

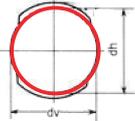
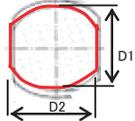
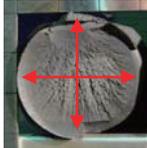
3章 実験結果

3.1 鋼材の断面積

実験結果の整理にあたり、PC 鋼材の引張強さの算出に必要な断面積について定義する。

PC 鋼棒は製造メーカーから公称断面積が提示されているが、リブや転造ねじ加工部分での破断も生じることから、公称断面積以外に破断後断面の実測値なども用いて、表-3.1 に示す断面積を定義した。(断面積にかかる実測値については、参考資料参照のこと。)

表-3.1 鋼材断面積の定義

	記号	種類	定義	備考
試験前	A1	公称断面積 (製造会社が提示している断面積)	WD (圧延総ねじPC鋼棒) リブ部分を除いた鋼材径によるの断面積の規格値。	カタログ値
			HD (熱処理総ねじPC鋼棒) 製造会社の提示する公称断面積。	カタログ値
	A2	母材一般部の実測換算断面積	WD (圧延総ねじPC鋼棒) リブ部分を除いた母材径 (dh, dvの寸法 (試験成績証の値)) から算出した値。 $A2=(dh+dv)^2 * \pi / 4$	
			HD (熱処理総ねじPC鋼棒) リブ部分を除く最大、最小の実測直径から算出 (実測は、T0-25, T0-32各代表供試体の値を採用した。) $A2=((D1+D2)/2)^2 * \pi / 4$	
試験後 実測値	A3	母材一般部	試験後の一般部の節部分を除いた、最大、最小の平均直径を用いて算出した断面積。	
	A4	破断部 (リブ部分を除く破断面の断面積)	破断部の節部分を除いた最大、最小の平均直径寸法を用いて算出した断面積。	

普通PC鋼棒 (WR, HR : ねじ加工部)

試験前	A5	有効断面積 (JIS規格による断面積)	ねじ加工部の有効断面積 (JIS B 1082) $A5= 0.7854 (d - 0.9382 P)^2$ d: おねじ外径の基準寸法 (mm) P: ねじのピッチ (mm)	JIS B 1082 (ねじの有効断面積及び座面の負荷面積) に準拠。 (呼び名M33×2の場合760.80mm ²)
試験後 実測値	A6	ねじ切り加工部の実測換算断面	破断面の最大、最小寸法の平均値を直径として、断面積を算出。	

3.2 破断荷重と引張強さ

(1) 破断荷重

破断荷重として整理したものは以下のとおりである。

P0:	規格破断荷重（製造会社の規格値（カタログ値））	(kN)
P1:	実測破断荷重（ロードセルの読み値）	(kN)
P3:	試験成績証から算出した破断荷重	(kN)

(2) 引張強さ

引張強さとして算出したものは以下のとおりである。

σ_1 , σ_2 は、総ねじ PC 鋼棒および普通 PC 鋼棒の母材部で破断したケースに適用する。

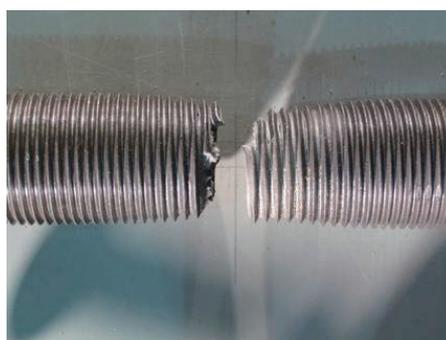
σ_3 は、普通 PC 鋼棒の転造ねじ加工部で破断したケースの引張強さを算出する際に適用する。

σ_1 :	実測引張強さ = $P1 / \text{公称断面積 (A1)}$	(N/mm ²)
σ_2 :	実測換算引張強さ = $P1 / \text{実測換算断面積 (A2)}$	(N/mm ²)
σ_3 :	ねじ部換算引張強さ = $P1 / \text{ねじ部有効断面積}^* \text{ (A5)}$	(N/mm ²)
σ_0 :	規格引張強さ = $P0 / \text{公称断面積 (A1)}$	(N/mm ²)

※ ねじ部有効断面積：普通 PC 鋼棒端部の転造ねじ加工部の有効断面積は、JISB 1082「ねじの有効断面積及び座面の負荷面積」に準じた値とする。この有効断面積は、ボルト等のおねじ部の応力計算に用いられる値である。



母材部の破断状況



ねじ部の破断状況

写真-3.1 母材部とねじ部の破断の例

なお、試験後の断面積は絞りの程度を把握するため、A3, A4, A6 を設定して断面積を算出したが、これらと関連づけた引張強さの算出は実施していない。

3.3 実験結果

3.3.1 結果一覧

試験結果の一覧をシリーズ毎に表-3.1～表-3.3 に示す。

① 圧延 総ねじ PC 鋼棒 (WD シリーズ)

表-3.2 WD シリーズ

試験名称		P0	P1	破壊位置 ○母材部 ●ねじ部	$\sigma 1$	$\sigma 2$	$\sigma 3$	(参考値)	
		規格 破断 荷重	実測 破断 荷重		母材部		ねじ加工部	試験 成績証 破断荷重	絞りの 有無 ■有 □無
		(kN)	(kN)		P1/A1	P1/A2	P1/A5		
					(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(kN)	
WD-T0-26	-1	573	635.5	○	1197.0	1224.0	-	623.5	■
	-2		-	-	-	-	-		-
	-3		-	-	-	-	-		-
	平均値		635.5		1197.0	1224.0	-		
WD-T1-26	-1	573	270.6	○	509.7	521.2	-		□
	-2		259.1	○	488.0	499.0	-		□
	-3		309.3	○	582.6	595.7	-		□
	平均値		279.7		526.7	538.6	-		
WD-B0-26	-1	573	647.4	○	1219.4	1246.9	-		■
	-2		631.3	○	1189.0	1215.9	-		■
	-3		618.0	○	1164.0	1190.3	-		■
	平均値		632.2		1190.8	1217.7	-		
WD-B1-26	-1	573	44.6	○	84.0	85.9	-	□	
	-2		37.7	○	71.0	72.6	-	□	
	-3		39.1	○	73.6	75.3	-	□	
	平均値		40.5		76.2	77.9	-		
WD-T0-32	-1	869	951.2	○	1182.7	1215.4	-	■	
	-2		-	-	-	-	-	-	
	-3		-	-	-	-	-	-	
	平均値		951.2		1182.7	1215.4	-		
WD-T1-32	-1	869	543.7	○	676.0	694.7	-	□	
	-2		532.9	○	662.6	680.9	-	□	
	-3		494.2	○	614.5	631.5	-	□	
	平均値		523.6		651.0	669.1	-		
WD-B0-32	-1	869	925.4	○	1150.6	1182.5	-	■	
	-2		894.6	○	1112.3	1143.1	-	■	
	-3		895.9	○	1114.0	1144.8	-	■	
	平均値		905.3		1125.6	1156.8	-		
WD-B1-32	-1	869	64.9	○	80.7	82.9	-	□	
	-2		58.9	○	73.2	75.3	-	□	
	-3		77.8	○	96.7	99.4	-	□	
	平均値		67.2		83.6	85.9	-		

② 熱処理 総ねじ PC 鋼棒 (HD シリーズ)

表-3.3 HD シリーズ結果一覧

試験名称		P0	P1	破壊位置 ○母材部 ●ねじ部	$\sigma 1$	$\sigma 2$	$\sigma 3$	(参考値)	
		規格 破断 荷重 (kN)	実測 破断 荷重 (kN)		母材部		ねじ加工部	試験 成績証 破断荷重 (kN)	絞りの 有無 ■有 □無
					P1/A1 (N/mm ²)	P1/A2 (N/mm ²)	P1/A5 (N/mm ²)		
HD-T0-25	-1	548	584.9	○	1154.3	1244.7	-	583.0	■
	-2		-	-	-	-	-		-
	-3		-	-	-	-	-		-
	平均値		584.9		1154.3	1244.7	-		
HD-T1-25	-1	548	541.6	○	1068.9	1152.6	-		□
	-2		528.8	○	1043.6	1125.4	-		□
	-3		545.8	○	1077.2	1161.5	-		□
	平均値		538.7		1063.2	1146.5	-		
HD-B0-25	-1	548	586.2	○	1156.9	1247.5	-		■
	-2		586.7	○	1157.9	1248.6	-		■
	-3		584.4	○	1153.3	1243.7	-		■
	平均値		585.8		1156.0	1246.6	-		
HD-B1-25	-1	548	386.6	○	763.0	822.7	-	□	
	-2		406.8	○	802.8	865.7	-	□	
	-3		357.6	○	705.7	761.0	-	□	
	平均値		383.7		757.2	816.5	-		
HD-T0-32	-1	858	909.2	○	1144.8	1235.1	-	898.0	■
	-2		-	-	-	-	-		-
	-3		-	-	-	-	-		-
	平均値		909.2		1144.8	1235.1	-		
HD-T1-32	-1	858	876.6	○	1103.8	1190.8	-		□
	-2		838.9	○	1056.3	1139.6	-		□
	-3		866.5	○	1091.0	1177.1	-		□
	平均値		860.7		1083.7	1169.2	-		
HD-B0-32	-1	858	898.2	○	1130.9	1220.2	-		■
	-2		907.9	○	1143.2	1233.3	-		■
	-3		903.3	○	1137.4	1227.1	-		■
	平均値		903.1		1137.2	1226.9	-		
HD-B1-32	-1	858	877.1	○	1104.4	1191.5	-	□	
	-2		840.3	○	1058.0	1141.5	-	□	
	-3		826.0	○	1040.0	1122.1	-	□	
	平均値		847.8		1067.5	1151.7	-		

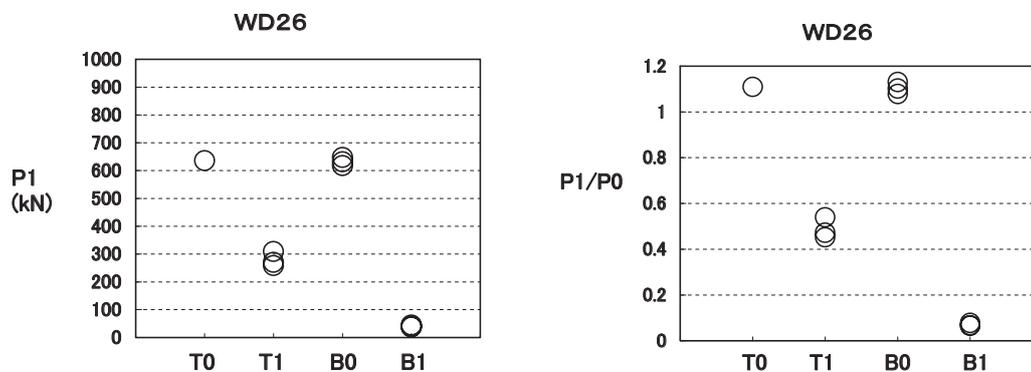
③ 圧延・熱処理 普通PC鋼棒 (WR, HR シリーズ)

表-3.4 WR, HR シリーズ

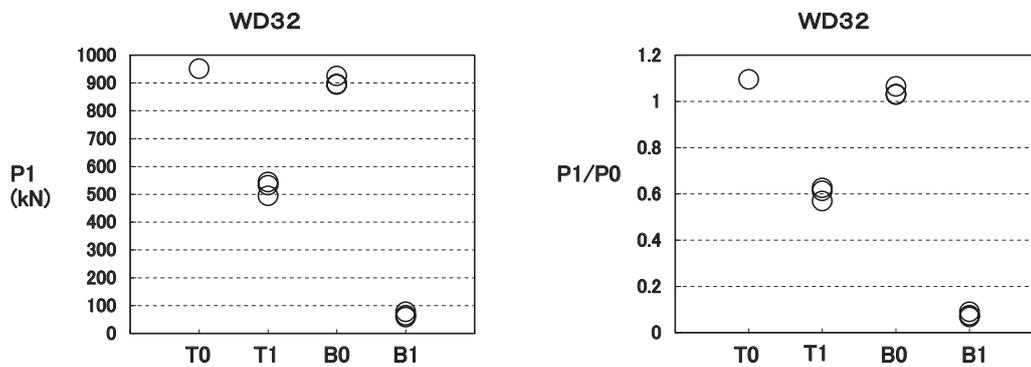
試験名称		P0	P1	破壊位置 ○母材部 ●ねじ部	$\sigma 1$	$\sigma 2$	$\sigma 3$	(参考値)			
		規格 破断 荷重 (kN)	実測 破断 荷重 (kN)		母材部		ねじ加工部	試験 成績証 破断荷重 (kN)	絞りの 有無 ■有 □無		
					P1/A1 (N/mm ²)	P1/A2 (N/mm ²)	P1/A5 (N/mm ²)				
WR-T0-32	-1	869	942.4	●	-	-	1238.7	988.9 (ねじ 加工部 974.7)	□		
	-2		931.8	●	-	-	1224.8		□		
	-3		946.1	●	-	-	1243.6		□		
	平均値		940.1		-	-	1235.7				
WR-T1-32	-1	869	528.8	○	657.5	650.0	-		988.9 (ねじ 加工部 974.7)	□	
	-2		461.1	○	573.3	566.8	-			□	
	-3		500.2	○	621.9	614.9	-			□	
	平均値		496.7		617.6	610.6	-				
WR-B0-32	-1	869	926.4	●	-	-	1217.7			988.9 (ねじ 加工部 974.7)	■
	-2		964.5	●	-	-	1267.7				■
	-3		935.1	●	-	-	1229.1				■
	平均値		942.0		-	-	1238.2				
WR-B1-32	-1	869	86.1	○	107.1	105.8	-	988.9 (ねじ 加工部 974.7)			□
	-2		70.4	○	87.5	86.5	-				□
	-3		77.8	○	96.7	95.6	-				□
	平均値		78.1		97.1	96.0	-				
HR-T0-32	-1	869	895.0	●	-	-	1176.4		910 (ねじ 加工部 889)		■
	-2		-	-	-	-	-				-
	-3		-	-	-	-	-				-
	平均値		895.0		-	-	1176.4				
HR-T1-32	-1	869	838.4	○	1042.5	1076.5	-			910 (ねじ 加工部 889)	□
	-2		868.3	○	1079.6	1114.9	-				□
	-3		820.9	○	1020.7	1054.1	-				□
	平均値		842.5		1047.6	1081.8	-				
HR-B0-32	-1	869	891.8	●	-	-	1172.2	910 (ねじ 加工部 889)			■
	-2		897.3	●	-	-	1179.4				■
	-3		895.9	●	-	-	1177.6				■
	平均値		895.0		-	-	1176.4				
HR-B1-32	-1	869	789.2	○	981.3	1013.4	-		910 (ねじ 加工部 889)		□
	-2		815.4	○	1013.9	1047.0	-				□
	-3		-	-	-	-	-				-
	平均値		802.3		997.6	1030.2	-				

