

鉄筋コンクリート用鋼材の最近の動向と問題点

丸安隆和・小林一輔

引張り強さ、付着強さの大きい鉄筋コンクリート用鋼材の開発が急がれているが、その現状と問題点について解説したものである。

1. ま え が き

鉄筋コンクリート構造物をつくるのに用いる鉄筋は、いままでは主として丸い棒鋼が使われていた。棒鋼の規格のうちで、鉄筋として使用されるものは SS39, SS41 と SS49, SS50 の二つのグループのもので、その許容応力度はそれぞれ $1,400 \text{ kg/cm}^2$ と $1,600 \text{ kg/cm}^2$ となっていた。しかし、最近世界的に許容応力度を $2,200 \text{ kg/cm}^2$ とか $2,400 \text{ kg/cm}^2$ まで使えるような特殊な鉄筋を使用する情勢になってきた。これによって部材の断面が小さくなって自重が減じ、いっそう設計が経済的になり、鉄筋の本数がへるので、コンクリートの打込みが楽になり、いいコンクリートができ上がり、コンクリートも強い強度のものになるといういくつかの利点が循環して生じてくるのである。

しかし、鉄筋の許容応力度を高めて、この限度まで荷重を加えようとする、当然コンクリートの引張側に亀裂が入るが、この場合丸棒だと、この亀裂は数は少ないが非常に大きいものになる。

鉄筋コンクリートで亀裂幅を普通 0.2 mm 以下におさえている。これは亀裂が 0.2 mm 以下であれば、荷重を取り除けば亀裂が閉じて実害は生じないが、 0.5 mm 以上にもなると、そこから雨水が浸入し鉄筋を腐食したり、凍結したりして構造物に損傷を与えることになるからである。

したがって高強度の鉄筋を用いる場合には、丸鋼にくらべてコンクリートとの付着ははるかに強固であって、亀裂は数多くはいるが、亀裂の幅が小さいものであるようにすることが必要となるのである。これらの要求を満たすためには、鉄筋をどんな形にするのがよいかについていろいろ試みられてきた。わが国では異形丸鋼が規格になっているが、これは付着強度を増すだけを目的とし、強度については普通丸鋼とまったく同じで、まだまだ広く利用されているという段階ではないが、付着強度が十分大きくなるだけでも、鉄筋端にフックをつけることもいらなくなり、継ぎ手の重ね合せの長さも短くてすみ、非常に作業が楽になるし、経済的にもなるという

ことは既に一般に認められている。

2. 鉄筋の強度を高める方法

鋼材の強度を高めるには、普通 (i) 成分を変える (ii) 冷間加工をする の二通りの方法がとられている。成分を変えて強度を高めたものには、アメリカの High Strength Billet-Steel (ASTM A-431)、スエーデンの Kam Steel、ソ連の St 5 ps バラニド鋼などがある。わが国でも最近尼崎製鉄から DACON (写真 1) が発売された。



(a) (b)
写真 1 DACON

冷間加工によるものには、ドイツの Rippen-Torstahl イギリスの Tentor Bar などが有名である。いずれも振りを加えて冷間加工したものであるが、振りを加える機械は両端が固定されているので、ねじるさい多少の引張りも合わせ加えられることになる。

強度を高めるのにどちらの方法が有効であるかについては、一概にきめることはできないが、その特長を比較すると次のようなことがいえる。

一般に冷間加工をしないで降伏点を高めようとする、応力-ひずみ曲線の直線部分が少ないので、引張強度の非常に高い鋼を用いることが必要となる。たとえばドイツの規格 DIN 17100 による普通鋼では引張り強度に対する降伏点の比は St 37 で 0.65 あるが、St 70 になると 0.53 となる。ところが冷間加工した Torstahl では、ねじり方によって $0.80 \sim 0.84$ となる。実際に設計の規準となるのは降伏点であるから、この点からすると、冷間加工の方が有利である。

