

# [140] 動的なボンド応力分布と鉄筋コンクリート構造部材の 靱性に与えるその影響

正会員 ○竹 田 仁 (熊本工業大学工学部)

藤 本 一 男 (防衛庁第4技術研究所)

河 村 隆 (国際航業株式会社)

## 1. まえがき

堅硬物の衝突などによる衝撃または爆発をうける鉄筋コンクリート構造物の設計方法は特に、欧米先進諸国において鋭意進められている。この種の荷重は構造物に度々繰り返されることは殆どなく、多い場合で数回程度、対象とする最大の荷重に対してはただ一回、安全に対処し得る性能が要求される。従って、この設計では、安全性を損わない範囲で大変形を容認する立場がとられている。更にまた、荷重が高速であり、時には高温高圧の爆発生成ガスに対する考慮が必要ながこの設計方法の特徴である。このような設計方法についての筆者等の研究は一昨年、西ベルリンBAMで開かれた「衝撃的荷重をうけるコンクリート構造物」に関する国際シンポジウムで報告した。<sup>1)~4)</sup>しかし、この設計方法の実用化までには多くの問題が残されている。

そのひとつに、第2次応答 (Secondary response)<sup>1)</sup>の計算に用いる靱性率の値がある。爆発による鉄筋コンクリート構造物の破壊では靱性率がかなり小さいことが以前から知られていたからである。この極端な例は高速剪断<sup>5)</sup>であるが、それだけではなく、通常大きな歪が期待される場合でも爆発の場合、かなり小さい歪で破壊する (4参照)。もっとも、この傾向はガス爆発などの比較的緩やかな爆発では、爆発の爆発程顕著ではないが、このような傾向を生ずる理由には鉄筋コンクリート構造物のボンド応力に対する荷重速度の影響が大きいと考えられたので、動的な鉄筋引抜きによるボンド実験を行なった。

## 2. 鉄筋引抜きによる高速ボンド実験

コンクリート角柱 (断面は10 cm × 10 cm) の中に鉄筋 (SD-35-D10 または SR-24-9φ) を埋めこんだ試験体 (図-1) を高速荷重実験装置に装着し、種々の速度で鉄筋引抜き実験を行なった。鉄筋の埋込み長さは異形鉄筋の場合、5、7.5、10、12.5及び40 cmの5種、丸鋼の場合は40 cmの1種である。鉄筋には予め、4 ~ 11枚のゲージ (ゲージ長さ0.2 mm) を貼り付けている。ゲージは、ふしに影響を与えないようリブの部分の4 × 4.5 mmの範囲を深さ約2mmだけ削り、そこに貼り付けた。試験体にはスプリットを防止するため6φのスパイラル筋を挿入した。コンクリートは水セメント比0.5の普通コンクリートで、粗骨材の最大粒径は10 mmである。試験体は4週間水中養生の後、実験室内に保管し、材令160 ~ 180日で実験を行なった。試験体と同様に養生したコンクリート円筒体の、ボンド実験時における静的圧縮強度は平均41.1 kg/cm<sup>2</sup>であった。

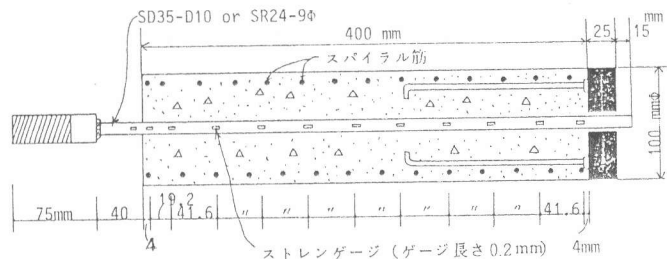


図-1. 試験体 (埋込み長さ40cmの場合)

実験では鉄筋が引抜かれるかまたは破断するまで荷重 (漸増荷重) を継続した。異形鉄筋埋込み長さ5 cm、7.5 cm及び丸鋼埋込み長さ40 cmの試験体では鉄筋が引抜けるいわゆる「付着破壊」を生じたが、その他の試験体では裸の部分の鉄筋が破断した。異形鉄筋を用いた試験体で「付着破壊」を生じたものは、当然のことながら、ふしの間のコンクリートがふしの頂点を連ねる円筒面で剪断され、平滑な穴が生じた。実験の荷重端における鉄筋引抜き速度は静荷重 (記号 (S))、平均引抜き速度  $\bar{\delta} = 0.8 \sim 6 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 、平均応力増加速度  $\bar{\sigma} = 20 \sim 40 \text{ kg/cm}^2/\text{s}$ 、中速 ( (III) )、 $\bar{\delta} = 1 \sim 5 \text{ cm/sec}$ 、 $\bar{\sigma} = 2 \sim 5 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2/\text{s}$ 、高速 ( (I) )、 $\bar{\delta} = 20 \sim 100 \text{ cm/sec}$ 、 $\bar{\sigma} = 0.7 \sim 2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2/\text{s}$

