものおよび鉄筋の付着力の影響を調べるため特にフックの無いものの 2 種とし、鉄筋量は桁破壊時の鉄筋の歪が約 1% および 2% になるように 2 種とし、いずれもコンクリートの圧縮により桁が破壊するようにした。桁の配筋は図-2 のとおりで、スターランプには $\phi 6$ mm の普通鉄線を使用し剪断力に対して補強した。

コンクリートの配合は、ボールと同様単位セメント量 460 kg, 単位水量 184 kg, $W/C = 40\%$, 単位細骨材量 750 kg, 単位粗骨材量 1,050 kg とし、試験時のコンクリートの圧縮強度が 450 kg/cm^2 以上になるようにした。材料は、磐城普通ポルトランドセメント、富浦産砂比重 2.73, 静内産砂比重 2.65 (最大寸法 10 mm) を使用した。コンクリートの打設は 1 層に行い、棒状パイプレータで十分に締め固め、配筋の同一である H 桁および R 桁各 3 本の計 6 本を同一日に製作した。

養生はボールと同様に行い、コンクリート打設後 2 時間以上経過してから蒸気養生を開始し、養生室の温度は最初の 1 時間で 30°C , 次の 1 時間で 45°C , 次の 1 時間で 60°C に上げ、 60°C で 5 時間継続した後徐々に常温まで下げ脱型し、其の後 $16 \sim 21^\circ\text{C}$ の水中養生とした。H は材齢 8 日で水中から取出し、室内に放置して乾燥させ、材齢 11 日で試験を行った。

表-2 H 角鋼と丸鋼の付着強度の比較

材 齢 (日)	埋込長 (cm)	種 類	最初にすれを生じた時				最 大 時				備 考
			応 力 度		応力度の比		応 力 度		応力度の比		
			鉄 筋 (kg/mm ²)	付 着 (kg/cm ²)	鉄筋	付着	鉄 筋 (kg/mm ²)	付 着 (kg/cm ²)	鉄 筋	付 着	
7	20	H角鋼丸 鋼	— 25.0	— 17.6	—	—	69.5* 25.0	48.0以上 17.6	2.78	2.73以上	最大で鉄筋破断
	15	H角鋼丸 鋼	29.3 23.9	26.9 21.3	1.23	1.26	70.3* 23.9	64.8以上 21.3	2.94	3.04以上	最大で鉄筋破断
	10	H角鋼丸 鋼	19.8 17.2	26.1 22.3	1.15	1.17	48.6 17.2	63.9 22.3	2.82	2.87	
28	20	H角鋼丸 鋼	34.4 31.3	24.5 22.0	1.10	1.11	71.1* 31.3	50.3以上 22.0	2.27	2.29以上	最大で鉄筋破断
	15	H角鋼丸 鋼	33.2 25.8	30.0 23.3	1.29	1.29	72.2* 25.8	64.7以上 23.3	2.88	2.78以上	最大で鉄筋破断
	10	H角鋼丸 鋼	29.0 19.2	39.5 25.7	1.51	1.54	52.3 19.2	71.2 25.7	2.73	2.77	