付着強度を高めるための方法として鉄筋にリブをつけるのが有効であり、いままでもこれが利用されてきた。しかし、いろいろ実験した結果によると、リブの形や配置が悪いと、特にねじり加工を行なったとき、そこが弱

点となって鉄筋の性質を損うことがある。実際写真2に示すような星形のリップをつけてねじり、試験してみると、必ずねじりによって圧縮をうけるリップのつけ根から

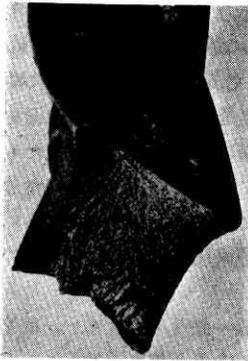


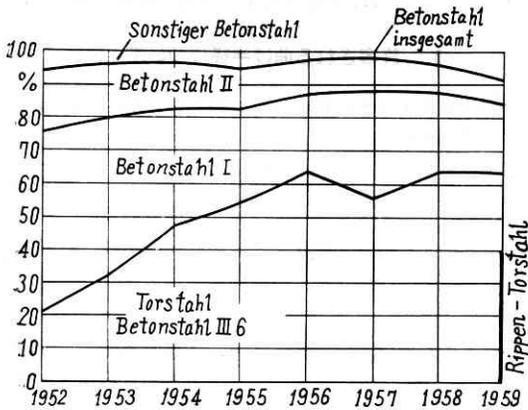
写真2 星形リップ

亀裂の生じることがわかった。どんな形のリップをつけるのがよいかは、特にねじり鉄筋の場合、非常に重要な問題となる。

上述のようにそれぞれ得失はあるが、ドイツでいろいろ試験をした結果、ねじり加工を施して強度を高める方法を採用することにし、Rippen-Torsteel が生

れた。第1図はドイツにおける鉄筋の使用が年とともに、どんな風に変わってきたかを示している。冷間加工による Rippen-Torsteel の使用量のめざましい増加が目されるであろう。

日本でもこれらの世界情勢に刺戟されて、八幡・富士などの大メーカーでも新しい鉄筋の開発にのり出したの

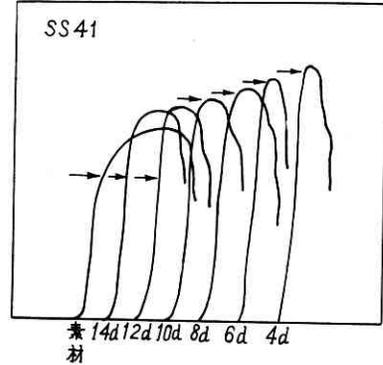


第1図 ドイツにおける鉄筋使用量の変遷

である。

3. ねじりの程度をどのぐらいにするのがよいか

冷間加工を行なうと、引張強度・弾性係数・伸び等の性質が変わってくる。ねじり鉄筋の場合、ねじり方によって、これらの性質がどのようにかわるかについて、たくさんの実験が行なわれている。第2図はねじり方によって応力-ひずみ曲線がどのように変わるかの一例を示した。ねじりの程度は、鉄筋直径の何倍の長さで360°ねじるかを示される。たとえば 42 kg/mm²、降伏点比0.75のものを 12d でねじった場合 (d=鉄筋直径) 引張り強さは 54 kg/mm²、降伏点比は0.84となっている。強くねじるほど、引張り強さは大きくなるが、その他の性質たとえば伸び率、脆性などに欠点が生じてくるので、い