の3段階である。計測では引抜き荷重（歪ゲージ式ロードセル使用）、鉄筋各所の歪（ストレインゲージ使用）及び引抜き端の変位（ポテンシオメーター使用）を応答周波数 100 KHz の装置で測定した。

測定によつて得られた埋込み鉄筋の歪分布曲線から、それを微分してボンド応力分布曲線を、積分して鉄筋のものと位置からの変位（近似的に鉄筋のすべりに等しい）を求めた。実験における最大引抜き荷重を図-2 に示した。付着破壊を生じた異形鉄筋埋込み長さ 5 cm 及び 7.5 cm の場合、静荷重では最大引抜き荷重に大差はないが、中速及び高速では埋込み長さの長い程増大している。鉄筋が破断した試験体では当然、載荷速度による鉄筋引張強度の変化だけを共通に示している。

コンクリート中の鉄筋の歪は何れの場合も載荷初期には引抜き端部で最大で、内部に入るに従い急速にゼロまで低減する。この傾向は異形鉄筋埋込み長さ 40 cm の場合、荷重が増大しても変わらず、特に、中速及び高速では破壊に到るまで歪分布の範囲は変わらない。従つて、この分布から計算したボンド応力分布も図-3 に示したように上述の傾向を示しており、引抜き端部から約 20 cm の間に分布している。しかし異形鉄筋のその他の場合、及び丸鋼の場合は荷重の増加とともに歪分布の範囲は拡大し、破壊に近づくにつれて先端部分は付着が低下し、歪の最大位置は内部に進んで来る（図-4）。鉄筋の自由端近くの歪が増大したとき、ついに付着破壊が生じることが付着破壊を生じた場合の記録から知られる。付着破壊を生じなかつた異形鉄筋埋込み長さ 10 cm 及び 12.5 cm の試験体ではこの過程で、かろうじて付着破壊をまぬがれたことも知られる。異形鉄筋埋込み長さ 40 cm の静荷重の場合は破壊直前にはじめて歪分布が内部に移つて来る。

試験体の破壊が近付くと、コンクリート中の鉄筋は引抜き端部から内部に次第に降伏に入る。この鉄筋の降伏は異形鉄筋埋込み長さ 40 cm の場合、静荷重ではコンクリート内部 6 cm 以