④ 実測破断荷重 (P1)

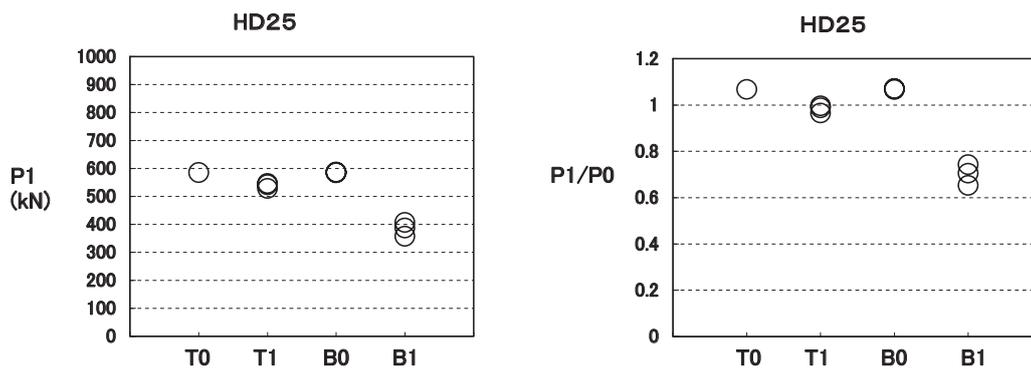
実測破断荷重 (P1) およびそれらと規格値 (P0) の比を図-3.1 に示す。



(a) WD26

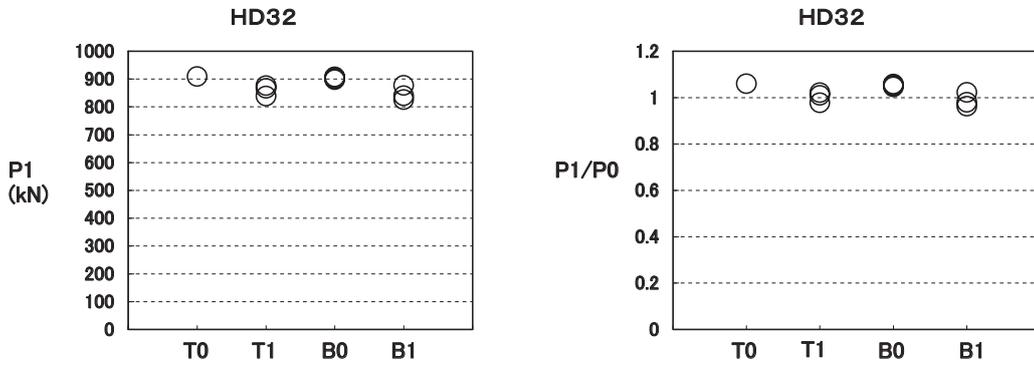


(b) WD32

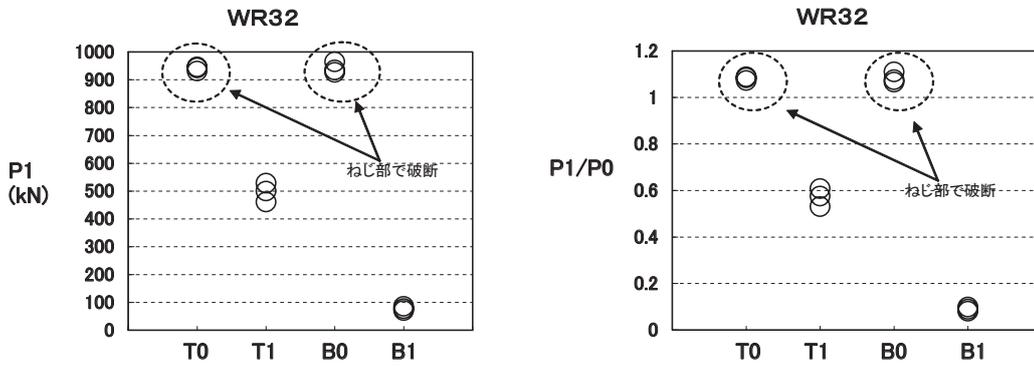


(c) HD25

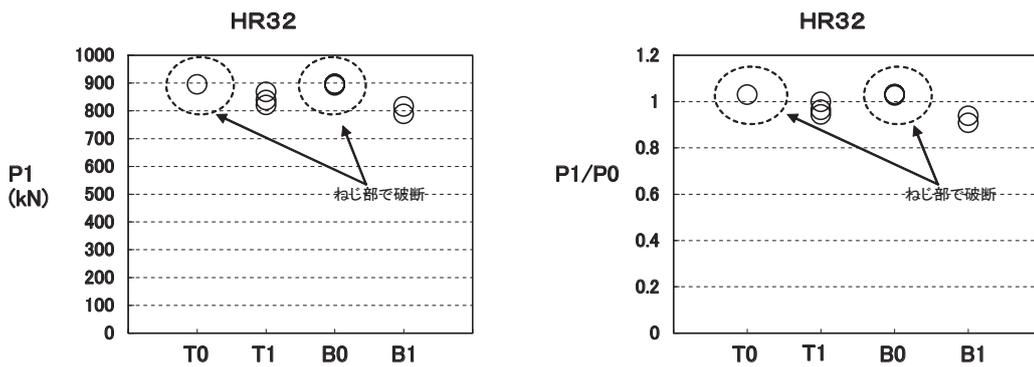
図-3.1(1) 実測破断荷重 (P1) と破断荷重比 (P1/P0)



(d) HD32



(e) WR32



(f) HR32

図-3.1(2) 実測破断荷重(P_1)と破断荷重比 (P_1/P_0)

3.3.2 軸引張試験の結果

(1) 健全まま（熱影響なし）鋼棒

1) 破断性状

写真-3.2 に破断性状の代表例を示す。

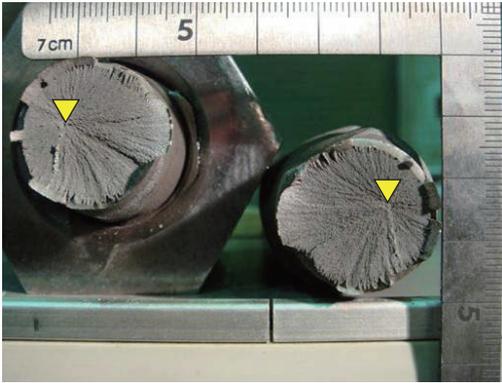
総ねじ鋼棒（WD, HD シリーズ）、普通鋼棒（WR, HR シリーズ）とも程度のばらつきは大きい。「伸び」および「絞り」が認められ、破断時にある程度延性的な挙動を伴ったものと考えられる¹⁾。

ねじ PC 鋼棒の場合（写真-3.2①, ②）、断面の中央付近の一点から放射状に広がる特徴的な模様が破断に確認でき、破壊の起点は母材断面の一般部と考えられる。破断面の性状から破壊とねじ状リブとの位置の関係について特段の傾向は認められない。

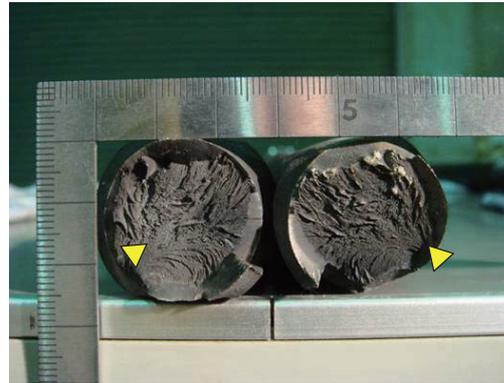
普通鋼棒（写真-3.2③, ④）では全てのケースで鋼棒両端に加工された転造ねじ部で破断した。破断面の目視による観察では破断の起点となった部位の特定は困難であった。

普通鋼棒に本実験の供試体のようにねじ加工を行った場合、ねじ加工部が破壊の開始点となり引張耐力の低下要因となることが確認された。

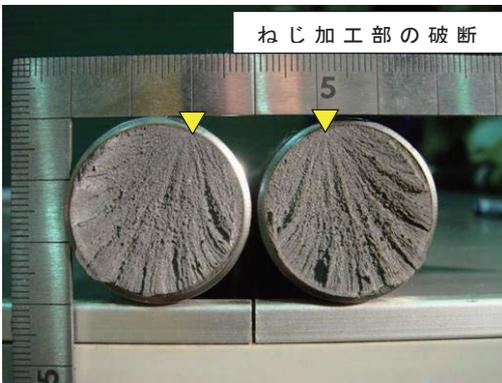
PC 鋼棒は一般的に定着のために端部にねじを転造加工され使用されるため、細径のものではねじ部の引張り強度が低下する PC 鋼棒母材部の規格を満足しないこともあるため、試験を実施して強度を確認することとされている^{2),3)}。



①WD-T0-32-1



②HD-T0-32-1



③WR-T0-32-1



④HR-T0-32-1

▼：破断面起点部

写真-3.2 健全鋼棒の軸引張試験による破断面の例

2) 破断荷重

健全（入熱なし）鋼棒の試験結果を表-3.5, 図-3.2 に示す。実測破断荷重(P1)は、総ねじ鋼棒（WD, HD シリーズ）、普通鋼棒（WR, HR シリーズ）ともに母材部の規格値（P0）よりも大きな値となっており、規格値は破断荷重としては安全側の評価となることが確認できた。

参考として試験成績表から算出した破断荷重の値との比較では、総ねじ鋼棒では実測破断荷重と概ね一致したのに対し、普通鋼棒では実測破断荷重がやや小さくなる傾向となった。

総ねじ鋼棒の場合、公称径がねじ状リブの高さを含まない母材一般部径で定義されており⁴⁾、公称径を直径とする円の断面積はねじ部が含まれる場合の破断面の断面積より基本的には小さい値となる。

一方、全ての供試体が端部に設けたねじ部で破断した普通鋼棒については、ねじのない母材一般部の断面に対してねじ部では有効断面積が小さくなる部分があることや、ねじ加工部の応力集中が影響している可能性があるが、本研究では鋼棒の応力状態の詳細は把握していない。

表-3.5 軸引張時の破断荷重（熱影響無し）

（単位：kN）

	P1（実測破断荷重）				P0 （母材部規格値）	P3 （試験成績証破断荷重）		破断荷重比	
	平均値 P1 _{av}	供試体1	供試体2	供試体3		母材一般部	ねじ加工部	P1 _{av} /P0 ×100 (%)	P1 _{av} /P3 ×100 (%)
WD-T0-26	635.5	635.5	-	-	573	623.5		111	102
WD-T0-32	951.2	951.2	-	-	869	924.6		109	103
HD-T0-25	584.9	584.9	-	-	548	583.0		107	100
HD-T0-32	909.2	909.2	-	-	858	898.0		106	101
WR-T0-32	(940.1)	(942.4)	(931.8)	(946.1)	869	988.9	(974.7)	108	(96.5)
HR-T0-32	(895)	(895)	-	-	869	910.0	(904.0)	103	(99.0)

（ ）：ねじ加工部の破断

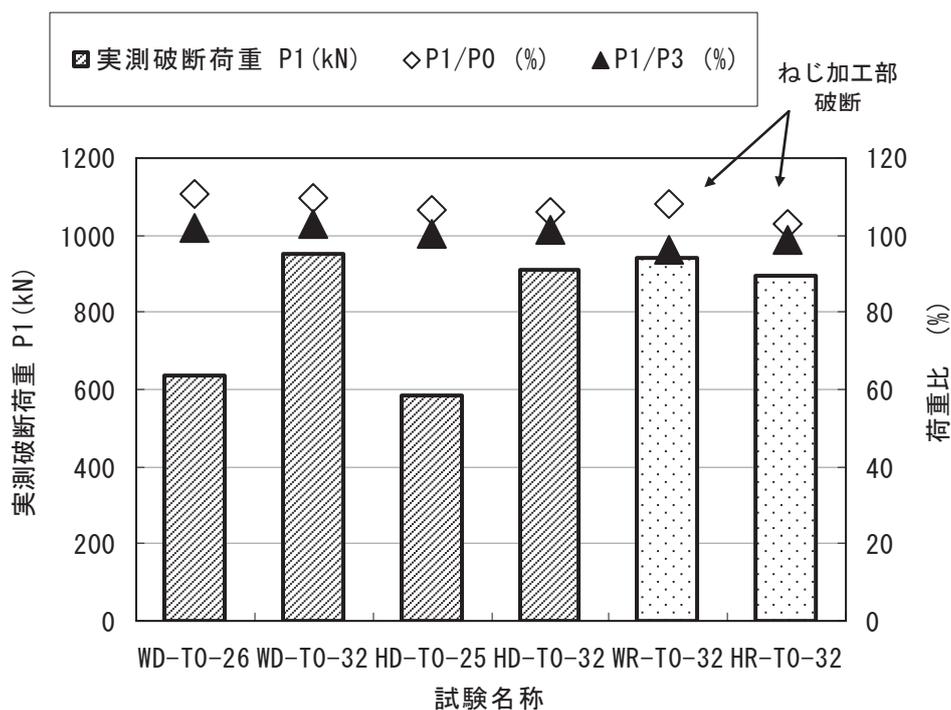


図-3.2 軸引張時の破断荷重と破断荷重比（熱影響無し）

以上より、今回実験に供したPC鋼棒はいずれも試験成績表あるいは製造者のカタログに示される値とよい整合を示し、一般に供用される適正な品質の製品であったと考えられる。