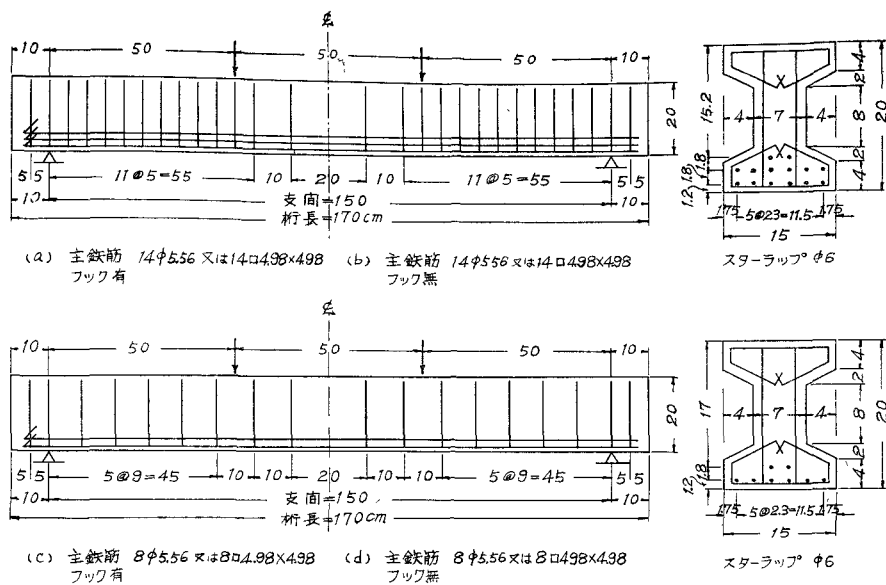


図-2 試験桁の寸法および配筋

2. 試験方法

桁の曲げ試験は支間 150 cm, 3 等分 2 点荷重とし, 中央断面の歪, 支間中央の撓み, ひびわれ荷重 (ひびわれを肉眼で発見したときの荷重), 破壊荷重, 最大ひびわれ幅が 0.25 mm に達したときの荷重および荷重を除いた時の残留ひびわれ幅およびひびわれの発生状況などを測定した。

同種の桁 3 本中 2 本は最大ひびわれ幅が 0.25 mm に達した時 1 回荷重を 0 に戻す以外は破壊まで直線的に載荷し, 他の 1 本は 2 屯ごとの繰返し荷重とした。歪, 撓みは荷重 1 屯ごとに測定し, 各荷重におけるひびわれ発生状況は直接桁の側面に記入したが, 特にフックの無い桁については, 鉄筋 8 本使用の桁で 3, 6, 9 屯, 鉄筋 14 本使用の桁で 4, 8, 12 屯におけるひびわれの発生位置, 長さ, 幅を測定した。

3. 試験結果

試験結果は次に述べるとおりであるが, 同種の桁 3 本について, 載荷方法による差異は特に認められなかつたので, 桁 3 本の平均の結果について検討を加える。

(1) ひびわれ荷重および破壊荷重

桁の曲げ試験結果の比較は 表-3 のとおりであるが, この値は荷重そのものを比較したのであつて, 鉄筋量および, 製作上の桁断面寸法の差異による影響を調べるため, 桁の破壊曲げモーメントを塑性理論によつて計算した値を基準にして比較してみた (表-4)。

計算方法はコンクリートの圧縮応力・歪曲線を 図-3(a) のように考え, 鉄筋の実際の応力・歪曲線 図-3(b) を用い, 桁の応力状態は 図-3(c) のようになつて曲げ破壊時の平衡状態を保つと考え, 桁がコンクリートで破壊する状態では,

表-3 桁の曲げ試験成績の比較

桁 番 号	種 類	ひびわれ荷重		破 壊 荷 重		最大ひびわれ巾 0.25 mm の荷重	
		P_{cr} (t)	比 (H/R)	P_b (t)	比 (H/R)	$P_{0.25}$ (t)	比 (H/R)
H-1, 2, 3	H角鋼14本フック有	3.0		16.6		15.0	
R-1, 2, 3	丸鋼 " "	3.0	1.00	16.3	1.02	12.0	1.25
H-4, 5, 6	H角鋼 8 本フック有	2.2		13.0		7.3	
R-4, 5, 6	丸鋼 " "	1.9	1.16	10.4	1.25	6.3	1.16
H-7, 8, 9	H角鋼 8 本フック無	2.4		12.4		7.7	
R-7, 8, 9	丸鋼 " "	2.1	1.14	10.1	1.23	6.7	1.15
H-11, 12	H角鋼14本フック無	3.0		17.0		13.0	
R-10, 11, 12	丸鋼 " "	2.8	1.07	13.2	1.29	10.0	1.30

