

[2072] 鉄筋コンクリート構造物の大歪を対象とするボンド応力 とその耐爆耐衝撃性に与える影響

正会員 ○竹田 仁一 (熊本工業大学)
正会員 高本 秀幸 (熊本工業大学)
正会員 谷川 達彦 (熊本工業大学)

1. はじめに

昨年 4月26日ソ連ウクライナ、キエフ近くのチェルノブイリ原子力発電所施設の爆発事故はウクライナ地方だけでなく、世界中に種々の影響を与えた極めて不幸な事故であった。しかし、ただ一つ、この事故を契機として、このような重要施設の安全性は、最終的には施設の耐爆、耐衝撃性に求めなければならないという認識を共通のものにしたという理由で記憶に残る事故となった。欧米における工業先進国では、既に1970年代のはじめからこのような事故を防止するため、耐爆、耐衝撃設計の研究に着手し、数次にわたる国際会議も開かれている。わが国におけるこの種の研究はかなり遅れがみられたが、最近次第に研究者の数も増えている。

ところで、鉄筋コンクリート構造物の耐爆、耐衝撃設計は、その対象から必然的に次の二つの特徴をもつことになると考えられる。その一つは、爆発、衝撃現象が高速に進行し、それによって構造物に応答が生まれることから起こる現象 (例えば速度効果等) に対応しなければならないこと、もう一つは、この応答が通常、静的な場合よりかなり大きくなるので設計は大歪を許容した塑性設計にならざるを得ないことである。

第二の特徴から、この設計においては、鉄筋コンクリート構造部材または構造物の、許容し得る最大変形 (最大塑性率) の測定が極めて重要であることがわかる。なぜならば、筆者等が多年にわたって行った実験によると、爆発の場合は、薬量の多い程、衝撃の場合は、衝撃速度の大きい程、鉄筋コンクリート部材の最大変形が小さくなることが認められたからである。このことは、鉄筋コンクリート構造物の破壊限界に対する速度効果が最も望ましくない形で現れることを意味し、耐爆、耐衝撃設計にとって極めて重要である。

従って、今回 最大変形の測定に重点を置いた実験を行ったが、やはり同様の傾向が認められた。現在、このような結果が生ずる理由について研究しているが、その概要をここに報告する。

2. 爆発実験

今回行った鉄筋コンクリート円筒体爆発実験 (昭和60年秋実施) は、前述の爆発応答の詳細及び靱性について研究することを主な目的とした。現象を単純化するため、第2次応答 (全体的な弾塑性応答) が優越して発生するように試験体形状を選び、軸対称円筒体とした。このような試験体では内部爆発による外面剥離が発生し難いからである。また、爆発の際の上下端部鋼板による衝撃波の反射波が試験体中央部胴体の主要な応答に影響を与えないよう試験体寸法を決めた。

この実験の概要は昭和61年度日本建築学会大会^[1]及び昭和61年度日本建築学会九州支部研究報告会で報告^[2]しているが、必要な範囲でここに概要を説明する。試験体は図1に示すように内径60cm、壁厚10cm、高さ1mの鉄筋コンクリート円筒体で、上下は鋼板 (R-16mm、上板には爆薬セット用開口がある) である。コンクリートの配合は、1 : 3.6 : 4.1 (セメント : 砂 : 砂利) で水セメント比69%で、標準養生を行った同じコンクリートの材令28日における静的圧縮強度の平均は 305.5 kgf/cm² である。試験体中央には、リング状の変形測定用鉄筋 (3-D10, S D35, リングの直径は 67.5cm) を挿入し、その外側に縦筋 (13φ, S R24) 16本を配し、更にその外側をスパイラル筋 (6φ-5cm ①, S R24) で補強した。

材令42日～55日まで室内養生を行った試験体を、掘削した穴に鉛直に設置し、その中心に爆薬を挿入した後、上面及び側面を土で拘束し爆発した。爆薬は、TNT及び無煙火薬である。薬量及び使用材料の性質等は表1に示した。表中B型試験体は、鉄筋コンクリート造そのままであるが、A型試験体は、内部に埋めこらし型枠として鋼板(厚0.8mm)の内筒を入れたものである。これは爆発時発生する電磁波を遮断し、測定用鉄筋に貼付したW. S. G. (ゲージ長さ0.2mm, 上下のリブに等間隔に6ヶ所, 計12枚貼り付けた)による測定を可能にするためである。