3) 引張強さ

表-3.6 に算出した引張強さを、表-3.7 に各引張強さの規格引張強さに対する比の一覧を示す。図-3.3 にシリーズ毎の実験結果を示す。

実測引張強さ ($\sigma 1$) および実測換算引張強さ ($\sigma 2$) は、総ねじ鋼棒 (WD, HD)、普通鋼棒 (WR, HR) とともに径による相違はみられない。またカタログ値と公称断面積から算出した規格引張強さ ($\sigma 0$) に対していずれもやや上回る値を示した。

普通鋼棒 (WR, HR) は全ての供試体がねじ部で破断したが、引張強さは規格引張強さ ($\sigma 0$) を上回っており、ねじ部における引張強度の低下の影響は少ないものと考えられる。これは基本径が 26mm 以上の太径ではねじ転造加工による塑性化の影響がほとんどないとの「道路橋示方書・同解説 I 共通編 H14.3」(日本道路協会) の記述(「3.1 鋼材」の解説) に矛盾しない⁴⁾。

表-3.6 軸引張時の引張強さ (熱影響無し)

	$\sigma 1$ (実測引張強さ)				$\sigma 2$ (実測換算引張強さ)				$\sigma 3$ (ねじ部換算引張強さ)				$\sigma 0$ (=P0/A1)
	平均値	供試体1	供試体2	供試体3	平均値	供試体1	供試体2	供試体3	平均値	供試体1	供試体2	供試体3	
WD-T0-26	1197.0	1197.0	—	—	1224.0	1224.0	—	—	—	—	—	—	1079.2
WD-T0-32	1182.7	1182.7	—	—	1215.4	1215.4	—	—	—	—	—	—	1079.2
HD-T0-25	1154.3	1154.3	—	—	1244.7	1244.7	—	—	—	—	—	—	1081.5
HD-T0-32	1144.8	1144.8	—	—	1235.1	1235.1	—	—	—	—	—	—	1080.3
WR-T0-32	—	—	—	—	—	—	—	—	(1235.7)	(1238.7)	(1224.8)	(1243.6)	1080.5
HR-T0-32	—	—	—	—	—	—	—	—	(1176.4)	(1176.4)	—	—	1080.5

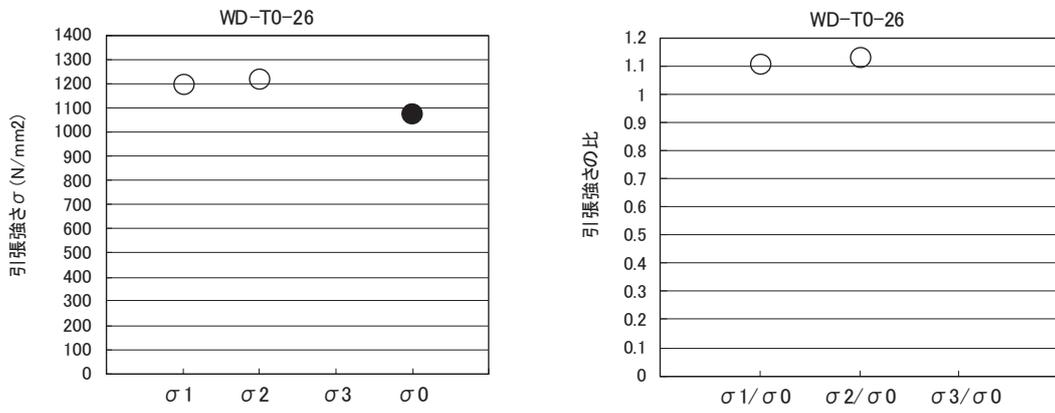
() : ねじ加工部の破断

表-3.7 軸引張時の引張強さの比 (熱影響無し)

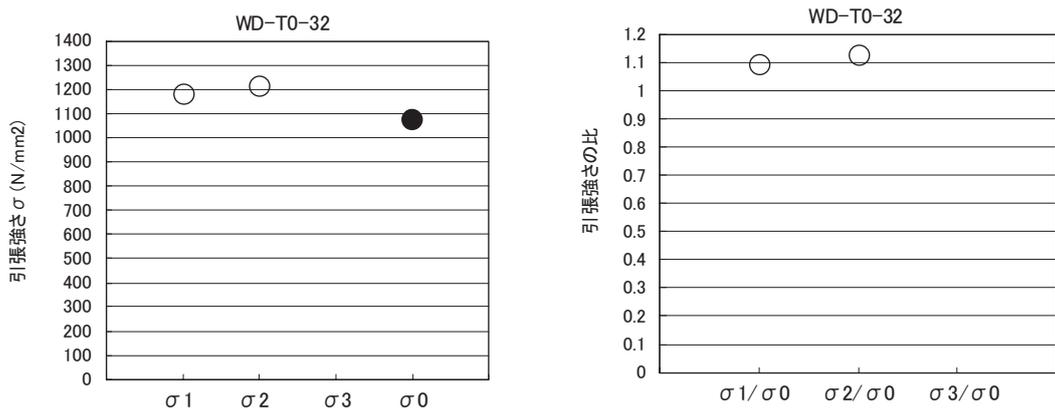
	$\sigma 1$ (実測引張強さ)/ $\sigma 0$				$\sigma 2$ (実測換算引張強さ)/ $\sigma 0$				$\sigma 3$ (ねじ部換算引張強さ)/ $\sigma 0$			
	平均値	供試体1	供試体2	供試体3	平均値	供試体1	供試体2	供試体3	平均値	供試体1	供試体2	供試体3
WD-T0-26	1.109	1.109	—	—	1.134	1.134	—	—	—	—	—	—
WD-T0-32	1.096	1.096	—	—	1.126	1.126	—	—	—	—	—	—
HD-T0-25	1.067	1.067	—	—	1.151	1.151	—	—	—	—	—	—
HD-T0-32	1.060	1.060	—	—	1.143	1.143	—	—	—	—	—	—
WR-T0-32	—	—	—	—	—	—	—	—	(1.144)	(1.146)	(1.134)	(1.151)
HR-T0-32	—	—	—	—	—	—	—	—	(1.089)	(1.089)	—	—

() : ねじ加工部の破断

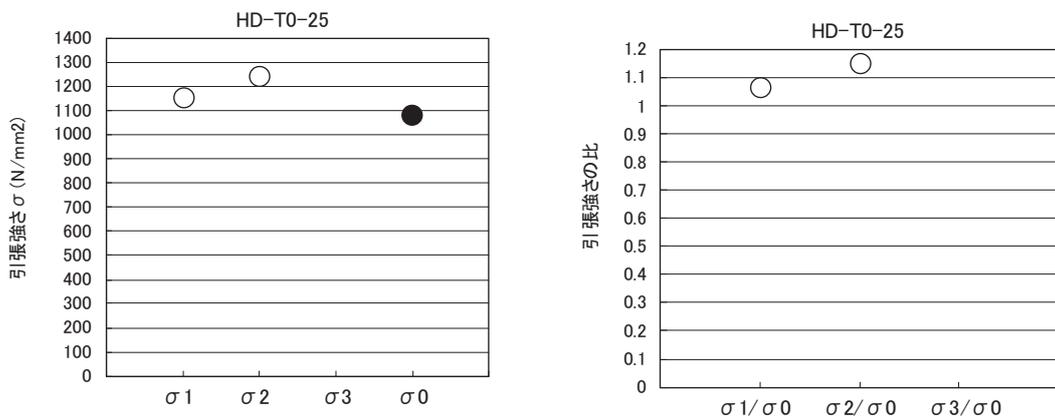
○	$\sigma 1$: 実測引張強さ	(P1/A1)
○	$\sigma 2$: 実測換算引張強さ	(P1/A2)
○	$\sigma 3$: ねじ部換算引張強さ	(P1/A5)
●	$\sigma 0$: 規格引張り強さ	(P1/A1)



(a) WD-T0-26



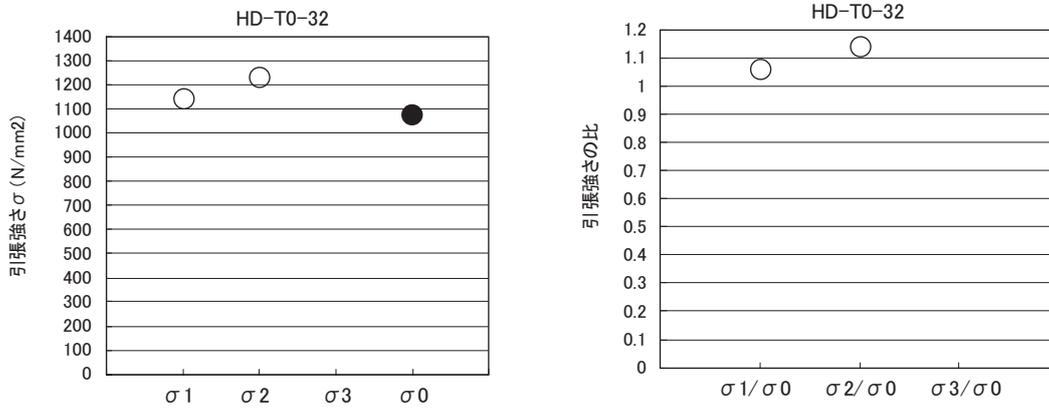
(b) WD32-T0-32



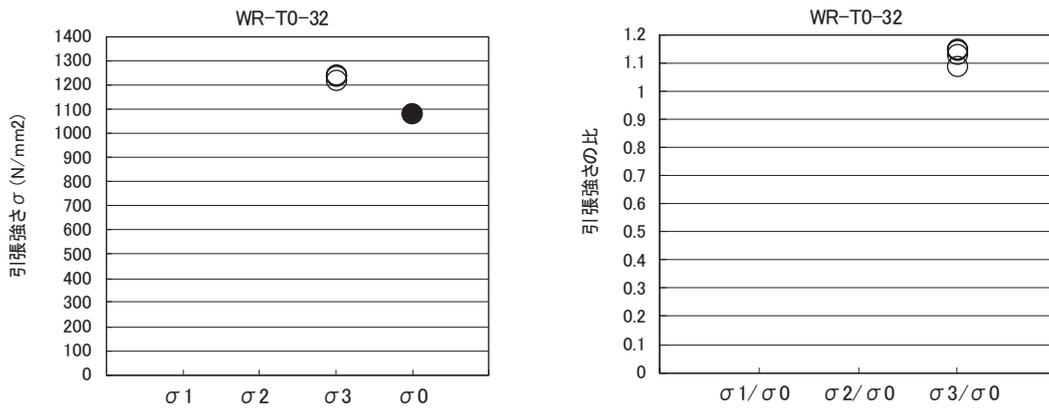
(c) HD-T0-25

図-3.3(1) 軸引張試験による引張強さ (熱影響無し)

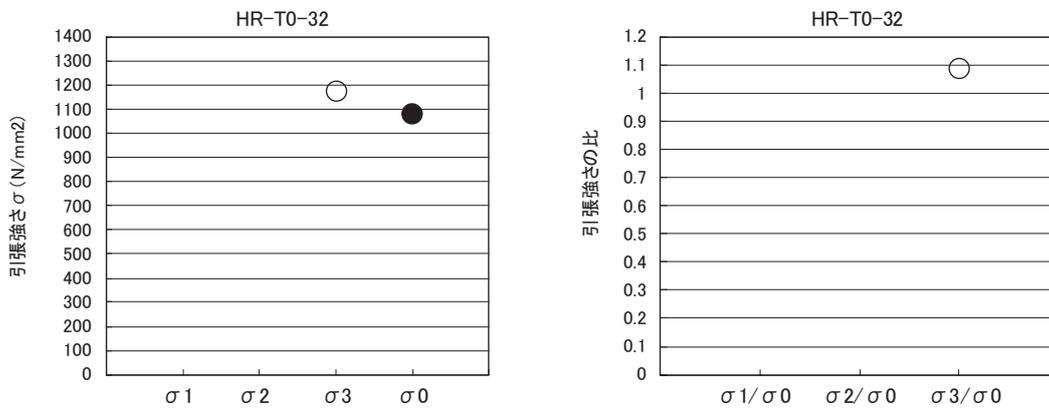
○	$\sigma 1$: 実測引張強さ	(P1/A1)
○	$\sigma 2$: 実測換算引張強さ	(P1/A2)
○	$\sigma 3$: ねじ部換算引張強さ	(P1/A5)
●	$\sigma 0$: 規格引張り強さ	(P1/A1)



(d) HD-T0-32



(e) WR-T0-32



(f) HR-T0-32

図-3.3(2) 軸引張試験による引張強さ (熱影響無し)

(2) 熱影響あり鋼棒

1) 破断性状

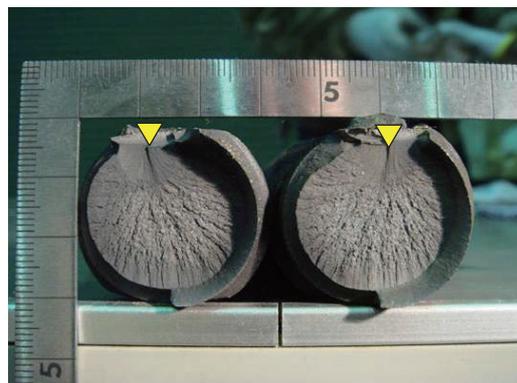
熱影響を与えた鋼棒の軸引張試験後の破断部の状況を写真-3.3に示す。

破断面の外観目視からは、いずれも破断の起点は溶接による熱影響部と認められる。

断面の破壊は起点部から放射状に進行したものと考えられ、いずれも脆性的な破断を伺わせる破面性状が支配的である。破断部の側面からの観察でも延びやそれに伴う絞りが確認されず、脆性的な破断であったものと推定された。