表-4 計算値を基準にした桁の破壊曲げモーメントの比較

桁番号	コンクリート圧縮強度 (kg/cm^2)	上部フランジ巾 b (cm)	有効高 d (cm)	鉄筋比 $p = \frac{A_s}{bd}$ (%)	破壊曲げモーメント ($\text{t}\cdot\text{m}$)		比	
					実験	計算	実験/計算	H/R
H-1, 2, 3	473	15.2	17.71	1.248	4.18	3.56	1.17	1.01
R-1, 2, 3		15.2	17.71	1.264	4.12	3.56	1.16	
H-4, 5, 6	478	15.2	18.65	0.677	3.29	2.35	1.40	1.25
R-4, 5, 6		15.2	18.55	0.689	2.66	2.36	1.12	
H-7, 8, 9	449	15.0	18.65	0.686	3.15	2.32	1.35	1.24
R-7, 8, 9		15.1	18.65	0.690	2.57	2.35	1.09	
H-11, 12	457	15.0	17.91	1.251	4.29	3.56	1.20	1.28
R-10, 11, 12		15.0	17.91	1.266	3.35	3.56	0.94	

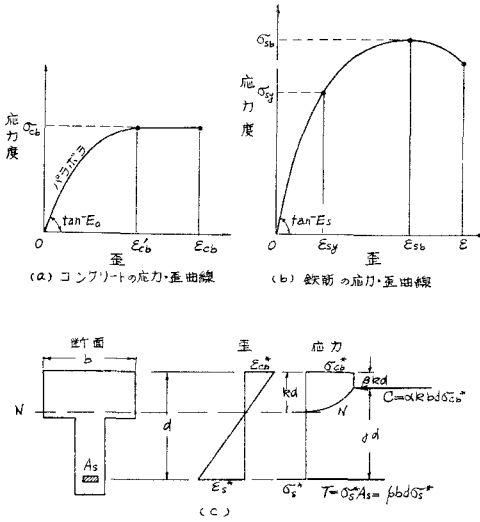


図-3 桁破壊時の断面応力状態

図-3 より

$$C = akbd\sigma_{cb}^* \quad (1)$$

$$T = A_s\sigma_s^* = pbd\sigma_s^* \quad (2)$$

$C = T$ より

$$\frac{ak}{p} = \frac{\sigma_s^*}{\sigma_{cb}^*} \quad (3)$$

ここに

$$\left. \begin{aligned} k &= \frac{\epsilon_{cb}^*}{\epsilon_{cb}^* + \epsilon_s^*}, \quad r = \frac{\epsilon_{cb}^*}{\epsilon_{cb}^*} \\ \alpha &= 1 - \frac{r}{3}, \quad \beta = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{r} + \frac{r^2}{12} \right) \\ j &= 1 - \beta k \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$M_B = akjbd^2\sigma_{cb}^* \quad \text{または} \quad jpbd^2\sigma_s^* \quad (5)$$

上式において、 M_B =破壊曲げモーメント、 σ_{cb}^* =コンクリートの圧縮強度、 σ_s^* =鉄筋の引張応力度、 ϵ_{cb} =桁のコンクリートの曲げ圧縮破壊歪、 ϵ_{cb}^* =標準供試体の圧縮破壊歪、 ϵ_s^* =鉄筋の引張歪であつて、これまでの実験によ

ると $\epsilon_{cb} = 0.24 + 0.0001 \sigma_{cb}$, $r = 0.6$, $\alpha = 0.8$, $\beta = 0.41$ である。破壊曲げモーメントは (3) 式および (4) 式の第 1 式と鉄筋の実際の応力・歪曲線の関係から k を求め計算できる。

両表の比較値はほとんど同じ値を示している所以他についても表-3 から考察を行う。ひびわれ荷重については、H 桁は R 桁に対し、鉄筋量多くフックを有するものでは 1.07 倍、鉄筋量の少ないものではフックの有無に関せず 1.15 倍程度の値を示した。破壊荷重についても同様の傾向を示し、鉄筋量の少ないものおよび鉄筋量が多くてもフックの無いものでは差が著しく、H 桁は R 桁の 1.23~1.29 倍の値を示した。最大ひびわれ幅 0.25 mm の荷重についてはいずれも H 桁の方が大なる値を示したが、ひびわれ幅の残留については特に顕著は認められずいずれも 0.05 mm 程度であつた。