圧力の測定は開口蓋の中心に圧力計(PCB-109D, 容量5,600kgf/cm², 固有振動数500KHz, ライズタイム1μs)を取り付けて行った。鉄筋の歪は、周波数帯域100KHzの装置で増幅し、サンプリングタイム5μsのデジタルメモリーで記録した。爆薬の起爆は8号電気雷管でディレー装置を組込んだ起爆回路で行ったがこの回路中にトリガー装置を組入れた。

3. 測定記録の検討

図2及び3は内部に鋼板製内筒をもつ試験体(A-3)のTNT-0.91kgf(2lb)の場合の測定記録であるが、試験体は壁面上の一線で縦割れ破断を生じた。しかしこの位置は内部鋼板製円筒の継目になっており、この継目の不完全部分から高温の爆発生成ガス(約5,000℃)がジェット状に噴き出し破断を生じた。

しかしこの位置は内部鋼板製円筒の継目になっており、この継目の不完全部分から高温の爆発生成ガス(約5,000℃)がジェット状に噴き出し破断を生じた可能性が高い。このような予期しない破壊が生じたが、内筒によって爆ごう時の電磁波(図3の(b))は減衰し、明瞭な鉄筋の歪の記録(図3の(c))以降)が得られた。圧力計の性能は極めて高く、温度の影響も厚さ3mmのシリコングリスの封入によって防止されている。ただ、爆圧は通常用いられるSachs' Parameter^[3]による計算結果(表2)と甚だしく異なるが、これは爆源から圧力計までの距離(50cm)が爆薬球半径(この場合約6.3cm)の8倍に過ぎず、既にSachs' Parameterの使用範囲を越えているためと考えられる。

鉄筋歪の記録(図3)から、鉄筋は爆発後、直に(この記録では約50μsで)降伏し、試験体は一様な膨張を生ずることが、鉄筋周囲に貼り付けた12枚のW. S. G. の出力の検討から知られた。図3のW. S. G. (G1)は鉄筋の破断位置から約40cm離れているにも

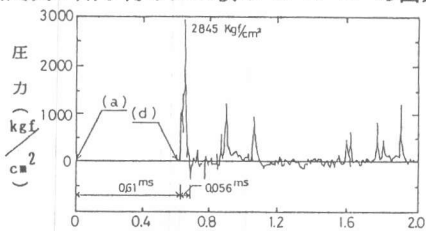


図2 圧力測定例 (A3)

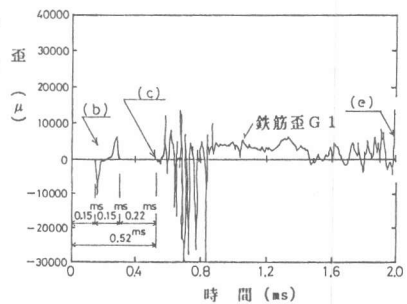


図3 歪測定記録例

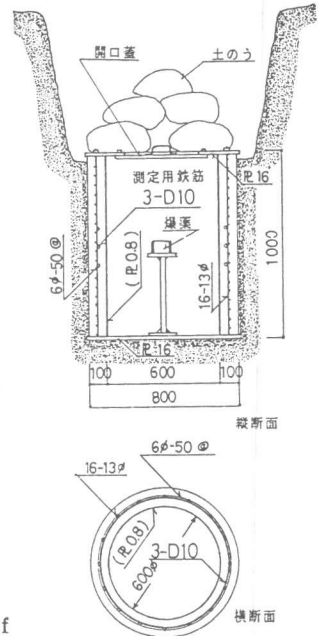


図1 試験体 (()はA型試験体の場合)