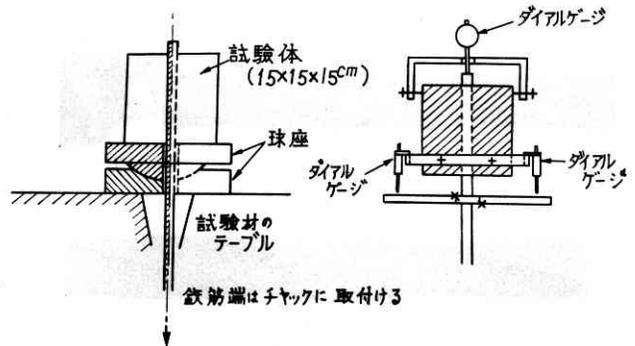


第2図 振りのピッチと歪応力曲線

ま 8d~12d ぐらいのものが多く使われている。

4. ねじり鉄筋のコンクリートとの付着強度

コンクリート中に埋め込んだ鉄筋のコンクリートとの付着強度は、第3図のように 15cm 角の立方体の試験体をつくり、偏心のかからないように球面支承を介して鉄筋を引っばって測定する。



第3図 付着強度試験装置

付着強度は次のようにして計算する。ねじり鉄筋では単位長さ当たりの重量と比重 (7.85) から丸棒に換算し、その換算丸棒の周長と埋め込み長さから付着面の面積を求め

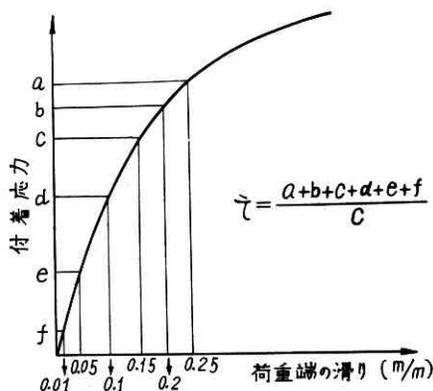
$$\tau = \frac{P}{UL}$$

ここに

P……各段階ごとの荷重 U……換算周長

L……埋め込み長さ

から各荷重ごとのτを計算する。別に測定している鉄筋端のスリップとの関係を第4図のようにグラフにえがく。載荷端の滑りが0.01, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 mm の場合の付着応力τの値を上式で求め、それらの平均値を平均付着強度とする。



第 4 図

写真3は富士山を二つあわせた断面の棒鋼を 12.5 d でねじったものである。形から想像するかぎりでは、丸棒と比較した場合、付着強度は非常に大きくなるだろうと考えたのであるが、実際に試験してみると、荷重がかかると同時に試験体は球座の上で回転をはじめ、きわめて容易にぬけ出してしまった。このため試験体を固定して再び実験したが、この場合も鉄筋自身がねじられて、コンクリートにはなんら損傷を与えないで引きぬけた(写真3)。

これらの実験から、ねじり鉄筋が付着強度を十分に発

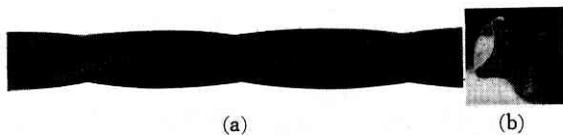


写真 3



写真 4

揮するためには、縦方向の肋の外に回転を抑制する横肋が必要であることが確認された。写真4は、これに肋をつけた鉄筋であるが、付着強度はこの肋で飛躍的に増大した。

しかし、肋をつける時、その形や配置の仕方によって鉄筋にいろいろな影響を与えることがわかっている。Rippen-Torstahl はこの意味で非常にすぐれた形ものものといえるだろう(写真5)。

付着強度が大きくなると、鉄筋コンクリートはりに荷重を加えたときに生ずる亀裂の発生状態が改良されるこ

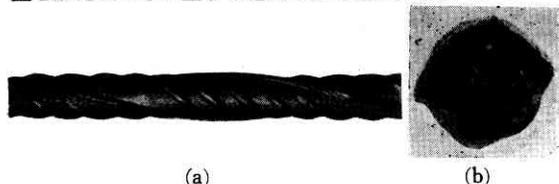


写真 5 Rippen-Torstahl

とは前にも述べた。φ26 mm の Rippen-Torstahl と従来の異形鉄筋とを使ってつくった 30×62.5×450 cm の鉄筋コンクリートはりについて亀裂の発生状況を比較した。実験に当たっては鉄筋の応力 500 kg/cm² ごとに亀裂幅を測定し、3,000 kg/cm² に達した後、0~3,000 kg/cm² の荷重を 15 回繰り返して 6' 回目とし、さらに荷重を 5,000 kg/cm² まで増加させたときの亀裂の状況を測定した。第 5 図および第 6 図はその結果を図示したものであるが、Rippen-Torstahl は従来の異形鉄筋の付着特性に決しておとっていないことがわかったし、さらに鉄筋比が小さいほど、また鉄筋直径の大きいほど、その効果が大きいことを知り得た。