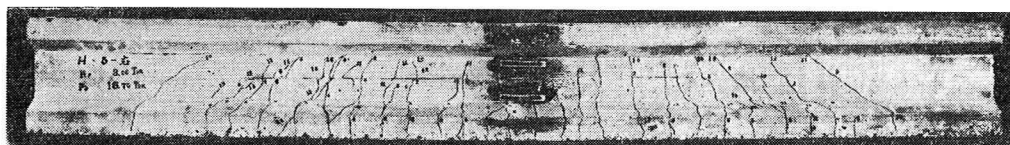
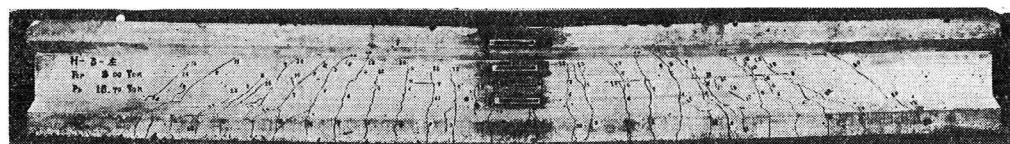
(2) ひびわれ発生状況

桁破壊時におけるひびわれ発生状況の一例を示すと写真-1~4 のとおりである。

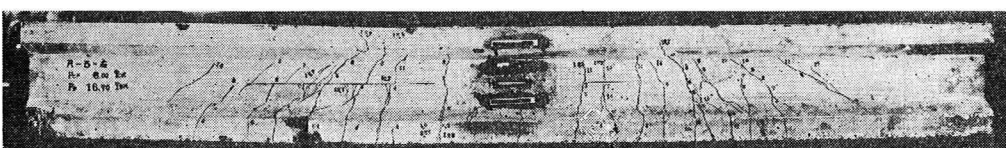
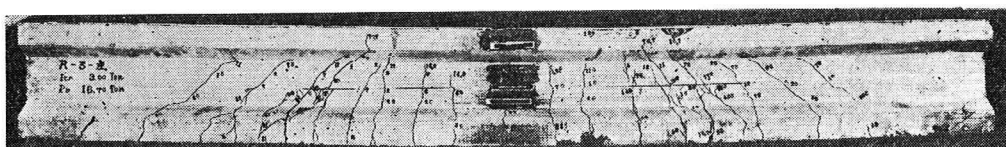
各荷重ごとのひびわれ発生状況をフック無しの桁について示すと表-5 のとおりであつて、荷重の小さい間は H 桁、R 桁とも大差ないが、荷重の増加にともない H 桁は R 桁に比してひびわれの本数は増すが、ひびわれの最大幅およびひびわれ幅の合計は小となつた。また、破壊付近で R 桁には集中的に大きく成長するひびわれが認められ、特にフックの無い桁およびフックがあつても鉄筋量の少ない桁に著しかつたが、H 桁ではそのような傾向は認められなかつた。さらに、フックの有る R 桁では破壊付近で桁端のフックの部分にひびわれを生じたが、これは丸鋼の付着力が小なるためフックに応力の応申したことを示すものである。また、フック無しの桁ではこの種のひびわれは生じなかつたが、内部で鉄筋が滑つてゐることは当然考えられることである。一方 H 桁にはこの種のひびわれは認められなかつた。

(3) 桁中央断面の歪

結果の一例を示すと図-4 のとおりであつて、特に桁



(a) H-3 桁 (ひびわれ荷重 3.0 ton, 破壊荷重 16.7 ton)

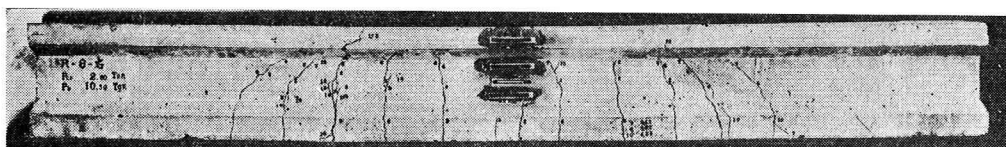
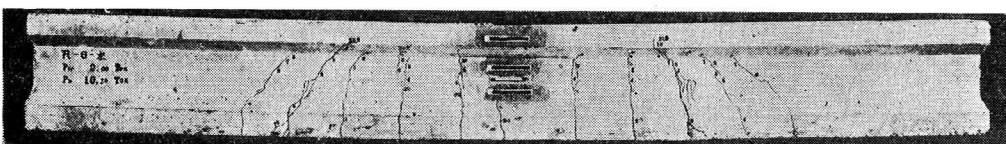