①WD-T1-32-1



②HD-T1-32-1



③WR-T1-32-1



④HR-T1-32-1

▼ : 破断面起点部

写真-3.3 軸引張試験（熱影響あり）による破断面の例

2) 破断荷重

溶接による熱影響を与えた実験結果の一覧を表-3.8 に、破断荷重と荷重比について図-3.4 に示す。

溶接による熱影響を与えた鋼棒の軸引張試験では、全ての鋼棒種で試験成績表に示す引張荷重に対して全ての供試体で破断荷重が下回る結果となった。

各ケースで3体の供試体に熱影響として与えた溶接が、厳密に入熱量などを制御したものではないにも関わらず、破断荷重に大きなばらつきはなく熱影響を与えない鋼棒に対して同程度の低下を示した。

なお、圧延鋼棒(WD, WR)では破断荷重の低下が特に顕著であり、熱影響を与えない場合に比べて50%程度の値となった。

熱影響を与えることで、熱影響のない健全な条件(T0 ケース)ではねじ部で破断を生じた普通鋼棒(WR, HR)を含む全ての供試体が母材一般部の熱影響を受けた部位で破断した。

表-3.8 軸引張時の破断荷重（熱影響あり）

（単位：kN）

	P1（実測破断荷重）				P0 （母材部規格値）	P3 （試験成績証破断荷重）		破断荷重比	
	平均値 P1 _{av}	供試体1	供試体2	供試体3		母材一般部	ねじ加工部	P1 _{av} /P0 ×100 (%)	P1 _{av} /P3 ×100 (%)
WD-T1-26	279.7	270.6	259.1	309.3	573	623.5		49	45
WD-T1-32	523.6	543.7	532.9	494.2	869	924.6		60	57
HD-T1-25	538.7	541.6	528.8	545.8	548	583		98	92
HD-T1-32	860.7	876.6	838.9	866.5	858	898		100	96
WR-T1-32	496.7	528.8	461.1	500.2	869	988.9		57	(50.2)
HR-T1-32	842.5	838.4	868.3	820.9	869	910		97	(92.6)

（ ）：ねじ加工部の破断

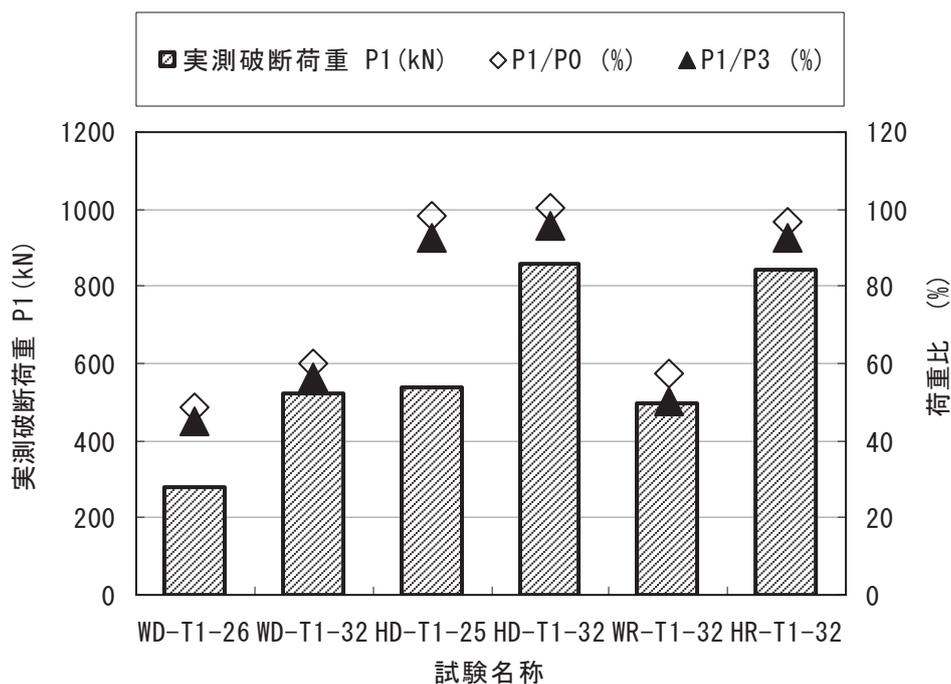


図-3.4 軸引張時の破断荷重と破断荷重比（熱影響あり）

3) 引張強さ

総ねじ鋼棒 (WD, HD)、普通鋼棒 (WR, HR) とともに径による相違はみられない。

表-3.9 に算出した引張強さの一覧を示す。また、表-3.10 に各引張強さの規格引張強さに対する比の一覧を示す。図-3.5 にシリーズ毎の実験結果を示す。

圧延鋼棒 (WD, WR) では実測引張強さ ($\sigma 1$)、実測換算引張強さ ($\sigma 2$) とともに規格値 (熱影響のない条件) に比べて顕著な強度低下がみられた。

強度低下の程度は、カタログ値と公称断面積から算出した規格引張強さ ($\sigma 0$) に対して概ね 50%程度である。

一方、熱処理鋼棒 (HD, HR) では大きな強度低下は確認されず、 $\sigma 1$, $\sigma 2$ とともに規格引張強さとほぼ同じ値となった。

表-3.9 軸引張時の引張強さ (熱影響あり)

(単位: N/mm²)

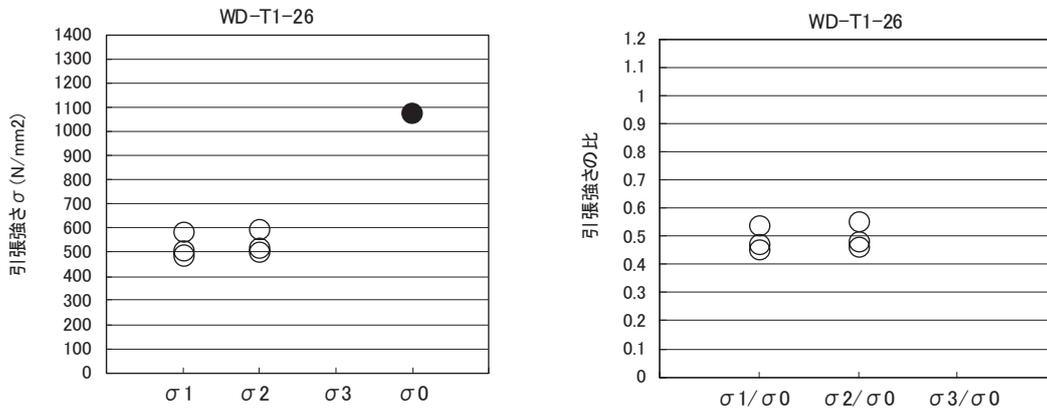
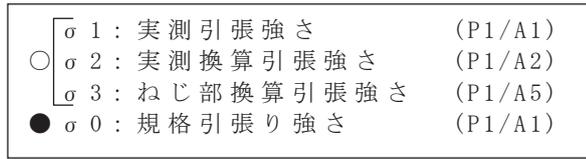
	$\sigma 1$ (実測引張強さ)				$\sigma 2$ (実測換算引張強さ)				$\sigma 3$ (ねじ部換算引張強さ)				$\sigma 0$ (=P0/A1)
	平均値	供試体1	供試体2	供試体3	平均値	供試体1	供試体2	供試体3	平均値	供試体1	供試体2	供試体3	
WD-T1-26	526.7	509.7	488.0	582.6	538.6	521.2	499.0	595.7	—	—	—	—	1079.2
WD-T1-32	651.0	676.0	662.6	614.5	669.1	694.7	680.9	631.5	—	—	—	—	1079.2
HD-T1-25	1063.2	1068.9	1043.6	1077.2	1146.5	1152.6	1125.4	1161.5	—	—	—	—	1081.5
HD-T1-32	1083.7	1103.8	1056.3	1091.0	1169.2	1190.8	1139.6	1177.1	—	—	—	—	1080.3
WR-T1-32	617.6	657.5	573.3	621.9	610.6	650.0	566.8	614.9	—	—	—	—	1080.5
HR-T1-32	1047.6	1042.5	1079.6	1020.7	1081.8	1076.5	1114.9	1054.1	—	—	—	—	1080.5

() : ねじ加工部の破断

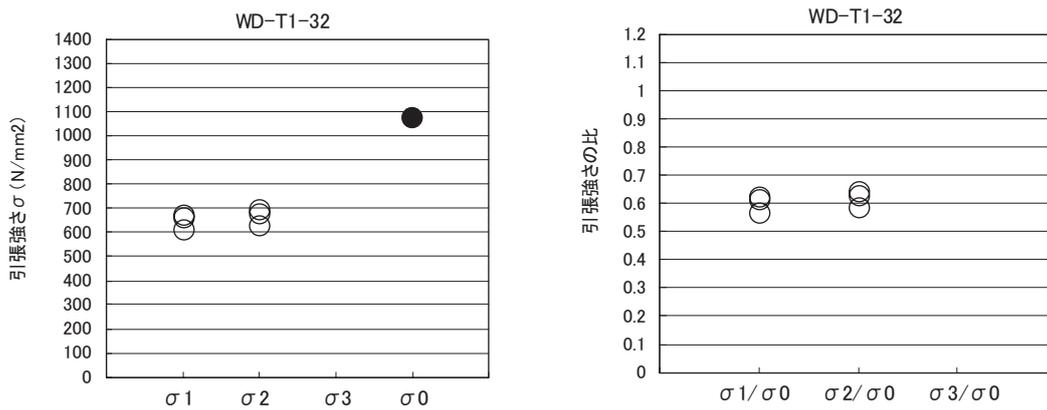
表-3.10 軸引張時の引張強さの比 (熱影響あり)

	$\sigma 1$ (実測引張強さ)/ $\sigma 0$				$\sigma 2$ (実測換算引張強さ)/ $\sigma 0$				$\sigma 3$ (ねじ部換算引張強さ)/ $\sigma 0$			
	平均値	供試体1	供試体2	供試体3	平均値	供試体1	供試体2	供試体3	平均値	供試体1	供試体2	供試体3
WD-T1-26	0.488	0.472	0.452	0.540	0.499	0.483	0.462	0.552	—	—	—	—
WD-T1-32	0.603	0.626	0.614	0.569	0.620	0.644	0.631	0.585	—	—	—	—
HD-T1-25	0.983	0.988	0.965	0.996	1.060	1.066	1.041	1.074	—	—	—	—
HD-T1-32	1.003	1.022	0.978	1.010	1.082	1.102	1.055	1.090	—	—	—	—
WR-T1-32	0.572	0.609	0.531	0.576	0.565	0.602	0.525	0.569	—	—	—	—
HR-T1-32	0.970	0.965	0.999	0.945	1.001	0.996	1.032	0.976	—	—	—	—

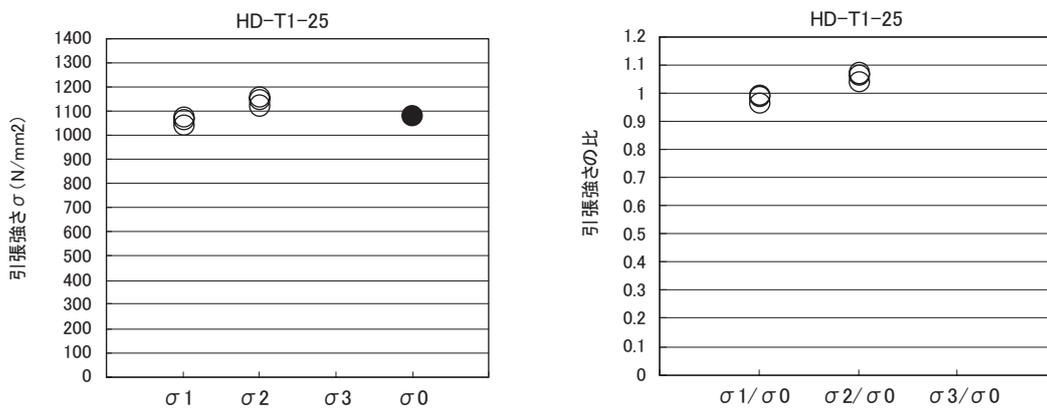
() : ねじ加工部の破断



(a) WD-T1-26



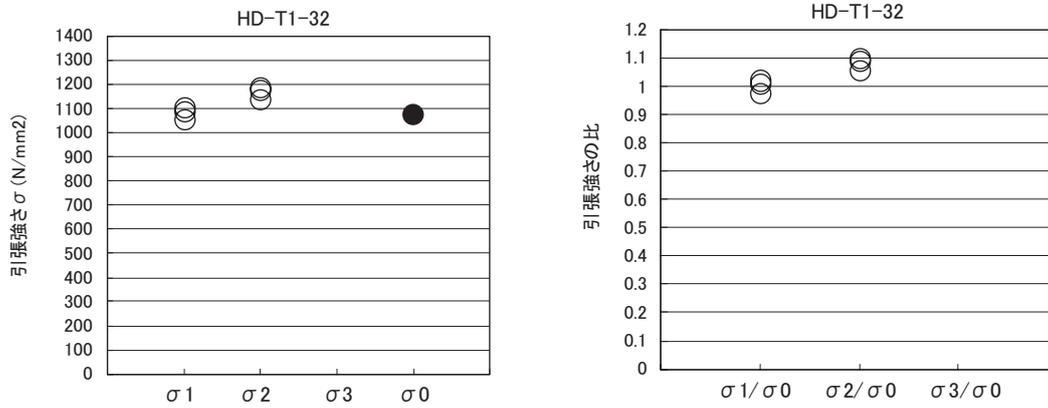
(b) WD-T1-32



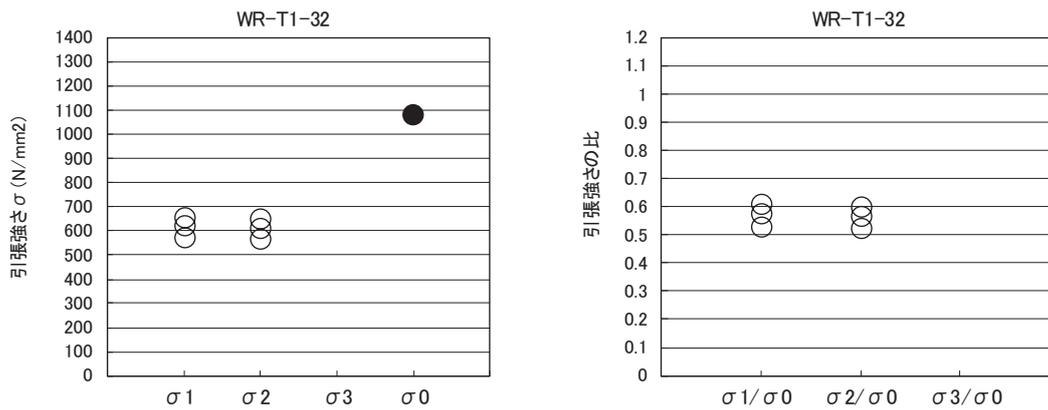
(c) HD-T1-25

図-3.5(1) 軸引張試験による引張強さ (熱影響あり)