このことは、鉄筋の許容引張り強度を大きくし、鉄筋の使用量を少なくしようとするとき非常に有効なことである。はりに入れた鉄筋はもちろん鉄筋端にフックをつけていないが、はりの破壊は圧縮部分のコンクリートが圧潰しており、定着した鉄筋端の破壊時におけるすべり量は数 mm に過ぎず、フックをつけなくても十分安全であることが立証された。ただ、地震力に対して、付着力がどの程度の抵抗性があるか、フックが必要なのではないか等については、今後の大きい問題となるであろう。

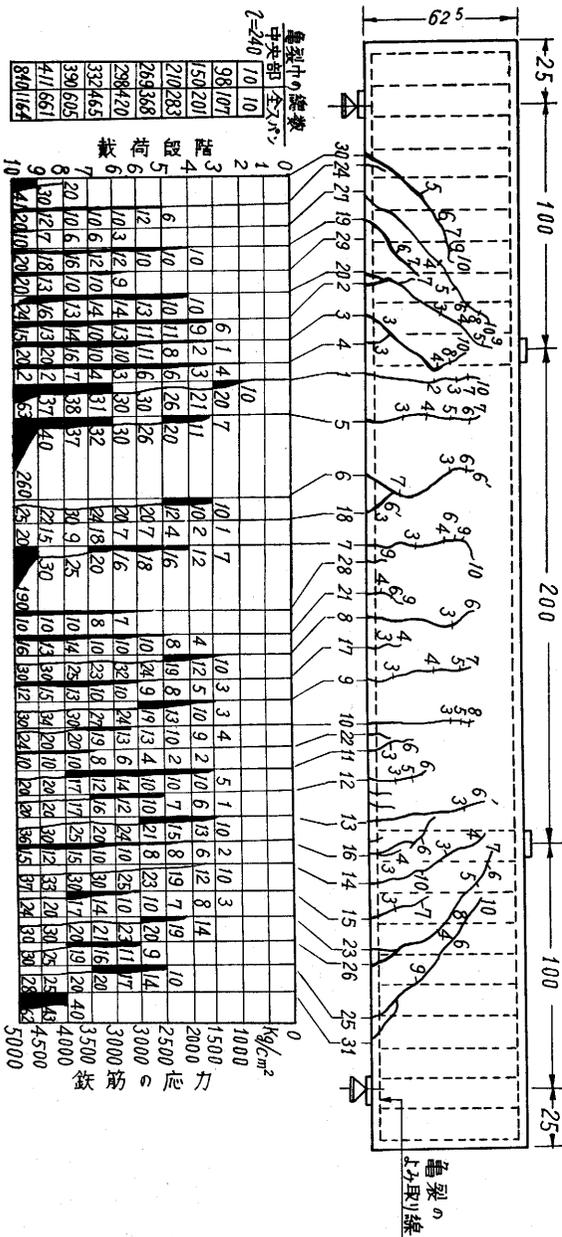
5. 許容される曲げ半径について

ドイツでリブつき鉄筋を使用し始めた初期に、普通丸鋼について定められている亀裂試験によって試験した結果では、リブつき鉄筋も施工現場でコンクリートが打ち込まれるまでに受けるいろいろな外力に対しては、十分安全であることが確かめられた。しかし鉄筋にはこれ以外に、故意にまたは偶然に、逆曲げが加えられることもある。