表1 実験一覧

試験体記号	試験体材料	爆薬	重量	破壊状態	コンクリート静的強度	鉄筋の強度
A-1	50日	TNT	0.91kgf (2 lb)	(A)	332.9kgf/cm ²	D 10: σ _{ty} =3900kgf/cm ² σ _{tu} =5500kgf/cm ² 伸び=28%
A-2	49日	TNT	0.91kgf (2 lb)	(A)	257.8kgf/cm ²	6 φ: σ _{ty} =3000kgf/cm ² σ _{tu} =4466.7kgf/cm ² 伸び=34%
A-3	48日	TNT	0.91kgf (2 lb)	(A)	131.5kgf/cm ²	13 φ: σ _{ty} =3250kgf/cm ² σ _{tu} =4700kgf/cm ² 伸び=31.5%
B-1	55日	TNT	0.91kgf (2 lb)	(A)	420.0kgf/cm ²	
B-2	53日	TNT	0.91kgf (2 lb)	(A)	408.1kgf/cm ²	
B-3	52日	無煙火薬	0.5kgf	(B)	287.5kgf/cm ²	
B-4	45日	TNT	0.45kgf (1 lb)	(B)	387.1kgf/cm ²	
B-5	42日	TNT	0.68kgf (1.5 lb)	(B)	105.1kgf/cm ²	

註) 1) 試験体の破壊状態は次のように分類
(イ): 縦筋(13φ)に沿ってコンクリートは破壊し変形測定用鉄筋(D10)も1または2ヶ所において破断
(ロ): 縦筋に沿ってコンクリートは破壊したが、変形測定用鉄筋は破断せず
(ハ): 試験体に数本の縦クラックのみ
2) コンクリート強度は気中養生で実験時強度を示す
3) A型試験体の内側に鋼板(厚0.8)を設け、変形測定用鉄筋(D10)にW. S. G. を貼付した

かかわらず、記録開始から 2ms (爆発後約1.85ms) で52,000 μ 以上の引張り歪まで急上昇しており、試験体の半径が概ね1.8cm 以上拡大したことを示している。鉄筋周面の全ゲージについて調査すると、鉄筋歪が急上昇する時点は1.485ms ~ 3.335msの間にあるが、この時点とそれぞれのゲージの位置(鉄筋破断位置からの距離)との間には、特に関係は認められない。しかし鉄筋破断後、鉄筋歪が増大するとは考えられないから、鉄筋破断(試験体の破壊)の時点は 3.335ms以降の時点と考えられる。

4. 変形及び破壊の状況

このような爆発実験では構造物の破壊は一瞬にして完了し、高速ビデオ等でクラック進展状況を見ることはできない。従って、測定記録及び実験後の破壊状況、鉄筋の残留歪等から試験体の破壊の進展を推定せざるを得ない。今回の実験では試験体の中心に設置された爆薬の爆発により円周方向に様な引張り応力が作用したと考えられる。この引張り応力による試験体の変形、破壊の進展を、種々の爆薬量の実験データを並列的に比較して検討を行った。

試験体の破壊状況(写真1・A-1, 写真2・B-1)を表1に示したように、(イ)、(ロ)、(ハ)の三種に分けた。

(ハ)は内外壁面に数本の幅 0.2~ 0.4mmの縦クラック及び、内壁面中央部に水平クラックが見られるもの、(ロ)は縦筋位置に幅数ミリから数センチの内外面を貫く縦クラック及び中央付近に数多くの水平クラックが見られるもの、測定用鉄筋は1本も破断していないもの、(イ)は(ロ)よりも更に破壊が進み、3本の測定用鉄筋が何れも1~2ヶ所で破断し、試験体壁面も多くの縦割れ及び数本の横割れによって破断したものである。(ハ)は無煙火薬0.5kgfの場合、(ロ)はTNT 0.45kgf(1 lb)及び0.68kgf(1.5 lb)の場合、(イ)はTNT 0.91kgf(2 lb)の場合である。(ハ)の内外壁面のクラック分布(B-3の場合)を図4に、(イ)の内筒付試験体(A-1の場合)の内外壁面のクラック分布を図5に例示した。また、内筒を持たない試験体(B-2の場合)の破片の内外壁面のクラック分布を図6に示した。

これらの図を比較検討した結果、次のような破壊の進展状況が知られた。引張り応力の増加とともに、はじめ、かなり広い間隔で縦クラック(その多くは縦筋位置)が発生し、そのクラック位置近傍で内部鉄筋の歪が増加する。更に大きな応力に達すると、はじめに発生した縦クラックの中間にいくつかの縦クラックが発生し、内部鉄筋の歪の大きな位置の数も増加する(図7)。鉄筋の応力が更に増大して破断応力に近付くとき、既に発生しているクラックのうち1~2の縦クラックの