(b) R-3 桁 (ひびわれ荷重 3.0 ton, 破壊荷重 16.7 ton)

写真-1 主鉄筋 14 本, フック有

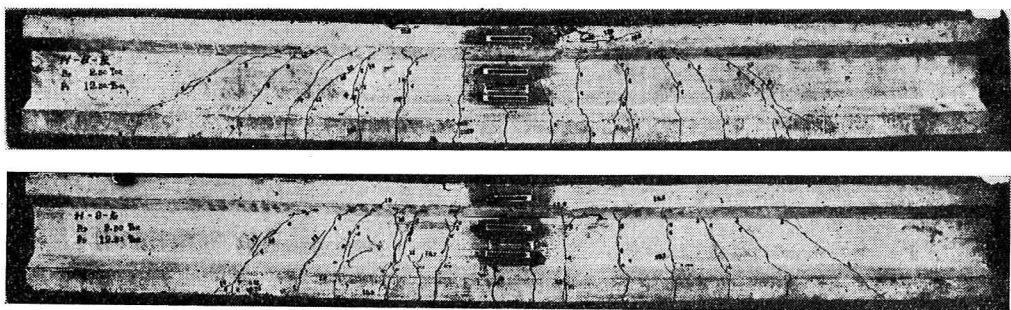


(a) H-6 桁 (ひびわれ荷重 2.0 ton, 破壊荷重 13.0 ton)

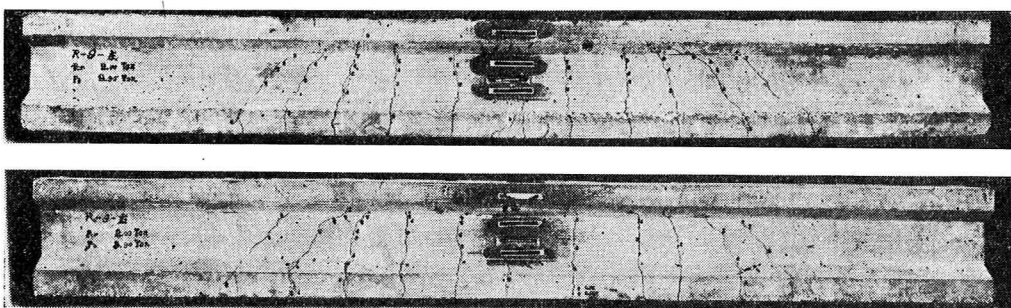


(b) R-6 桁 (ひびわれ荷重 2.0 ton, 破壊荷重 10.3 ton)

写真-2 主鉄筋 8 本, フック有

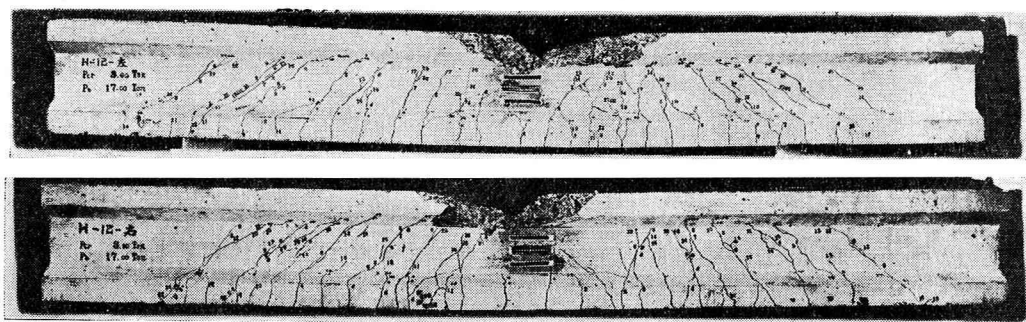


(a) H-9 桁 (ひびわれ荷重 2.3 ton, 破壊荷重 12.3 ton)