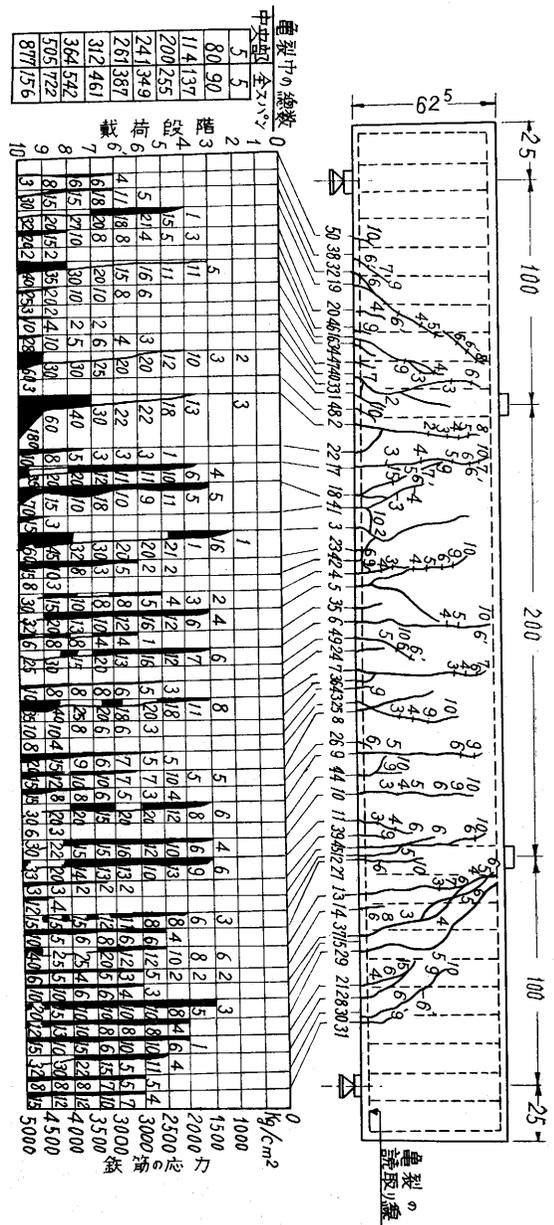
このような曲げが加えられると、その当時なんら支障がないようでも、長い時間たつと、その部分の曲げ特性が退化して自然に亀裂のでることがある。このような時効効果を考慮して、ドイツでは 1954 年に「リブつき鉄筋についての暫定規準」の中に曲げもどし試験の方法を規定して、人為的な時効作用を加えて試験することにした。

暫定規準によると、鉄筋を 7d の半径で 45° まげ、これを 30 分間 100°C の湯の中に浸した後、20°C まで冷してから 22.5° まで曲げもどして亀裂の発生を見るのである。Rippen-Torstahl について、ドイツでは非常にたくさんの曲げもどし試験を行なった。しかし、この試験方法は割合にゆるやかな規定であるので、わが国の鉄筋について試験した結果でも、顕著な亀裂を発見する場数が少ない。このため、最初 90° まげたり、0° まで曲げもどしを行なうなどの方法を併用して鉄筋の曲げ特性を比較することが広く行なわれている。

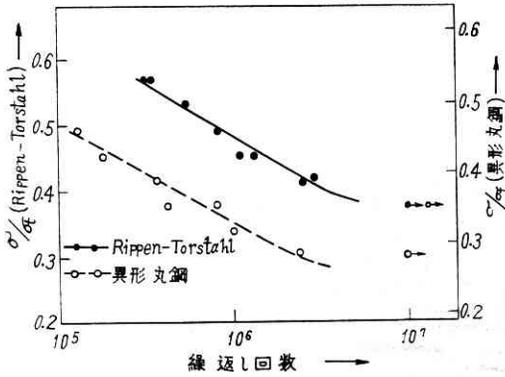
いずれにしても、このような試験では、「合格」か「不



第 5 図 リブ付鉄筋Ⅲを用いたコンクリート梁の亀裂の幅と生じた順序
 コンクリート強度 $\sigma_{28}=159 \text{ kg/cm}^2$,
 鉄筋 $2\phi 26$,
 亀裂幅単位 $1/100 \text{ mm}$.
 $6' = 15$ 回繰返し