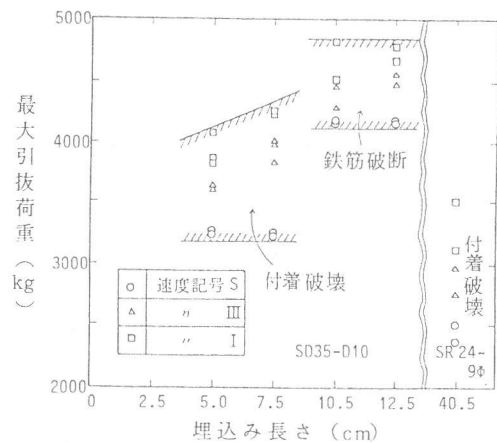


図-2 埋込長さ と 最大引抜き荷重

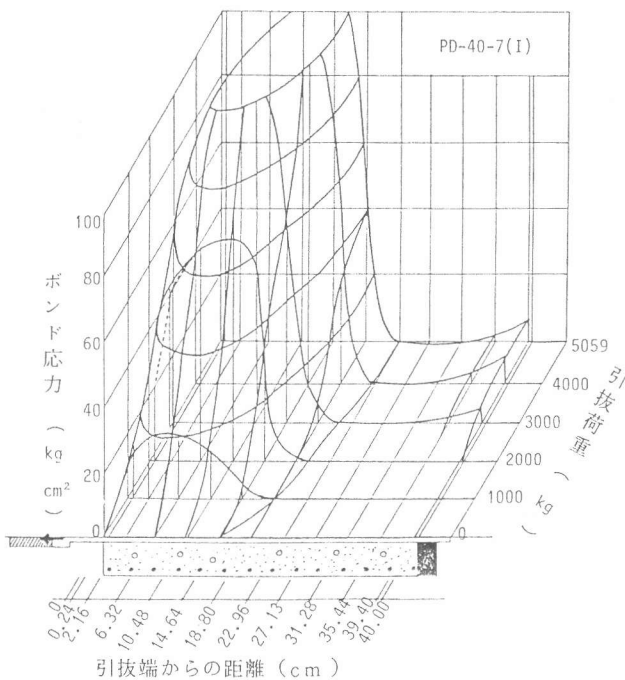


図-3 引抜き荷重によるボンド応力分布の変化（異形鉄筋埋込長さ 40 cm 高速実験の場合）

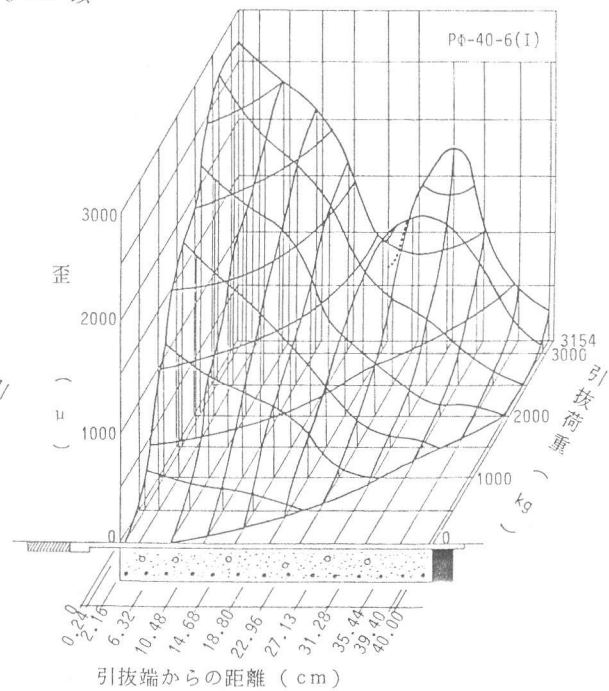


図-4 引抜き荷重による歪分布の変化（丸鋼埋込長さ 40 cm 高速実験の場合）

上に達するが、高速実験では6 cm までは及ばない。高速載荷では鉄筋の上位降伏点が上昇する<sup>2)</sup>からである。丸鋼の場合、歪の分布域は広く、鉄筋の降伏は約10 cm の深さに及ぶ。

異形鉄筋埋込み長さ40 cm の実験で、同一引抜き荷重の場合、同じ位置に作用する歪及びボンド応力は載荷速度の大きい程小さい。(図-5)。コンクリート及び鉄筋に対する速度効果の影響である。丸鋼の場合も同様の傾向が見られるが載荷速度による変化はそれ程顕著ではない。

### 3. 異形鉄筋に働くボンド応力

異形鉄筋の実験で付着破壊を生じた試験体では鉄筋のふしの間のコンクリートがふしの先端を連ねる円筒面で剪断されていたことから、異形鉄筋に働くボンド応力はふしとふしの間のコンクリートとの間の側圧及びコンクリートの剪断抵抗によって生み出されると考えられる。異形鉄筋埋込み長さ40 cm の試験体では前述のように引抜端から約20 cm の範囲にボンド応力が分布しており、ふしのピッチから計算すると約6.3ヶの位置で側圧と剪断抵抗が生じていることになる。これらの抵抗力が十分発揮されるにはふしに接するコンクリートに若干の圧縮歪が発生する必要があるため、主要なボンド応力分布域が鉄筋歪の大きな約20 cm の範囲に限られると考えられる。

コンクリート中に含まれる鉄筋の、もとの位置からのすべりの分布を図-6に示した。ただし、このすべりは鉄筋が弾性範囲にあるとして計算している。この図から同一引抜き荷重の場合、同じ位置のすべりは引抜き速度の大きい程小さくなる<sup>3)</sup>ことが知られるが、このことはふしの間のコンクリートの側圧及び剪断に対する速度効果であると考えられる。この図から、引抜端から約10 cm 付近で鉄筋のすべりが急速に増加し、それより引抜端に近い範囲では大きなすべりが生じていることが知られる。前述のように引抜端に近い部分では鉄筋の降伏も生じているから、すべりは更に大きくなると考えられる。