表2 爆圧等の予測 (Sachs' Parameterによる)

TNT重量	0.45kgf (1 lb)	0.68kgf (1.5 lb)	0.91kgf (2 lb)
ガラに反射圧 ッメよ ク1る スタ パ1	541kgf/cm ²	661kgf/cm ²	789kgf/cm ²
断続 時間 Tr	7.52ms	7.64ms	7.71ms
実 験 値 (平 均)	710kgf/cm ²		2640kgf/cm ²

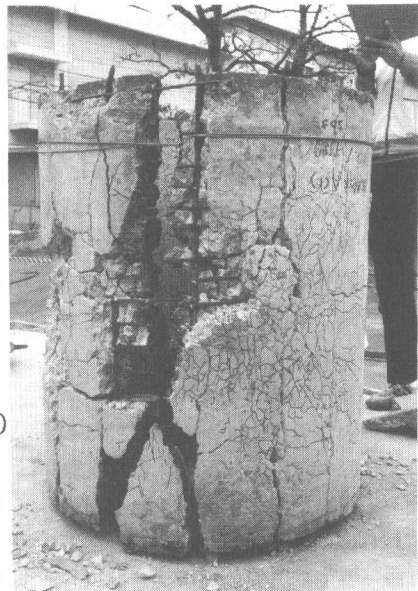


写真1 鉄筋コンクリート円筒体爆発実験における破壊の例(A-1)

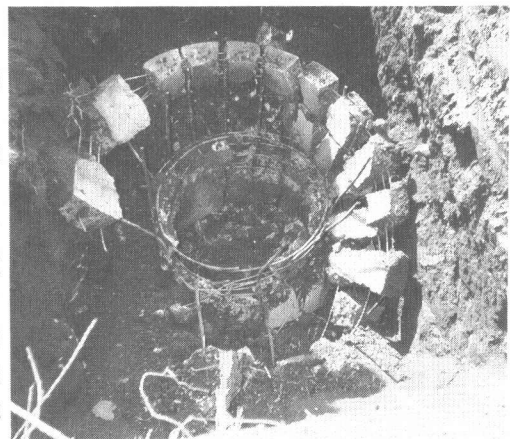


写真2 鉄筋コンクリート円筒体爆発実験における破壊の例(B-1)

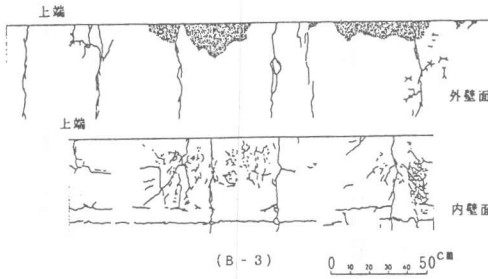


図4 爆発実験によって試験体内外面に発生したクラックの比較

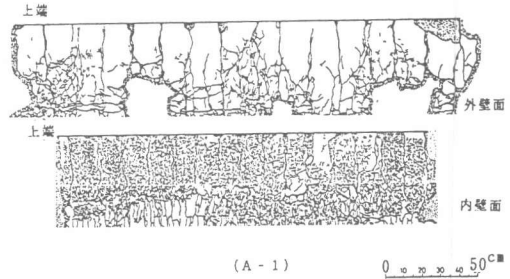


図5 爆発実験によって試験体内外面に発生したクラックの比較

位置で鉄筋歪が急増し鉄筋は破断する。

実験中、試験体の縦クラックの巾が拡大し、それが内面から外面まで貫通すれば爆薬の爆発生成ガスは、そこから流出し、爆圧は急速に低下する。このようなクラックの側面には生成ガス中の炭素が沈着し、黒く着色され、一見して判別することができる。図4のB-3に見られるクラックの巾は0.4mm以下であるが、概ね壁面を貫通している。しかし、生成ガスがこのクラックを通過した痕跡は認められない。図4, 5, 6, 中の細線で画いた微細クラックは、四塩化炭素を使ってはじめて見ることができるもので、内外壁面両方でみられるが何れも浅く、極く短時間滞留していた高温生成ガスによって発生したと考えられ、内外壁面のクラック間に全く関連はない。直接目視できるクラックの中、最も細いものは巾0.2mm程度であるが、深さは概ね0.8mm以下であった。また試験体高さの中央部に円周方向の水平クラックが入っているが、これらは、壁面が外方に傾くとき発生した曲げクラックであり内側部分にだけ黒く着色した部分が見られた。