第 6 図 Rippen-Torstahl を用いたコンクリート梁の亀裂の幅と生じた順序
 コンクリート強度 $\sigma_{28}=188 \text{ kg/cm}^2$,
 鉄筋 $2\phi 26$,
 亀裂幅単位 $1/100 \text{ mm}$,
 $6' = 15$ 回繰返し



第 7 図

合格”を決めることはできても、どんな条件のもとでなら曲げに対して十分な安全性があるかをきめる数量的な資料が得られない。したがって、破壊することなく曲げられる最小半径をきめるためには、各社ごとにそれぞれ十分な実験を行なうことが必要である。

しかし、リブつき鉄筋の最小曲げ半径をきめるについては、鉄筋についての特性ばかりでなく、規定どおりに曲げて使い、これに規定の許容応力に達するまで荷重を加えた場合、曲げ半径があまり小さすぎると、折り曲げた箇所がコンクリートが、局部的に破壊することが起こる。この点についても十分考慮しなければならない。

6. 繰返し荷重に対する特性

O. Graf と G. Weil が実験の結果リブつき鉄筋が繰返し荷重をうけると、他の丸棒にくらべて、その耐久性が小さいことを確め、動荷重をうける部材には使用しないようにと勧告した。ドイツの規定ではリブつき鉄筋は“vorwiegend ruhender Belastung”を受ける部材に対してだけ用いてよいと規定されたので、一時リブつき鉄筋

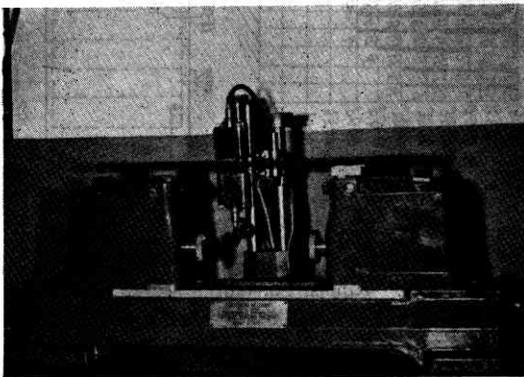


写真 6

の利用が減少した。しかし、リブつき鉄筋が繰返し荷重に対して弱いのは、リブの形状・寸法・配置に支配され

るので、これらの点について十分考慮すれば、繰返し荷重に対しても十分耐久的事であることがわかった。

われわれが行なった実験結果によっても、このことは非常に顕著であって(第7図)在来の異形鉄筋(SSD 49)が $\sigma/\sigma_e=0.43$ で約20万回で破断するのが、Rippen-Torstahlではおよそ200万回に達して、ようやく亀裂が発生するのである。

ドイツでも最近 Rippen-Torstahl に対しては、この規定を削除することになったと聞いている。

写真6はわれわれの実験室で、各種の形のリブつき鉄筋について、共振式疲労試験機を用いて繰返し試験を行なっているところである。

7. 衝撃に対する耐久性

冷間加工した鉄筋の衝撃に対する耐久性をしるために鉄筋コンクリート版について爆破試験が行なわれた。

この研究においては種々の鉄筋で補強した版に、爆風による衝撃を与え、どんな高張力鋼まで用いられるか、許容応力をどれほどにとったらよいかについて検討された。その結果によると Rippen-Torstahl を用いた場合が非常にすぐれた結果を示した。しかし、衝撃荷重に対しては、安全度を静荷重の場合よりも大きくとることが望ましいので、ドイツの規定では Rippen-Torstahl に対して衝撃に対する許容応力度を $1,900 \text{ kg/cm}^2$ (静荷重に対しては $2,400 \text{ kg/cm}^2$)にきめている。