鉄筋のすべり分布についての上述の傾向は鉄筋コンクリート梁の曲げ実験で発生するクラック間隔と密接な関係をもつと考えられる。異形鉄筋D10を用いた梁試験体の高速曲げ実験(撓み速度  $2.0 \times 10^{-2} \sim 1.35 \times 10^2 \text{ cm/g}$ )で発生したクラックには10 cm 程度の間隔のものが多く見られた。これは以前行なったD-16及びD-19を用いた単筋梁でも同様であった(図-7)。この場合も実験を行なったすべての載荷速度で見られた。クラック間隔がボンド応力分布に関係があるとすれば、D-16、D-19の場合の上述の結果もまた、ボンド応力がふしとふしの間のコンクリートとの間の側圧及びコンクリートの剪断抵抗によって発生するという見方を支持している。なんとなれば、使用した鉄筋D-10、D-16及びD-19について一定長さにおけるふしの長さ方向の投影面積の合計は概ねそれぞれの鉄筋の断面積に比例し、それぞれの鉄筋が負担し得る引張荷重に等しい側圧等を発生するに必要な鉄筋の長さが概ね等しいからである。また、ボンド応力の発生についての上述の見解は付

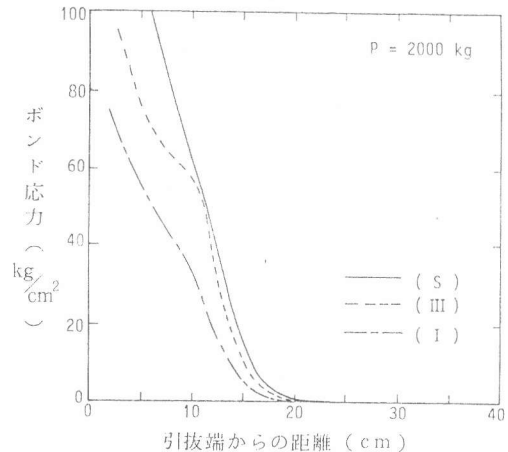


図-5 ボンド応力分布の載荷速度による比較(異形鉄筋埋込長さ40 cm、引抜き荷重P = 2000 kg の場合)

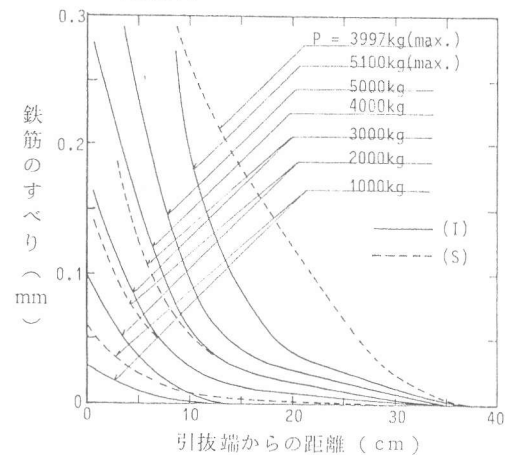


図-6 コンクリート中の鉄筋のすべりの分布(異形鉄筋埋込長さ40 cm の場合。載荷速度による比較)

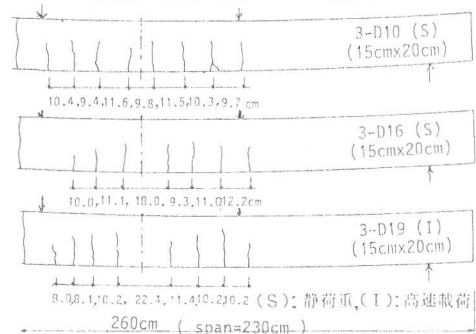


図-7 D10、D16、D19を使った鉄筋コンクリート単筋梁の曲げ実験(3等分点載荷)で発生したクラックの例

また、ボンド応力の発生についての上述の見解は付

着 破壊を生じた異形鉄筋の実験結果によってもその妥当性が知られる。この場合、破壊時における鉄筋のすべりの測定値は1表に例示したように高速実験の場合極めて小さくなっており、以前報告した高速剪断破壊で高速載荷時の剪断歪が極めて小さくなる実験結果と一致するからである。