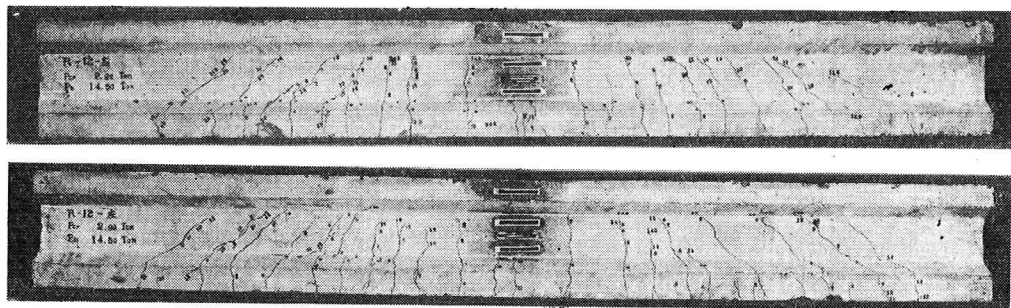


(b) R-9 桁 (ひびわれ荷重 2.0 ton, 破壊荷重 9.9 ton)

写真-3 主鉄筋 8, フック 無



(a) H-12 桁 (ひびわれ荷重 3.0 ton, 破壊荷重 17.0 ton)

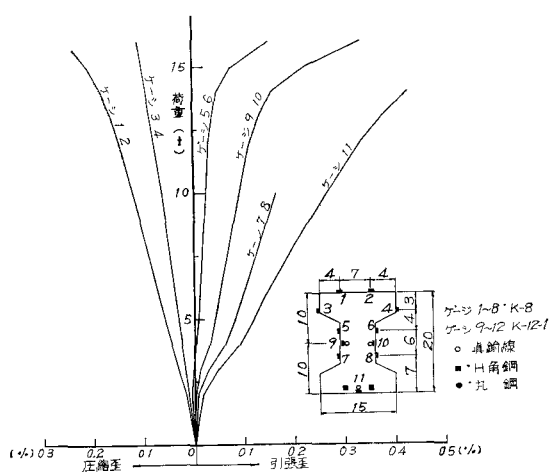


(b) R-12 桁 (ひびわれ荷重 2.9 ton, 破壊荷重 14.5 ton)