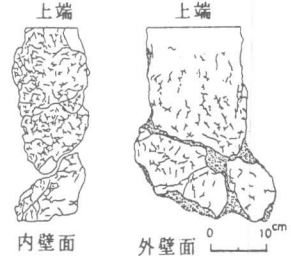


図6 試験体破片の内外面クラックの比較(B-2の例)

破断した鉄筋の破断部近傍における歪分布の例を図8に示した。図から知られるように、破断部の局部歪は20%以上の伸びを示しているが、それに関する範囲は数ふしの間に限られており、その他の部分の歪はかなり小さい。歪測定用鉄筋の全長について測った平均残留歪を図9にかかげたが、図中の爆薬重量0.68kgf以下の実験では鉄筋は破断せず、歪は破断歪以前の歪に留まっている。しかし、それらの間では、爆薬量の大きいほど、当然ながら残留歪も大きい。爆薬重量0.91kgfの実験では全ての鉄筋が破断したにもかかわらず、残留歪は8.3%以下に留まっている。鉄筋自身の最大伸びが高速載荷実験の場合を含め18%以上である^[4]

から、その46%以下に過ぎないこの実験値は、爆発を受ける鉄筋コンクリート構造物の最大変形量が著しく低下することを示している。

この現象の原因と考えられるのは次の二つであ

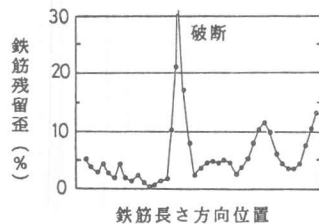


図8 鉄筋破断部近傍の歪分布(B-2,中段)

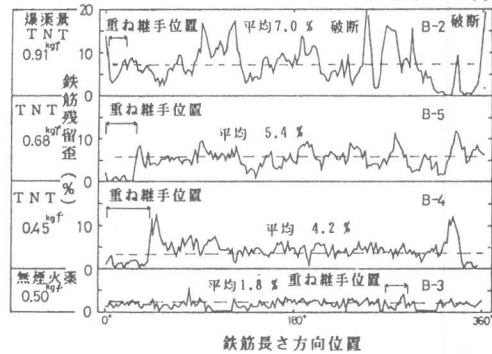


図7 測定用鉄筋の残留歪分布の比較

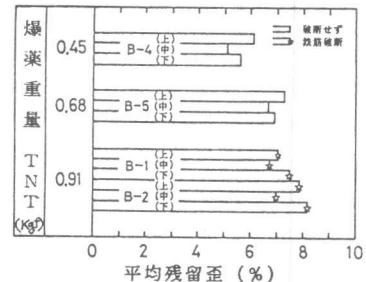


図9 歪測定用鉄筋の平均残留歪

る。その一つは、既に報告^[5]したように鉄筋とコンクリート間のボンド応力に対する速度効果であり、もう一つは、爆発のような極めて高速な変形における鉄筋自身の延性低下である。しかしこの実験では後者が大きな影響をもつ程変形速度は大きくない(G. I. Tayler; Scientific Papers, P. 541)。

5. 大歪場におけるボンド応力の発生機構

筆者の一人が以前行った高速ボンド実験(既報)^[6]は、コンクリート角柱(10cm×10cm×10cm~40cm)の中心軸位置に鉄筋(D10-S D35または9φ-S R24)を所定の長さ(5, 7.5, 10, 12.5, 40cm)だけ埋めこみ、種々の速さ(0.8×10⁻³cm/s~100cm/s)で鉄筋を引き抜き、鉄筋の各所に貼り付けたW.S.G.によって歪分布を測定したものである。この実験では、次のような極めて特徴的な傾向が認められた。一つは図10のように鉄筋の歪が分布するのはせいぜい20cm以内であること、また引抜力Pが増加するに従い歪が増大するものの、次第に先端部分の歪の増大傾向は鈍化し、終に測定不能になること、更に埋め込み長さ7.5cm以下では鉄筋は引き抜けるが、10cm以上では破断し、その破断位置は何れもコンクリートの端面から5~7mm内側であったことなどである。