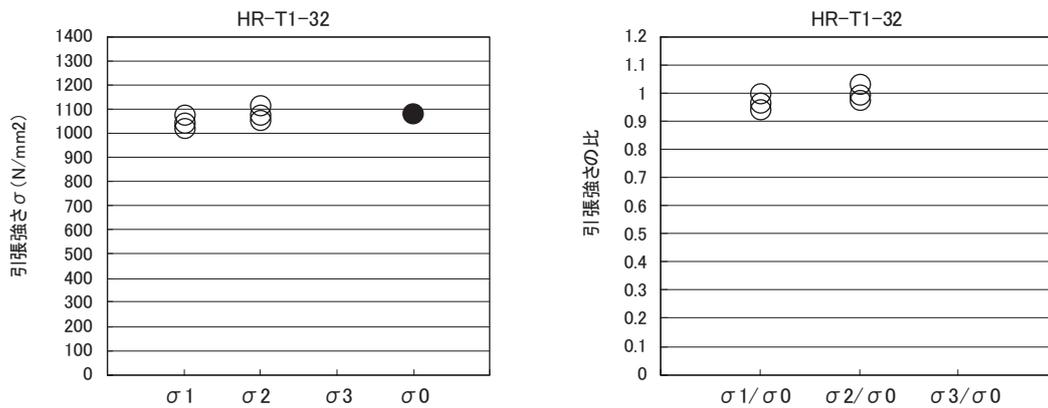
○	σ_1 : 実測引張強さ	(P1/A1)
○	σ_2 : 実測換算引張強さ	(P1/A2)
○	σ_3 : ねじ部換算引張強さ	(P1/A5)
●	σ_0 : 規格引張り強さ	(P1/A1)



(d) HD-T1-32



(e) WR-T1-32



(f) HR-T1-32

図-3.5(2) 軸引張試験による引張強さ (熱影響あり)

3.3.3 曲げ引張試験の結果

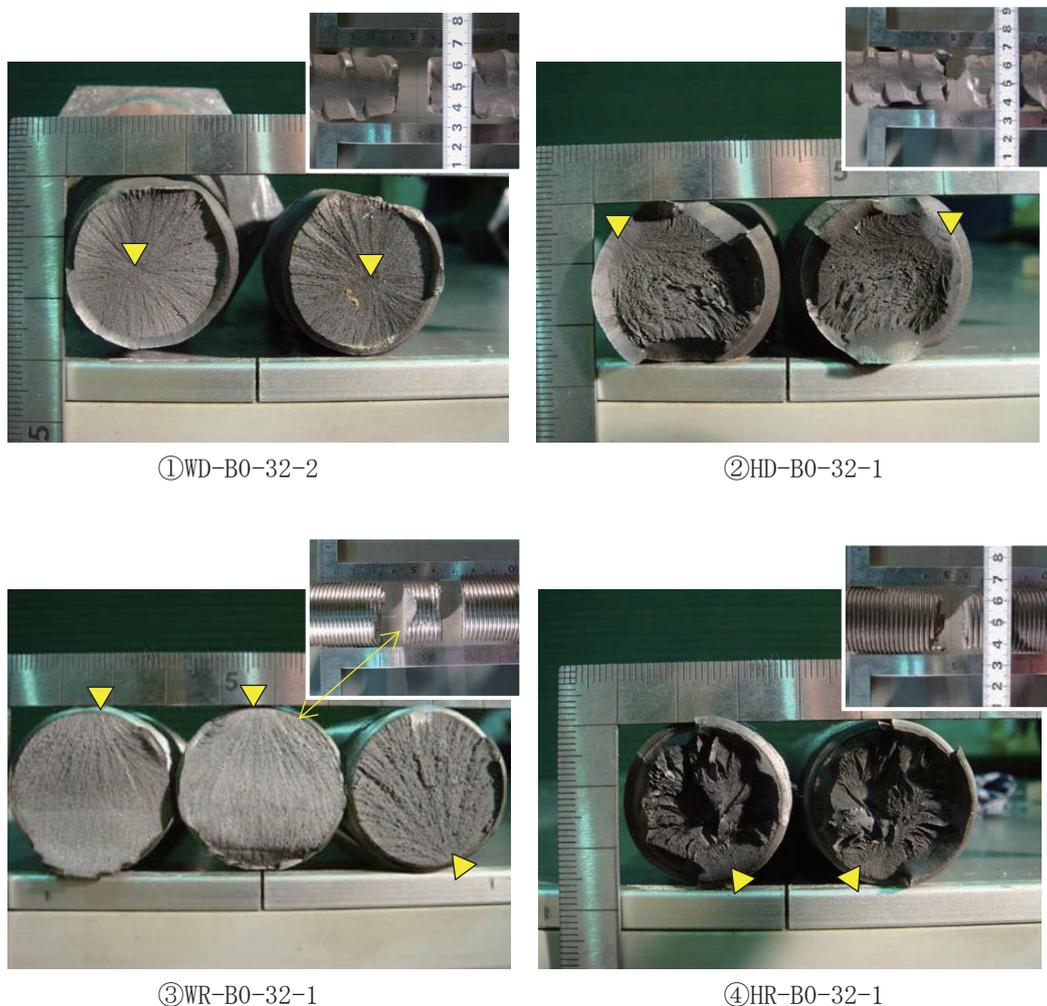
(1) 健全まま（熱影響なし）鋼棒

1) 破断性状

各ケースの破断面の代表例を写真-3.4 に示す。側面からみた破断性状では健全鋼棒の軸引張試験の場合と同様に延びとそれに伴う絞りが確認できる。

総ねじ鋼棒（WD, HD）では破断位置は、ほぼ曲げ作用部に一致している。断面内に確認できる破断の起点は、健全鋼棒軸引張試験と同様に圧延鋼棒（WD）は断面中心付近にあり、熱処理鋼棒（HD）は外縁部であった。

一方、普通鋼棒（WR, HR）は破断位置が、曲げ作用部ではなく健全鋼棒軸引張試験と同様にねじ部で破断した。また、破断位置で若干の延びとそれに伴う絞りが確認され、破断面の観察からは断面内の破断起点は外縁部であった。



▼：破断面起点部

写真-3.4 曲げ引張試験（熱影響なし）による破断面の例

2) 破断荷重

健全鋼棒の曲げ引張試験では、全ての鋼棒種で試験成績表の引張荷重と同程度の破断荷重となった(表-3.11)。供試体個々の数値でもばらつきは少ない。

表-3.11 曲げ引張時の破断荷重 (熱影響なし)

(単位: kN)

	P1 (実測破断荷重)				P0 (母材部 規格値)	P3 (試験成績証破断荷重)		破断荷重比	
	平均値 P1 _{av}	供試体1	供試体2	供試体3		母材一般部	ねじ加工部	P1 _{av} /P0 ×100 (%)	P1 _{av} /P3 ×100 (%)
WD-B0-26	632.2	647.4	631.3	618	573	623.5		110	101
WD-B0-32	905.3	925.4	894.6	895.9	869	924.6		104	98
HD-B0-25	585.8	586.2	586.7	584.4	548	583		107	100
HD-B0-32	903.13	898.2	907.9	903.3	858	898		105	101
WR-B0-32	(942.0)	(926.4)	(964.5)	(935.1)	869	988.9	(974.7)	108	(96.6)
HR-B0-32	(895.0)	(891.8)	(897.3)	(895.9)	869	910.0	(904.0)	103	(99.0)

() : ねじ加工部の破断

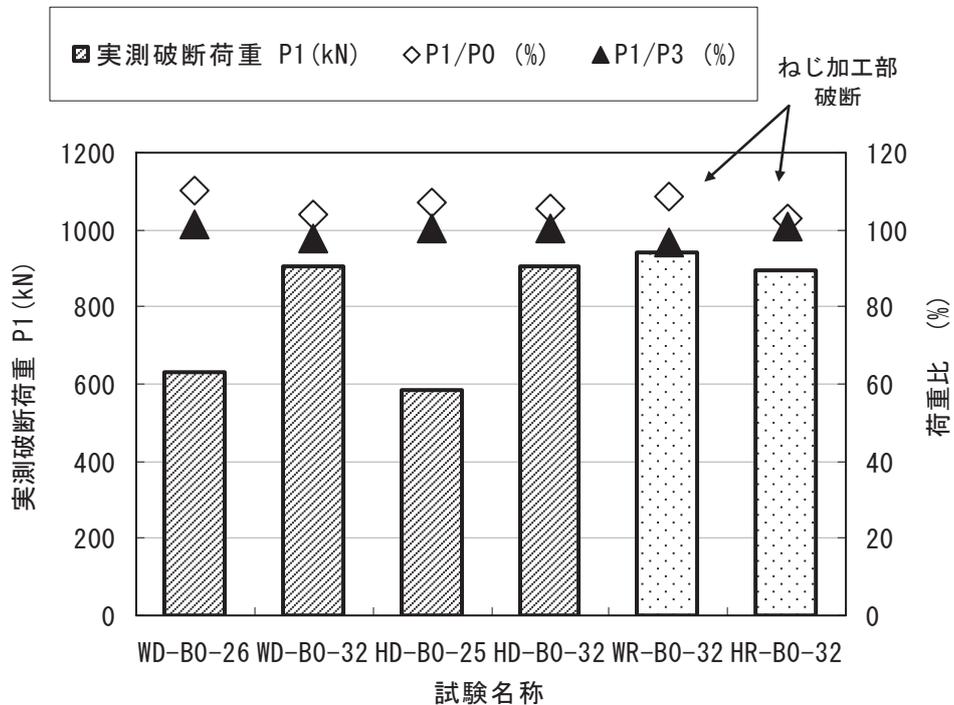


図-3.6 曲げ引張時の破断荷重と破断荷重比 (熱影響なし)

3) 引張強さ

表-3.12 に算出した引張強さ、表-3.13 に各引張強さの規格引張強さに対する比の一覧を示す。また、図-3.7 にシリーズ毎の実験結果を示す。

実測引張強さ($\sigma 1$)、実測換算引張強さ($\sigma 2$)は、総ねじ鋼棒(WD, HD シリーズ)、普通鋼棒(WR, HR シリーズ)ともに径による相違はみられない。またカタログ値と公称断面積から算出した規格引張強さ($\sigma 0$)に対していずれもやや上回る値を示した。

表-3.12 曲げ引張時の引張強さ (熱影響なし)

(単位: N/mm²)

	$\sigma 1$ (実測引張強さ)				$\sigma 2$ (実測換算引張強さ)				$\sigma 3$ (ねじ部換算引張強さ)				$\sigma 0$ (=P0/A1)
	平均値	供試体1	供試体2	供試体3	平均値	供試体1	供試体2	供試体3	平均値	供試体1	供試体2	供試体3	
WD-B0-26	1190.8	1219.4	1189.0	1164.0	1217.7	1246.9	1215.9	1190.3	—	—	—	—	1079.2
WD-B0-32	1125.6	1150.6	1112.3	1114.0	1156.8	1182.5	1143.1	1144.8	—	—	—	—	1079.2
HD-B0-25	1156.0	1156.9	1157.9	1153.3	1246.6	1247.5	1248.6	1243.7	—	—	—	—	1081.5
HD-B0-32	1137.2	1130.9	1143.2	1137.4	1226.9	1220.2	1233.3	1227.1	—	—	—	—	1080.3
WR-B0-32	—	—	—	—	—	—	—	—	(1238.2)	(1217.7)	(1267.7)	(1229.1)	1080.5
HR-B0-32	—	—	—	—	—	—	—	—	(1176.4)	(1172.2)	(1179.4)	(1177.6)	1080.5

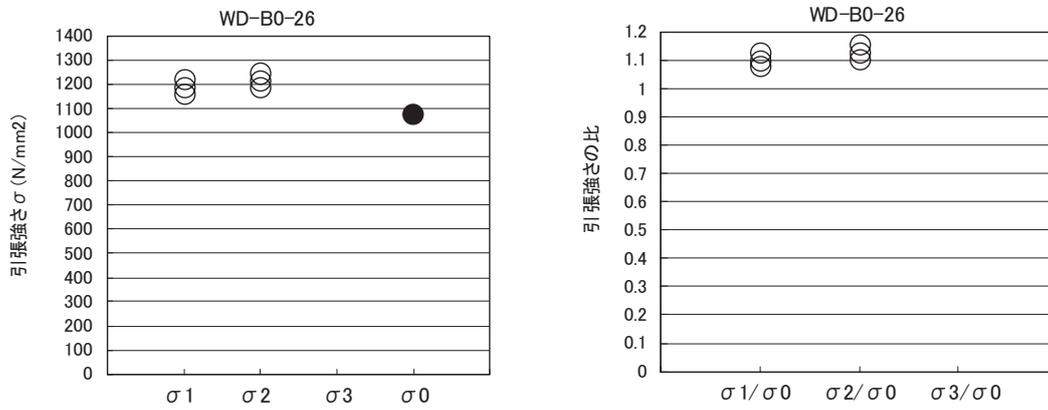
() : ねじ加工部の破断

表-3.13 曲げ引張時の引張強さの比 (熱影響なし)