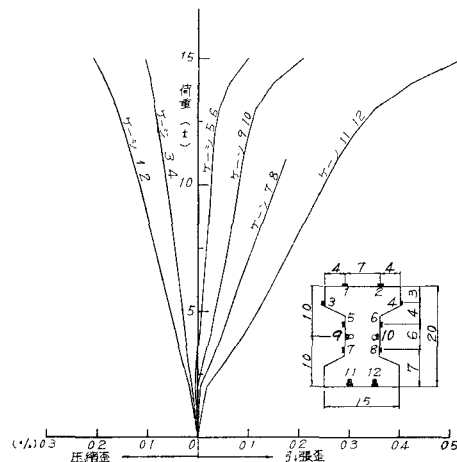
写真-4 主鉄筋 14 本, フック 無

表-5 ひびわれ発生状況

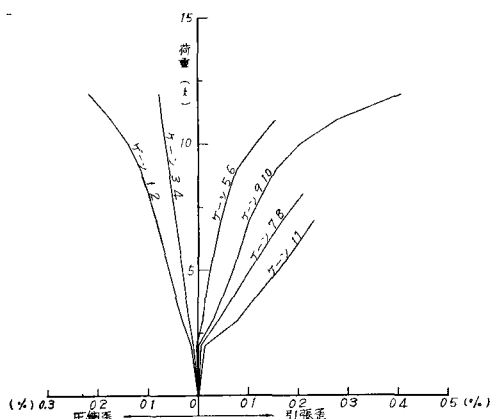
桁番号	種 類	桁面	本数	ひびわれ巾		本数	ひびわれ巾		本数	ひびわれ巾		わび れ本数	荷 重 (t)	ひびわれ 荷 重 (t)
				最大 (mm)	合 計 (mm)		最大 (mm)	合 計 (mm)		最大 (mm)	合 計 (mm)			
荷 重			3 t			6 t			9 t			破 壊		(t)
H-8	H角鋼 8 本 フック 無	左右 計	6	0.05	0.30	13	0.15	1.18	14	0.27	2.53	16	12.85	
			5	0.05	0.225	12	0.15	1.35	14	0.35	2.85	15		
			11	0.10	0.525	25	0.30	2.53	28	0.62	5.38	31		
R-8	丸 鋼 8 本 フック 無	左右 計	8	0.05	0.37	12	0.30	1.75	13	0.30	2.90	14	10.5	2.0
			9	0.05	0.35	13	0.20	1.475	14	0.325	2.75	15		
			17	0.10	0.72	25	0.50	3.225	27	0.625	5.65	29		
荷 重			4 t			6 t			12 t			破 壊		(t)
H-11	H角鋼14本 フック 無	左右 計	11	0.05	0.43	20	0.10	1.34	24	0.15	2.22	31	17.0	
			7	0.05	0.225	18	0.10	1.135	21	0.20	1.995	24		
			18	0.10	0.655	38	0.20	2.475	45	0.35	4.215	55		
R-11	丸 鋼 14 本 フック 無	左右 計	6	0.08	0.305	14	0.20	1.345	21	0.30	2.79	22	12.75	2.95
			6	0.075	0.25	18	0.10	1.165	22	0.30	2.575	23		
			12	0.155	0.555	32	0.30	2.51	43	0.60	5.365	45		