コンクリート中に埋め込まれた異形鉄筋が引張り応力を受けるとき、ふしの位置を起点とするクラックが被覆コンクリート中に生ずることは以前から認められており、異形鉄筋のボンド応力は最終的にはふし間のコンクリートのせん断抵抗によって生ずると考えられる。このことと上記の実験結果から、大歪を対象とするボンド応力発生機構を次のように説明することができる。図11に示したように、鉄筋に作用する引張力はふし間コンクリートとその外側の被覆コンクリートの抵抗力によって発生し、ふし(n-1)をはさんで鉄筋応力は $\sigma_{s, n-1}$ から $\sigma_{s, n}$ ($=\sigma_{s, n-1} + \Delta\sigma_{s, n-1}$)に増大する。この増分 $\Delta\sigma_{s, n-1}$ はふし間コンクリートに対する鉄筋ふしのめり込みと(ふし間コンクリートの外側の)被覆

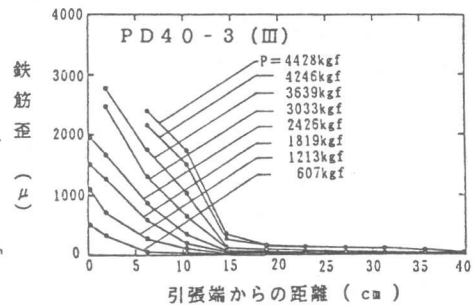


図10 高速ボンド実験の鉄筋埋込長さ40cm試験体の鉄筋歪の分布、引抜力(P)による変化を示す

コンクリートの曲げ変形(これらの和がふし(n-1)における鉄筋のすべり S_{n-1} になる)によって発生する抵抗力である。従ってこれらコンクリート(ひとつしあたり)のコンプライアンス(変形の逆数)を γ_c とすると $S_{n-1} = \gamma_c \cdot (\sigma_{s, n} - \sigma_{s, n-1})$ (1) 一方、すべり S_{n-1} は 応力を分担している部分の鉄筋の伸びの合計である。

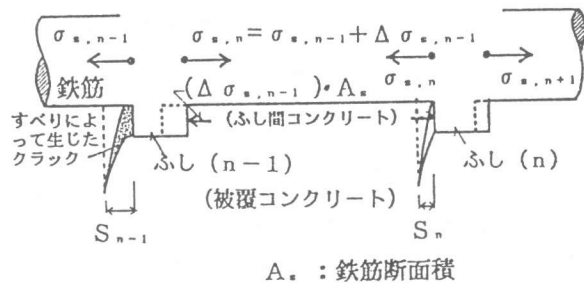


図11 大歪場におけるボンド応力発生機構

隣り合うひとつし間の鉄筋のコンプライアンスを γ_s 。(鉄筋降伏以前を考えて)とすると

$$S_{n-1} = \gamma_s \cdot \left(\sum_{i=1}^{n-1} \sigma_{s, i} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_{s, n} = \gamma_s / \gamma_c \cdot \left(\sum_{i=1}^{n-1} \sigma_{s, i} \right) + \sigma_{s, n-1} \quad (3)$$

が得られる。ただしこれは

$$\gamma_s \cdot \left(\sum_{i=1}^{n-1} \sigma_{s, i} \right) \geq \gamma_c \cdot (\sigma_{s, n-1} - \sigma_{s, n-2}) \quad (4)$$

の場合である。もしそうでなければ、ふし(n)に作用するコンクリート部分の抵抗力は逆向き(図11で右向き)になる。従って

$$\gamma_s \cdot \left(\sum_{i=1}^{n-1} \sigma_{s, i} \right) < \gamma_c \cdot (\sigma_{s, n-1} - \sigma_{s, n-2}) \quad (5)$$

のとき

$$\sigma_n = \sigma_{e, n-1} - \gamma_e / \gamma_c \cdot \left(\sum_{i=1}^{n-1} \sigma_{e, i} \right) \quad (6)$$