#### 4. 爆発実験における鉄筋コンクリート構造物の靱性

爆薬を使った鉄筋コンクリート構造物の爆発実験ではコンクリート中の鉄筋はあまり伸びずに破断していることが多い。爆発実験で発生した破片の中の鉄筋または裸になっている破断した鉄筋から無作為に10本を集め (SD-30-D19)、その長さ ( $l$ ) ともとの長さ ( $l_0$ ) との比較を行なった (図-8)。この図からこれらの鉄筋は殆ど同程度の伸びを生じており、もし全体として伸びたとすれば歪はもとの長さの長い程小さくなる。従って、これらの鉄筋は全体にわたって伸びているのではなく、両端または中間の数ヶ所で局部的に伸びていることがわかる。両端だけで伸びている場合を調べるとその伸びはもとの長さとは無関係に平均1.7 cmであった。この中の1本について、ふし間の直径の変化を調査した (図-9)。この図によると直径の変化している部分の長さは両端合わせて14 cm (もとの長さ) 以下である。従って上述の1.7 cmの伸びは約12% (=1.7 cm / 14 cm) の歪にあたり、高速載荷のもとでは妥当な値であるが、全体としての歪は極めて小さい。

このような爆発による鉄筋コンクリート構造物の変形量の減少には二つの理由が考えられる。ひとつは軟鋼の高速引張実験で既に知られているように引張速度が大きくなると軟鋼は次第に脆性になることである。しかしこのことは本実験の程度では顕著な影響はないと考えられる。第2の理由は上述の報告のように異形鉄筋のボンド応力が引張端 (実際の構造物ではクラック端部に相当する) に近い比較的狭い範囲に分布し、特に高速載荷のもとでは鉄筋の破断が生ずるまでその範囲は拡大せず、鉄筋の局部的伸びが増大して破断すると考えられる。丸鋼を使った場合には異なる性状が見られると考えられる。

#### 5. 結論

##### (1) 鉄筋引抜きによる高速ボンド実験で異形鉄筋 (SD-35-D10) 埋

込み長さ40 cmの場合鉄筋は破断したが、付着破壊は終始、引抜端から約20 cmの範囲に分布した。埋込長さ5 cm及び7.5 cmではボンド破壊が生じ、10 cm以上では鉄筋が破断した。

##### (2) 同じ実験で丸鋼 (SR24-9Φ) 埋込長さ40 cmの場合、引抜荷重の増加とともにボンド応力分布域は拡大した。

(3) 爆発をうける鉄筋コンクリート構造物 (異形鉄筋使用) の靱性は甚だしく低下する。これは1項で述べたボンド応力分布の特性によると考えられる。

〔謝辞〕 実験に多大の労を煩わした千原和人君に感謝する。また実験に協力した佐藤良一助教授に感謝する。

〔参考文献〕 1)~4) J. TaKeda et al.; Proc. of Inter-ass. Symposium, P.13~18, P.83~91, P.185~187, P.289~295, (1982-6 Berlin BAM), 5) J. TaKeda et al.; Proc. of 7-ECFE P.23~30, 6) G. I. Taylor; Scientific Papers, Cambridge Univ. Press, P. 541

1表 異形鉄筋埋込長さ5 cmの試験体の付着破壊時における引抜端部のすべり (鉄筋の裸部分の伸びを含む)

載荷速度	平均引抜速度	ボンド破壊時のすべり
静荷重	$1.89 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$	3.12 mm
中速	2.19 $\text{ cm/s}$	3.60 mm
高速	2486 $\text{ cm/s}$	0.75 mm

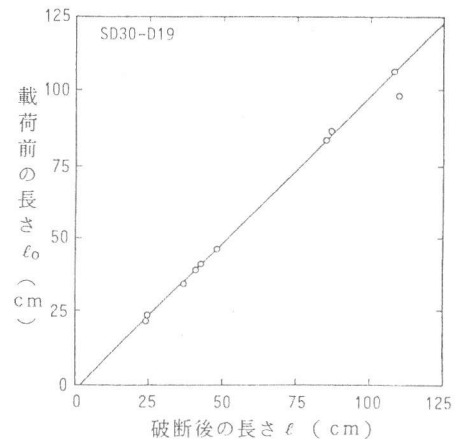


図-8 爆発実験で破断した鉄筋 (SD30-D19) の破断後の長さともとの長さ

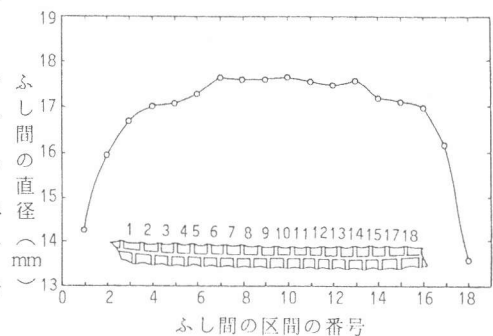


図-9 爆発実験で破断した鉄筋の直径変化 (SD30-D19)