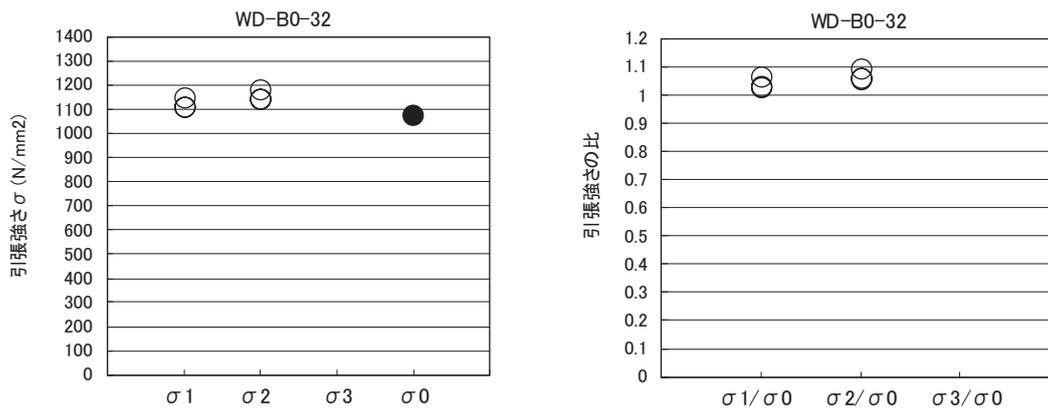
	$\sigma 1$ (実測引張強さ)/ $\sigma 0$				$\sigma 2$ (実測換算引張強さ)/ $\sigma 0$				$\sigma 3$ (ねじ部換算引張強さ)/ $\sigma 0$			
	平均値	供試体1	供試体2	供試体3	平均値	供試体1	供試体2	供試体3	平均値	供試体1	供試体2	供試体3
WD-B0-26	1.103	1.130	1.102	1.079	1.128	1.155	1.127	1.103	—	—	—	—
WD-B0-32	1.043	1.066	1.031	1.032	1.072	1.096	1.059	1.061	—	—	—	—
HD-B0-25	1.069	1.070	1.071	1.066	1.153	1.153	1.154	1.150	—	—	—	—
HD-B0-32	1.053	1.047	1.058	1.053	1.136	1.129	1.142	1.136	—	—	—	—
WR-B0-32	—	—	—	—	—	—	—	—	(1.146)	(1.127)	(1.173)	(1.138)
HR-B0-32	—	—	—	—	—	—	—	—	(1.089)	(1.085)	(1.092)	(1.090)

() : ねじ加工部の破断

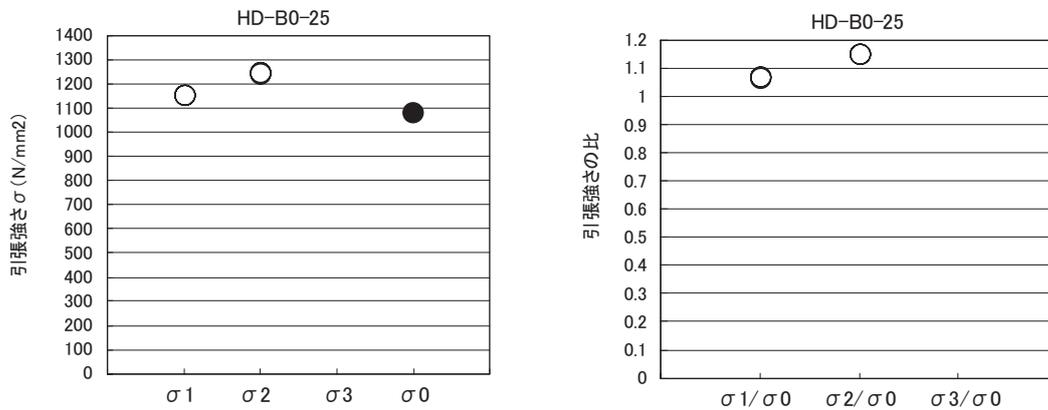
○	$\sigma 1$: 実測引張強さ	(P1/A1)
○	$\sigma 2$: 実測換算引張強さ	(P1/A2)
○	$\sigma 3$: ねじ部換算引張強さ	(P1/A5)
●	$\sigma 0$: 規格引張り強さ	(P1/A1)



(a) WD-B0-25



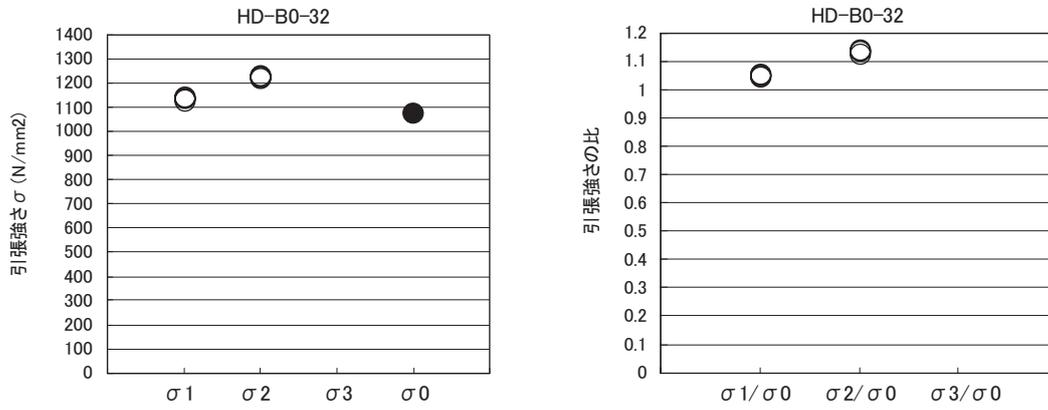
(b) WD-B0-32



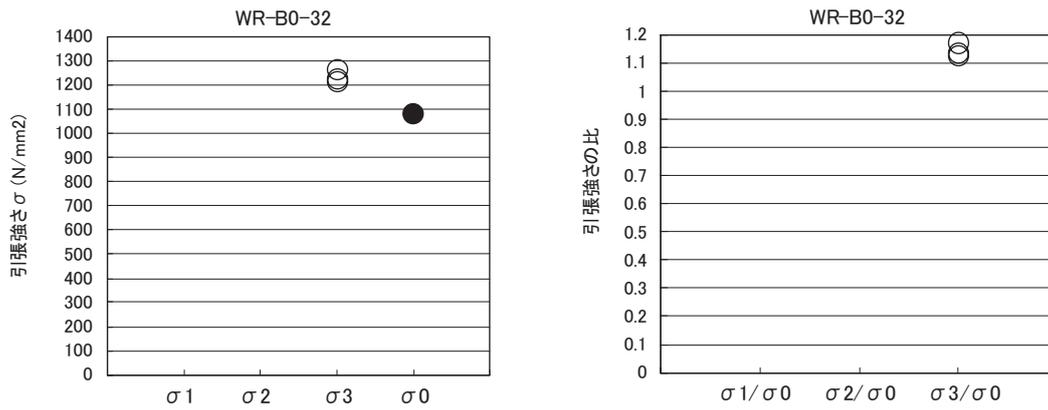
(c) HD-B0-25

図-3.7(1) 曲げ引張試験による引張強さ (熱影響なし)

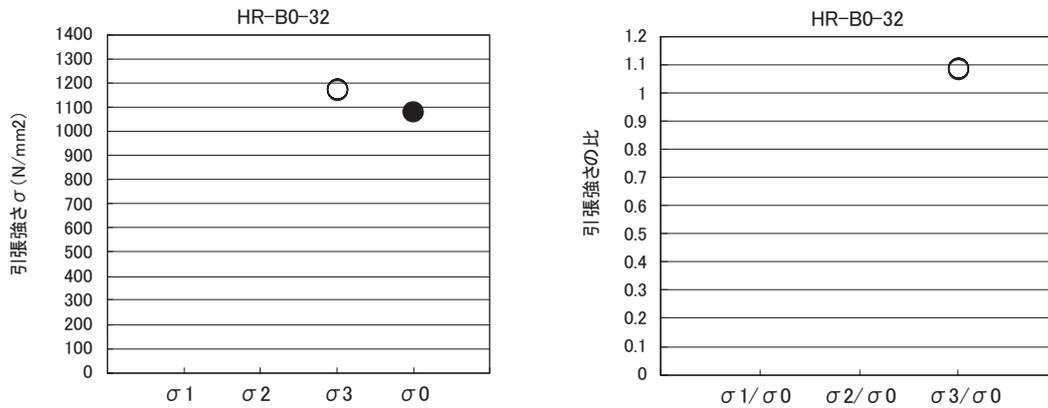
○	σ_1 : 実測引張強さ	(P1/A1)
○	σ_2 : 実測換算引張強さ	(P1/A2)
○	σ_3 : ねじ部換算引張強さ	(P1/A5)
●	σ_0 : 規格引張り強さ	(P1/A1)



(d) HD-B0-32



(e) WR-B0-32



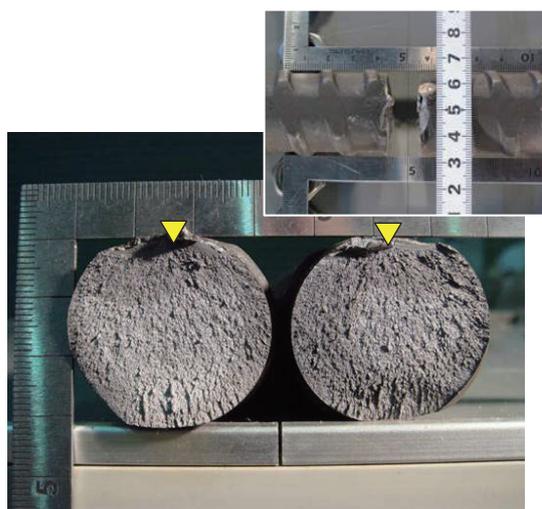
(f) HR-B0-32

図-3.7(2) 曲げ引張試験による引張強さ (熱影響なし)

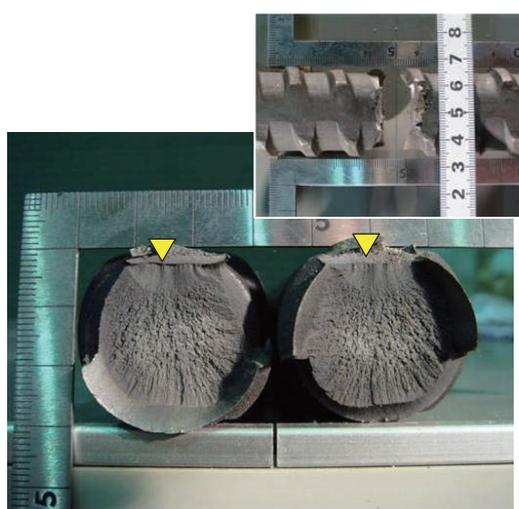
(2) 熱影響あり鋼棒

1) 破壊性状

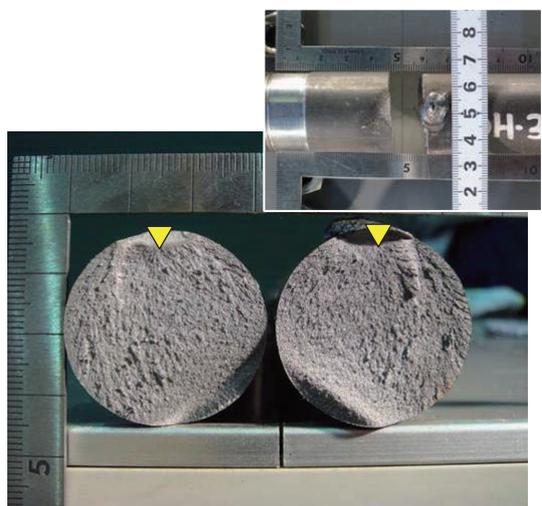
写真-3.5 に各ケースの代表的な破断面を示す。いずれも破断の起点が溶接による熱影響部となっており、そこから放射状に脆性破断に特徴的な破面模様が見られる。側面からの観察でも延びやそれに伴う絞りが無く脆性的な破断¹⁾であったことが確認できる。



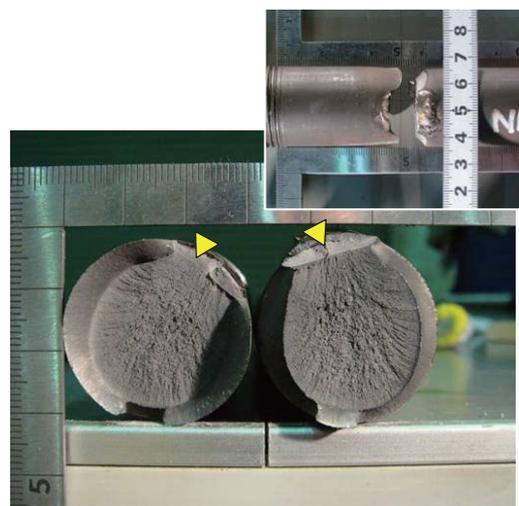
①WD-B1-32-1



②HD-B1-32-1



③WR-B1-32-1



④HR-B1-32-1

▼ : 破断面起点部

写真-3.5 曲げ引張試験（熱影響あり）による破断面の例

2) 破断荷重

入熱することで、全ての鋼棒種で破断荷重は規格値(P0)や試験成績表による破断荷重(P3)に対して低下が認められる。

特に圧延鋼棒(WD, WR)では規格値(P0)に対して破断荷重が10%以下(耐力低下率90%以上)という極端な低下を示した。

熱処理鋼棒(HD, HR)においても、総ねじ鋼棒のφ25では規格値(P0)に対して破断荷重が30%以上の顕著な低下となった。

熱処理鋼棒(HD)では、径による破断荷重の低下の程度に大きな差がみられ、φ25の30%程度の低下に対して、φ32では最大5%程度の低下であった。

表-3.14 曲げ引張時の破断荷重（熱影響あり）

（単位：kN）

	P1（実測破断荷重）				P0 （母材部 規格値）	P3 （試験成績表破断荷重）		破断荷重比	
	平均値 P1 _{av}	供試体1	供試体2	供試体3		母材一般部	ねじ加工部	P1 _{av} /P0 ×100 (%)	P1 _{av} /P3 ×100 (%)
WD-B1-26	40.5	44.6	37.7	39.1	573	623.5		7	6
WD-B1-32	67.2	64.9	58.9	77.8	869	924.6		8	7
HD-B1-25	383.7	386.6	406.8	357.6	548	583		70	66
HD-B1-32	847.8	877.1	840.3	826.0	858	898		99	94
WR-B1-32	78.1	86.1	70.4	77.8	869	988.9		9	8
HR-B1-32	802.3	789.2	815.4	-	869	910		92	88