となる。 γ_e はD10について計算すると 0.303×10^{-6} (cm / kgf/cm²) となる。コンクリート部分のコンプライアンスは、埋め込み長さ5cmの実験(引抜け破壊が生じた)における鉄筋の平均応力とすべりの関係から、ひとつのふし間の距離について計算したコンプライアンスの値(図12)を使うこととした。この計算によると、図13のように実験結果の特徴をよく表現するボンド応力分布を得ることができる。このことから、上述のボンド応力発生機構の仮定が概ね妥当であると考えられる。更に、この計算によっても、鉄筋に作用する引張応力の増加速度が大きい程、ボンド応力の分布域が狭くなり、また、ボンド応力の上昇が急激になることが認められる。従って爆発、衝撃を受ける鉄筋コンクリート構造物の靱性低下のひとつの原因として鉄筋に働くボンド応力のこのような傾向をあげることができる。

6. 結論

- (1) 鉄筋コンクリート円筒体爆発実験では、試験体の応力方向に直角に間隔をおいて入ったクラックが応力の増加とともに数を増し、それと同時にクラック位置近傍の鉄筋歪も増加する。最終段階で鉄筋歪の大きいいくつかの位置で破断する。
- (2) 破断した鉄筋の残留歪は局部的には20%以上に達するが、全長について測った平均歪は8.3%以下であり、爆発をうける鉄筋コンクリート構造物の最大変形量が著しく低下することがこの実験から確認された。
- (3) 異形鉄筋に対する大歪を対象とするボンド応力発生機構を仮定し、それによってボンド応力分布を計算したが、その結果は以前行ったボンド応力高速実験の結果とよく一致した。
- (4) 前項の計算においても高速載荷のもとではボンド応力が鉄筋長さの狭い範囲で急増することが認められたが、このことが爆発実験で見られた鉄筋コンクリート構造物の最大変形量の減少のひとつの理由であると考えられる。

(謝辞) この実験は防衛庁技術研究本部、第4研究所の協力により、大分県日出生台において行ったものである。また試験体制作にあたっては富士ピー・エス・コンクリート(株)の協力を得た。ここに謝意を表します。

[参考文献]

- [1] 竹田, 高本, 谷川; 日本建築学会大会学術講演梗概集, P1071 ~ P1072, 昭和61年 8月
- [2] 竹田, 高本, 谷川; 日本建築学会中国・九州支部研究報告, P305 ~ 308 昭和62年 3月
- [3] Engineering Design Hand-book, Explosions in Air, Part One, USA M. C., P. 4~16.
- [4] J. Takeda et al; BAM Symposium, Berlin (West) 1982-6, S-2, P. 83 ~ 91
- [5] J. Takeda; Proc. of MRS-Sympo. on Strain Rate Effects of Cement-Based Composites, Boston, 1985, Vol. 64, P. 15 ~ 2
- [6] 竹田, 藤本, 河村; 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, P. 557~560, 1984

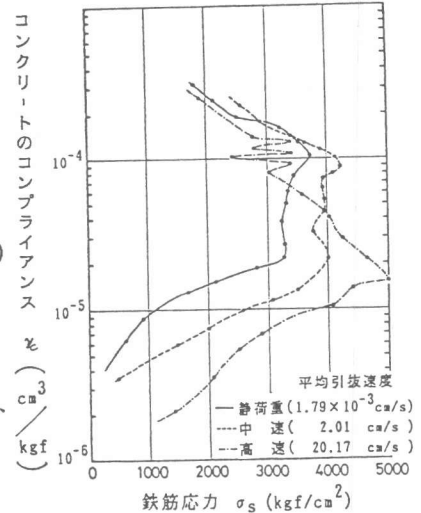


図12 高速ボンド実験^[6]における鉄筋埋込長さ5cmの結果から求めたコンクリートのコンプライアンス(ひとふし当り)と埋込鉄筋の平均引張応力の関係

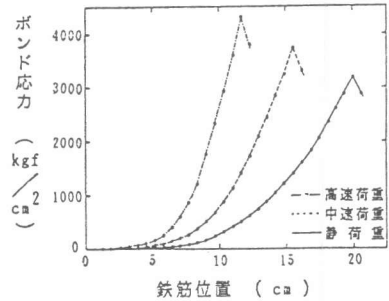


図13 計算によるボンド応力分布