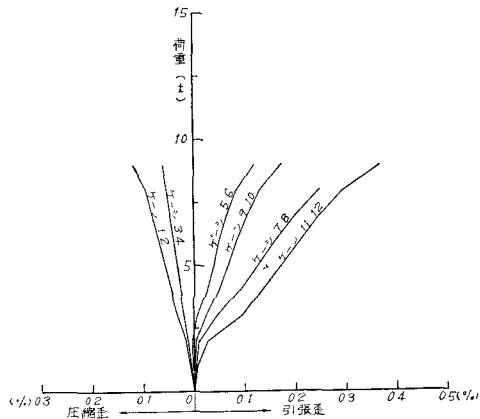
(a) H角鋼 14 本, フック 有



(b) 丸鋼 14 本, フック 有

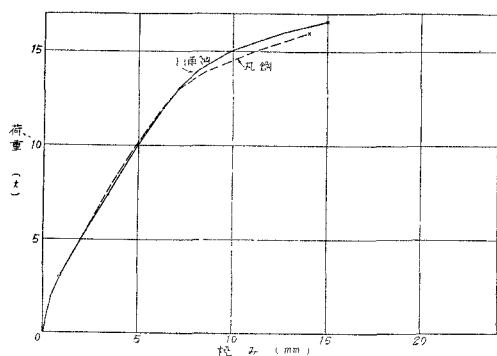


(c) H角鋼 8 本, フック 無

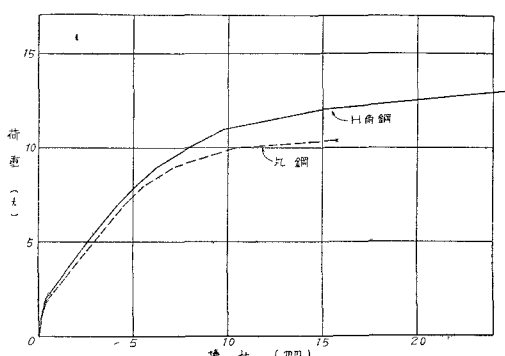


(d) 丸鋼 8 本, フック 無

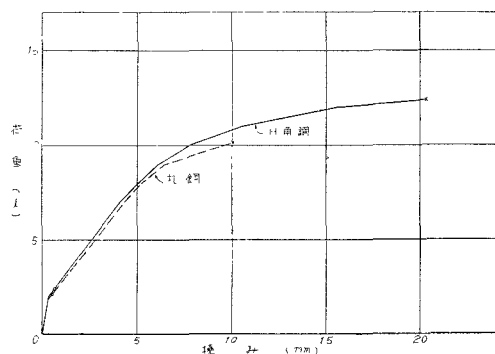
図-4 中央断面の荷重・歪曲線の一例



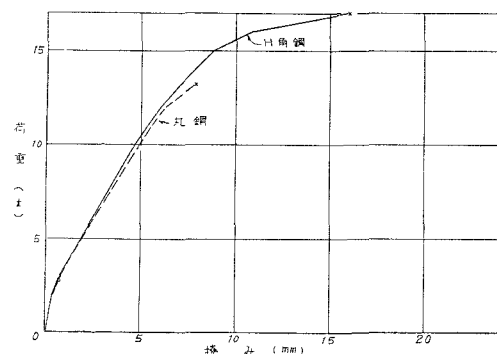
(a) 鉄筋 14 本, フック有



(b) 鉄筋 8 本, フック有



(c) 鉄筋 8 本, フック無



(d) 鉄筋 14 本, フック無

図-5 支間中央の撓み

の上縁のコンクリート曲げ圧縮歪について考察すると、荷重の小なる間は H 桁、R 桁とも差はなく、荷重が大になると鉄筋量多くフックを有する桁では特に差は認められないが、他の桁では、R 桁の曲げ破壊歪は H 桁に比して十分なクリープを行わないで、桁が破壊することを示し、この傾向は鉄筋量少なくフックの無い桁に著しかった。これは丸鋼の付着力が H 角鋼に比して小なるため、R 桁のひびわれが破壊付近で二、三のものに集中したためと思われる。桁の中立軸の位置については、本実験結果から明らかな差を認めることはできなかった。

(4) 支間中央の撓み

支間中央の撓み曲線は 図-5 のとおりであつて、荷重の小さい間は H 桁、R 桁ともほとんど同様の値を示した。鉄筋量多くフックの有る桁では、荷重が大になつても両者の差はほとんど認められなかつたが、鉄筋量が多くてもフックの無い桁および鉄筋量の少ない桁では、破壊荷重に近くなると R 桁の撓みは H 桁に対し多少大となるが、一方破壊時の桁のクリープは反対に H 桁の方が大きく撓みの最大値は R 桁の 2 倍程度となつた。これは R 桁は H 桁に比して脆く、破壊時の安全性からみて H 桁が有利であることを示すものであつて、丸鋼の付着力が小なるため、桁に発生したひびわれが集中的に成長し

て大となり、桁として其の点に力が集中して作用し、十分にクリープができずに破壊するためと考える。

V. 結 語

以上を総括すると、

- 1) H 角鋼の力学的性質は従来から使用の丸鋼と同等である。
- 2) H 角鋼の付着強度は丸鋼に比して大きく、最大付着力(滑動抵抗)は丸鋼の約 3 倍の値である。
- 3) 桁のひびわれおよび破壊に対し、H 角鋼は丸鋼に比して有効に働き、特に荷重が大になるに従つてその効果を表わす。したがつて、H 角鋼は丸鋼に比して有利である。
- 4) ひびわれの発生については、H 角鋼は付着力が大であるため、H 桁のひびわれ発生間隔は狭く、したがつて、本数が多く幅は小さい。また、荷重の増加にともない二、三のひびわれが特に成長する傾向はなく新たにひびわれの発生をみる。一方 R 桁はひびわれの本数少なく二、三のひびわれが集中して成長する傾向があり、特に鉄筋量が少なく、フックのない場合に著しい。
- 5) コンクリートの曲げ圧縮歪は、鉄筋量多くフックの有るものを除き、R 桁では破壊付近で二、三のひびわれ

が集中して成長するため、十分にクリープしないで桁の破壊を起す。

6) 撓みは荷量の小さい間は両者ともほとんど同等であるが、破壊時の桁のクリープは、鉄筋量多くフックを有するものを除き他の桁では、H 桁は R 桁より著しく大であつて破壊時の安全性が高い。

以上から鉄筋コンクリートポール用主鉄筋としてヘリカル角鋼を使用すれば、同一鉄筋量の丸鋼使用のポールよりひびわれ、破壊に対して有利であるばかりでなく、ひびわれ幅が小さいので耐久性に対しても有利であると考ええる。