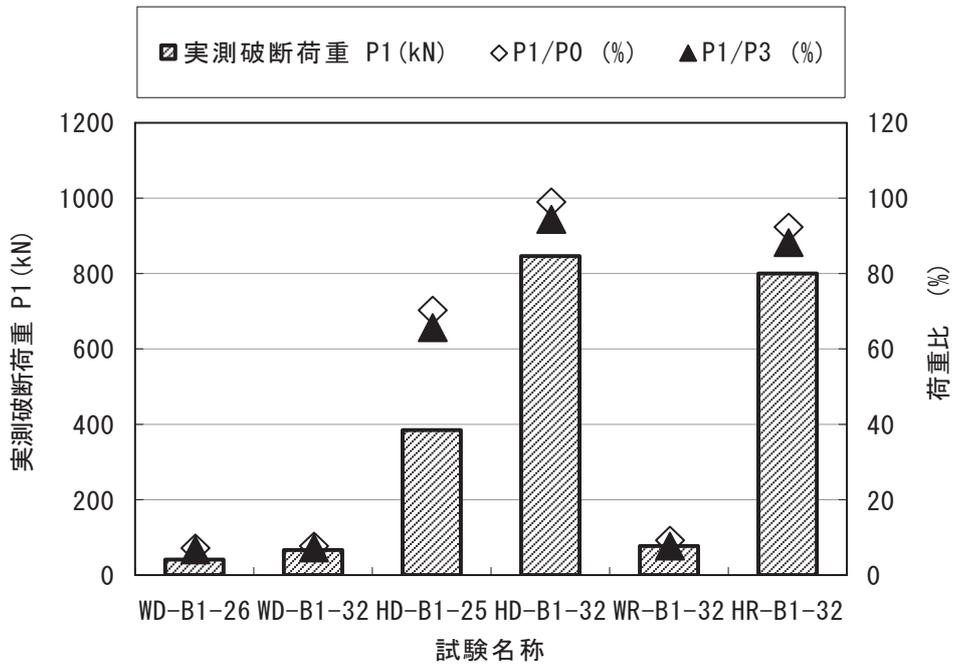


図-3.8 曲げ引張時の破断荷重と破断荷重比（熱影響あり）

3) 引張強さ

表-3.15 に算出した引張強さの一覧を示す。また、表-3.16 に各引張強さの規格引張強さに対する比の一覧を示す。図-3.9 にシリーズ毎の実験結果を示す。

熱処理の総ねじ鋼棒のφ32 (HD-B1-32)を除き、規格引張強さに対して顕著な低下がみられる。

特に、圧延鋼棒 (WD, WR) では規格値 (σ_0) に対して 10%以下となり、90%以上の強度低下を示した。

熱処理鋼棒 (HD, HR) の強度低下率は圧延鋼棒に比べて小さいが、総ねじ鋼棒のφ32 (HD-B1-32)を除いて最大 20%程度の強度低下となるなど確実に強度低下がみられた。

表-3.15 曲げ引張時の引張強さ (熱影響あり)

(単位: N/mm²)

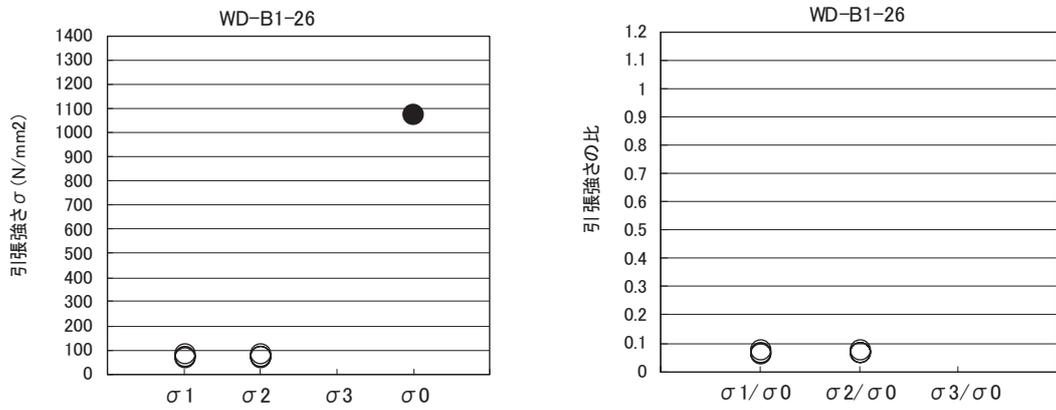
	σ_1 (実測引張強さ)				σ_2 (実測換算引張強さ)				σ_3 (ねじ部換算引張強さ)				σ_0 (=P0/A1)
	平均値	供試体1	供試体2	供試体3	平均値	供試体1	供試体2	供試体3	平均値	供試体1	供試体2	供試体3	
WD-B1-26	76.2	84.0	71.0	73.6	77.9	85.9	72.6	75.3	—	—	—	—	1079.2
WD-B1-32	83.6	80.7	73.2	96.7	85.9	82.9	75.3	99.4	—	—	—	—	1079.2
HD-B1-25	757.2	763.0	802.8	705.7	816.5	822.7	865.7	761.0	—	—	—	—	1081.5
HD-B1-32	1067.5	1104.4	1058.0	1040.0	1151.7	1191.5	1141.5	1122.1	—	—	—	—	1080.3
WR-B1-32	97.1	107.1	87.5	96.7	96.0	105.8	86.5	95.6	—	—	—	—	1080.5
HR-B1-32	997.6	981.3	1013.9	—	1030.2	1013.4	1047.0	—	—	—	—	—	1080.5

() : ねじ加工部の破断

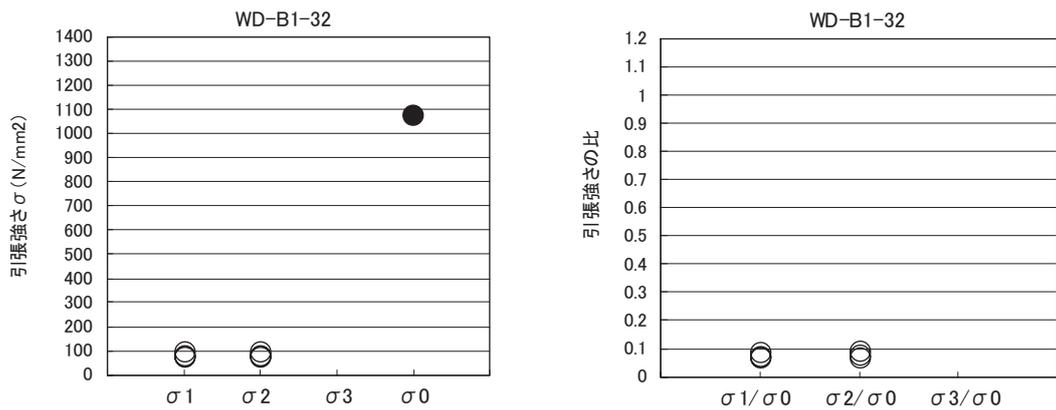
表-3.16 曲げ引張時の引張強さの比 (熱影響あり)

	σ_1 (実測引張強さ)/ σ_0				σ_2 (実測換算引張強さ)/ σ_0				σ_3 (ねじ部換算引張強さ)/ σ_0			
	平均値	供試体1	供試体2	供試体3	平均値	供試体1	供試体2	供試体3	平均値	供試体1	供試体2	供試体3
WD-B1-26	0.071	0.078	0.066	0.068	0.072	0.080	0.067	0.070	—	—	—	—
WD-B1-32	0.077	0.075	0.068	0.090	0.080	0.077	0.070	0.092	—	—	—	—
HD-B1-25	0.700	0.705	0.742	0.653	0.755	0.761	0.800	0.704	—	—	—	—
HD-B1-32	0.988	1.022	0.979	0.963	1.066	1.103	1.057	1.039	—	—	—	—
WR-B1-32	0.090	0.099	0.081	0.090	0.089	0.098	0.080	0.089	—	—	—	—
HR-B1-32	0.923	0.908	0.938	—	0.953	0.938	0.969	—	—	—	—	—

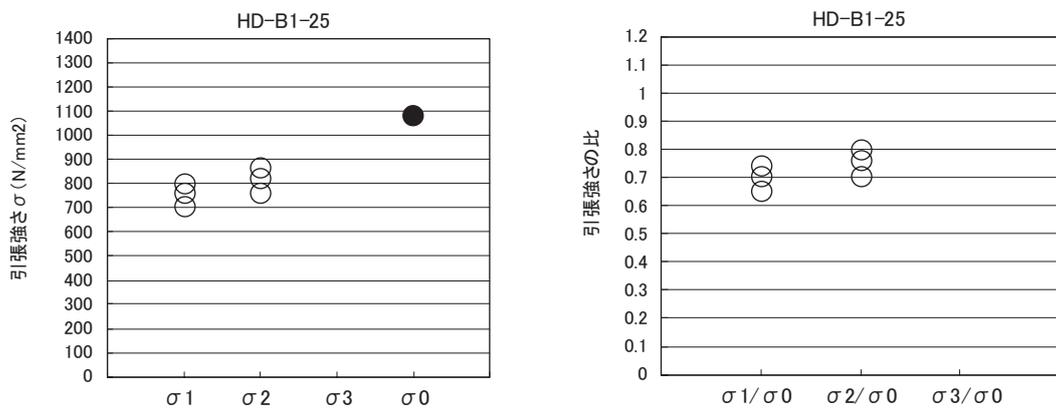
○	$\sigma 1$: 実測引張強さ	(P1/A1)
○	$\sigma 2$: 実測換算引張強さ	(P1/A2)
○	$\sigma 3$: ねじ部換算引張強さ	(P1/A5)
●	$\sigma 0$: 規格引張り強さ	(P1/A1)



(a) WD-B1-26



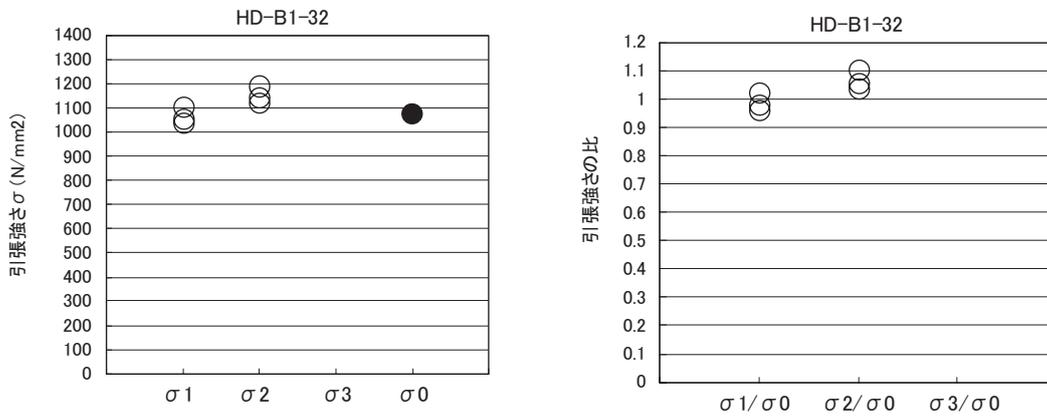
(b) WD-B1-32



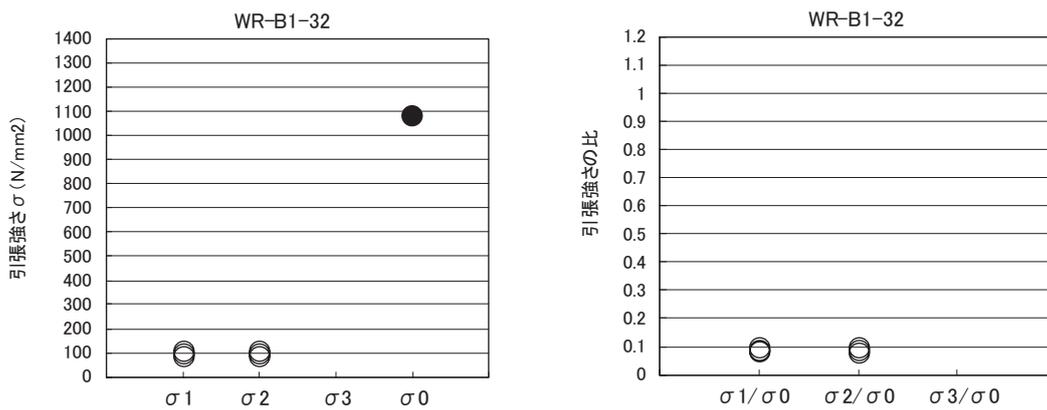
(c) HD-B1-25

図-3.9(1) 曲げ引張試験による引張強さ (熱影響あり)

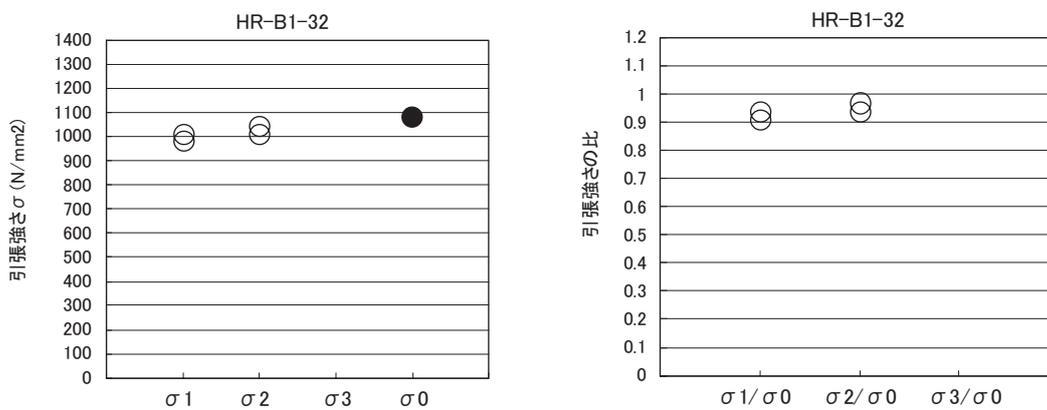
○	$\sigma 1$: 実測引張強さ	(P1/A1)
○	$\sigma 2$: 実測換算引張強さ	(P1/A2)
○	$\sigma 3$: ねじ部換算引張強さ	(P1/A5)
●	$\sigma 0$: 規格引張り強さ	(P1/A1)