わが国では構造物設計に当たっては地震力を考えなければならない。地震力は、大きい衝撃的な作用を与えるものであるから、わが国でねじり鉄筋を用いて構造物の設計をするためには、これらの問題についても十分考慮し研究しなければならない。

8. 溶接について

施工場所の条件や構造物の種類によっては、鉄筋の組立てに溶接を用いなければならない場合が生ずる。もちろん丸棒にくらべると、重ね継ぎの長さは短いし、それだけで鉄筋の幅そうする度合は少ないので、溶接の必要性が丸棒ほど切実ではないかも知れないが、冷間加工したねじり鉄筋については、どうしても溶接の材質に及ぼす影響について考慮しておかねばならない。

種々の実験結果を総合すると、冷間加工を施した鉄筋を溶接しても、加熱による強度低下は起こらないことが判明している。しかし、溶接にあたっては、できるだけ温度を高めないように方法で行なうことが必要であるし、また十分な管理のもとに行なわなければならないことはいままでもない。

写真7は溶接した Rippen-Torstahl を折り曲げたときの状態を示している。



写真 7

9. 異形鉄筋の公称直径

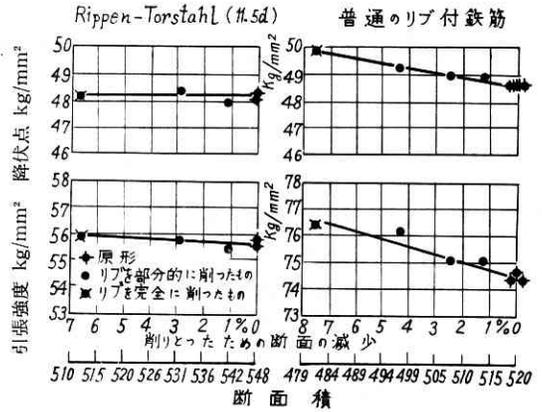
異形鉄筋の公称直径は、前述したように単位長さの重量を測り

$$d = 12.8 \sqrt{g} \text{ (mm) } (g: \text{単位長の重さ gr})$$

で求める。余分に横リブがついていると重さがふえ、したがって公称直径が大きくなり、横リブのない部分の実際の直径は公称直径よりも小さくなる。鉄筋に作用している応力の計算は公称直径が基礎になるから、実際に横リブのないところに作用している応力は、計算値よりも大きいという結果になる。

したがって、異形鉄筋では、どこで切ってもリブを含めた断面積が同じで、リブも有効に応力を受持つようなリブにすることが望ましい。第 8 図は Rippen-Torstahl と在来の異形鉄筋について、旋盤でリブを段々にけずって行って引張り強度を試験したときの状況を示している。

在来の異形鉄筋では、引張り強度が 3% も増加してい



第 8 図

るのに、Rippen-Torstahl ではほとんど変化がない。いつも全長にわたって同じ応力をうけていることがわかるのである。

10. む す び

高強度の鉄筋の普及が世界的な傾向として起こっているとき、わが国でもその情勢におくれのないような態勢を整えることが必要になって、いま各社でその研究にいそがしい。どんな形のものをつくるのがよいか、この点では Rippen-Torstahl はその形が特許になっているという事情があって、その優秀性は認めながらもこれをそのまま採用することはできない。

独創的な異形高強度鉄筋を開発するには、前述のようないくつかの問題点を解決し、その利用方法についての指針を確立しなければならないのである。これはなかなか大変な仕事であることはいうまでもない。種々細部にわたる実験結果はあらためて報告することにし、現在の問題点のみ拾って報文とした次第である。

(1962年1月20日受理)

次 号 予 告 (4 月 号)

解 説

写真測量を応用した建築の実測 村松 貞次郎
 一旧工部省品川硝子製造所建築の実測 伊藤 三千雄

β-プロピオラクトンの重合 浅原 照三
 穂積 志富
 伴 光敏

放射化法による金属の研究 小林 昌敏

海外事情

ベル電話研究所の話 黒川 兼行