(d) HD-B1-32



(e) WR-B1-32



(f) HR-B1-32

図-3.9(2) 曲げ引張試験による引張強さ (熱影響あり)

3.4 入熱の影響

鋼棒種、径毎に各引張試験（曲げ有無、熱影響の有無）結果の破断強度を比較したものを図-3.10～14に示す。

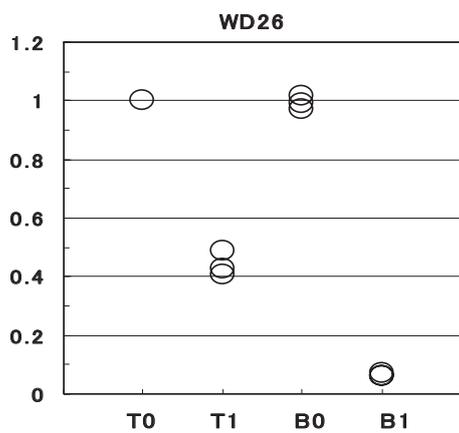
図-3.10のグラフは熱影響のない軸引張試験（T0）の破断荷重によって無次元化した値である。熱影響のある結果（T1, B1）は、顕著な強度低下がみられる。また熱影響のない条件では曲げの有無（T0, B0）による差異はほとんど見られないのに対し、熱影響のある条件（T1, B1）の比較では、曲げ引張試験（B1）の結果が曲げの影響のない軸引張試験（T1）の結果を大きく下回る結果となっており、強度低下は最大で90%程度におよぶ。

図-3.11, 12は、熱影響のない条件における曲げの影響を示したものである。各供試体の曲げ引張試験の破断強度を軸引張試験結果の平均で除した値をプロットしている。破断強度の低下はほとんどみられないが、圧延鋼棒（WD, WR）は熱処理鋼棒（HD, HR）に比べて試験結果のばらつきがわずかに大きい結果となった。（図-3.12）

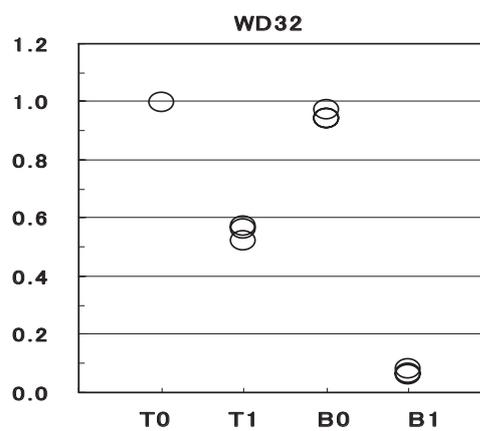
図-3.13は、熱影響を受けた鋼棒における曲げの影響を示したものである。熱影響を与えた鋼棒の各供試体の曲げ引張試験（B1）の破断強度を同じく熱影響を与えた供試体の軸引張試験結果の平均で除した値をプロットしている。熱処理鋼棒のφ32（HD32, HR32）を除き大幅な強度低下がみられる。

図-3.14は、鋼棒の適正な使用形態である熱影響がなく曲げ作用がない軸引張状態での性能と熱影響と曲げの両方の影響が組み合わさった条件の性能の比較を示したものである。熱影響を与えた鋼棒の各供試体の曲げ引張試験（B1）の破断強度を熱影響のない軸引張試験（T0）の結果で除した値をプロットしたものである。全てのケース（鋼棒種、径）で強度の低下が生じ、条件によっては破断強度が90%以上も低下する。

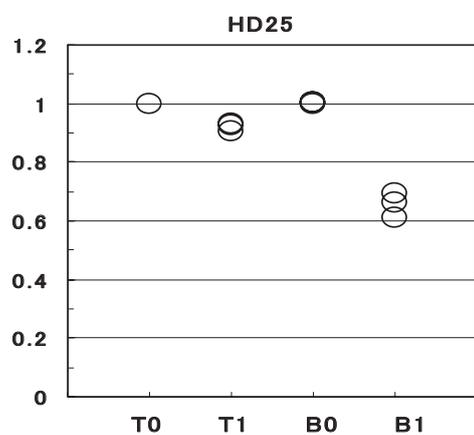
また、比較的低下率の小さいケースでも低下の程度はややばらつきがみられ熱影響や曲げの影響によって鋼棒の強度とその信頼性が大幅に低下するものと考えられる。



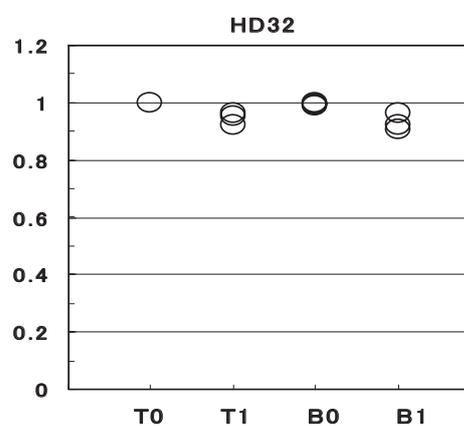
(a)WD 26 シリーズ



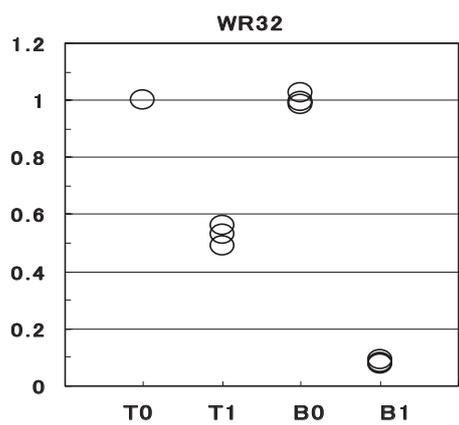
(b)WD 32 シリーズ



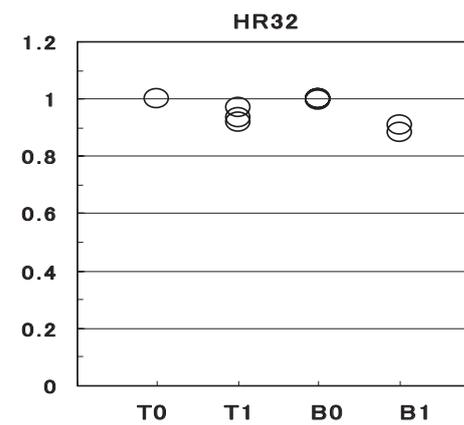
(c)HD 25 シリーズ



(d)HD 32 シリーズ



(e)WR 32 シリーズ



(f)HR 32 シリーズ

図-3.10 破断強度の比較

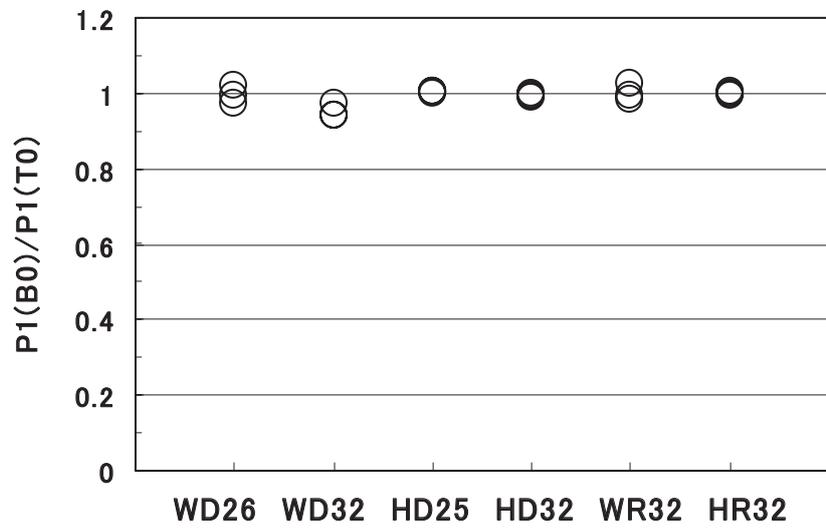


図-3.11 破断強度の比較(曲げ作用の影響)

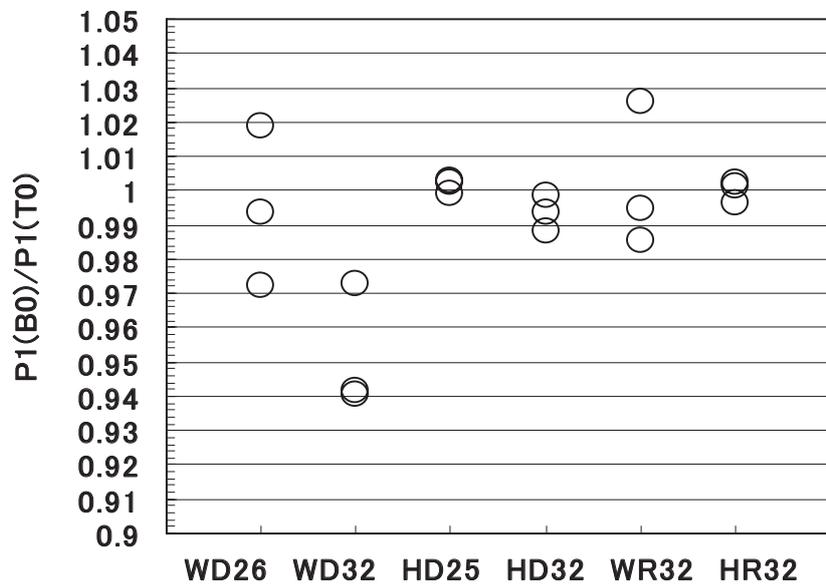


図-3.12 破断強度の比較(曲げ作用の影響)
(図-3.11の縦軸スケールを拡大したもの)

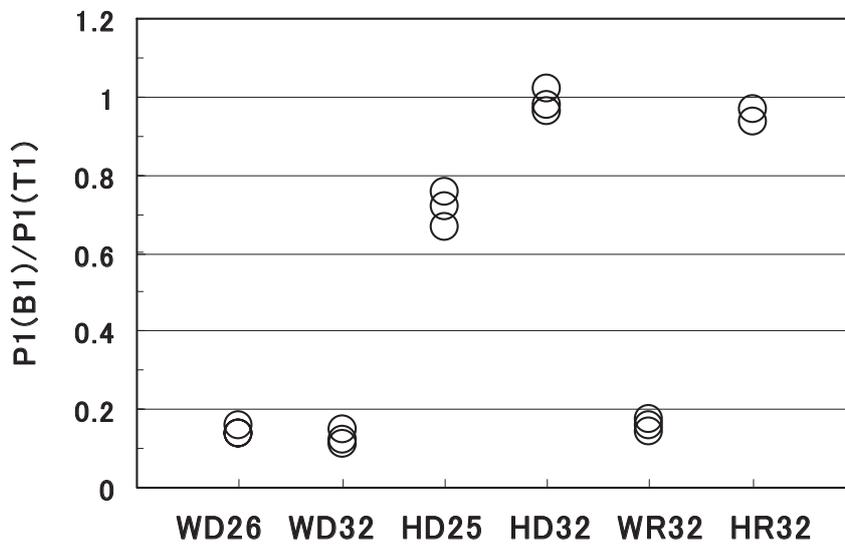


図-3.13 破断強度の比較（熱影響時の曲げ作用の影響）

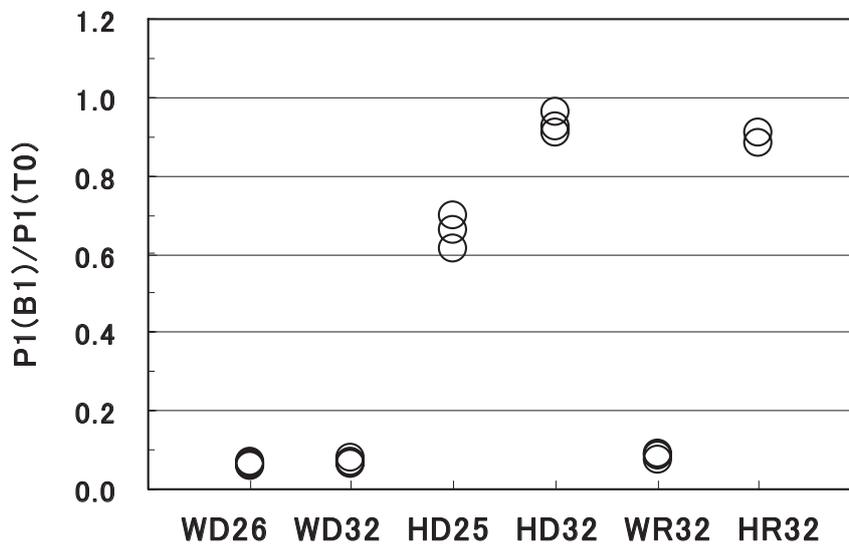


図-3.14 破断強度の比較（熱影響と曲げ作用の組合わせの影響）

[3章 参考文献]

- 1) 例えば、C. R. Brooks, 加納, 菊池, 町田 : 金属の疲労と破壊-破面観と破損解析-, PP. 91 - 100, 1999
- 2) 日本規格協会 : JIS G 3109 (PC 鋼棒)
- 3) 土木学会:コンクリートライブラリー66 プレストレストコンクリート工法設計施工指針, 1991
- 4) (社)日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説 I 共通編, PP76~77, 平成 14 年 3 月