

高速载荷を受ける鉄筋コンクリート床版の動力学特性と終局限界性能

DYNAMIC PROPERTIES AND ULTIMATE CAPACITIES OF REINFORCED CONCRETE SLABS
SUBJECTED TO HIGH-SPEED LOADING辻本雅洋^{*}・高橋芳彦^{**}・大野友則^{***}・内田 孝^{****}By Masahiro TSUJIMOTO, Yoshihiko TAKAHASHI, Tomonori OHNO
and Takashi UCHIDA

In this study, a simplified method of quantitative estimation for ultimate capacities of reinforced concrete slabs subjected to high-speed loading is presented. Square RC slabs supported simply were tested under high-speed loading and static loading to evaluate the effects of loading speed, reinforcement index and effective depth of slabs on the elasto-plastic behaviors and ultimate capacities. A method of numerical calculation for estimating the ultimate capacities of square RC slabs is practically developed by considering the strain-rate effects on stress-strain relationships of materials.

1. はじめに

土木構造物の多くは、地震荷重をはじめ、用途によっては土石流や落石、自動車や船舶の衝突さらには爆発事故による爆風圧や破片の衝突など偶発的な動的外力を受ける場合がある。構造物が動的荷重を受ける場合、部材に生じるひずみ速度は地震時において $10^{-3} \sim 10^{-1}$ /sec、飛来物の衝突や爆風圧などの衝撃荷重の作用に際しては $10^0 \sim 10^3$ /sec程度になることが明らかにされている¹⁾。衝撃荷重のように载荷速度が大きい動的荷重を受ける鉄筋コンクリート（以下、RCと略記する）構造物やその部材の応答および終局限界性能などに関してこれまで国内外において多くの研究が行われており、欧米諸国ではこれらの研究成果を生かして原子炉建屋に対する耐衝撃設計が義務づけられている²⁾。わが国では落石防護施設や砂防施設などにおいて衝撃荷重を考慮した設計の必要性があるが、研究の段階であり耐衝撃設計法はまだ確立されていない。構造物が衝突のような動的荷重を受ける場合、構造物やその部材では载荷直後に载荷位置近傍に生じる応力波による応答と、それにやや遅れて生じ比較的長時間継続する弾塑性応答の2種類が混在した挙動を示す³⁾。また、物体と構造物との衝突現象においては、衝突物と被衝突物の質量・剛性・形状などの相互関係によってさらに複雑な挙動を示す。したがって、衝撃载荷を受ける部材の動的特性や終局限界性能を解明するため

-
- * 防衛大学校理工学研究科学生 (〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20)
 ** 防衛大学校研究員 土木工学教室 (〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20)
 *** 工博 防衛大学校講師 土木工学教室 (〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20)
 **** 工博 防衛大学校教授 土木工学教室 (〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

には、衝撃挙動に影響を及ぼす種々の要因を明確に分離した状態で調べる必要があると考える。

ところで、複雑な衝撃応答は解析によってある程度明らかにすることができるが、終局状態に至るまでの構造物や部材の挙動を検討するには実験によらなければ明らかにできないことが多い。構造材料や構造部材の衝撃実験は衝突実験、爆発実験および高速載荷実験の3種類に大別できる⁴⁾。衝突実験および爆発実験は実際の衝撃現象をシミュレートできるので、衝撃応答を検討する実験として有効である。しかしながら、衝撃応答に特有な種々の要因を含むため、部材の破壊に影響を及ぼす主要因とその影響を把握することは困難である。一方、高速載荷実験は、衝突体とみなした装置の載荷体を試験体に接触させた状態から、急激に高速で試験体を変形させるものである。この実験では、衝突直後に生じる応力波による応答を取り除いて高速変形時の弾塑性挙動を調べることができる。したがって、部材のもつ終局限界性能を基本的に把握することが可能となる。著者らはこのような観点から、RC各部材を対象とした一連の高速載荷実験を実施している(4)~(8)。

本論文では、RC構造の基本的部材の一つであるRC床版の高速載荷実験結果を報告する。すなわち、RC床版の鉄筋係数および有効高さ(あるいは、せん断スパン比 a/d =せん断スパン a /有効高さ d ; a は一定)をパラメータとして破壊に至るまでの高速載荷実験を行い、高速載荷を受けるRC床版の終局破壊状況、弾塑性挙動および終局限界性能(終局荷重、終局変形量、エネルギー吸収容量)などについて調べるとともに、静的載荷を受ける場合との比較・検討を行ったものである。また、動的載荷に対する終局限界性能を定量的に評価するために、ひずみ速度を考慮した簡便な解析法を提案している。

2. 実験概要

(1) 試験体

試験体は、図-1に示すように、鉄筋を下側のみに等方直交に配置した正方形単鉄筋コンクリート版である。試験体の大きさは、載荷装置の制約のため120cm×120cmとした。実験に用いたパラメータを表-1に示す。実験は、引張鉄筋の強度や量および有効高さ(あるいはせん断スパン比)が弾塑性挙動に及ぼす影響を調べる目的から2種類のシリーズとした。すなわち、有効高さが一定(10.0cm)で鉄筋係数 q ($=p_t \cdot f_y / f_c'$, p_t : 引張鉄筋比, f_y : 引張鉄筋降伏点, f_c' : コンクリート圧縮強度)だけを3種類に変化させ

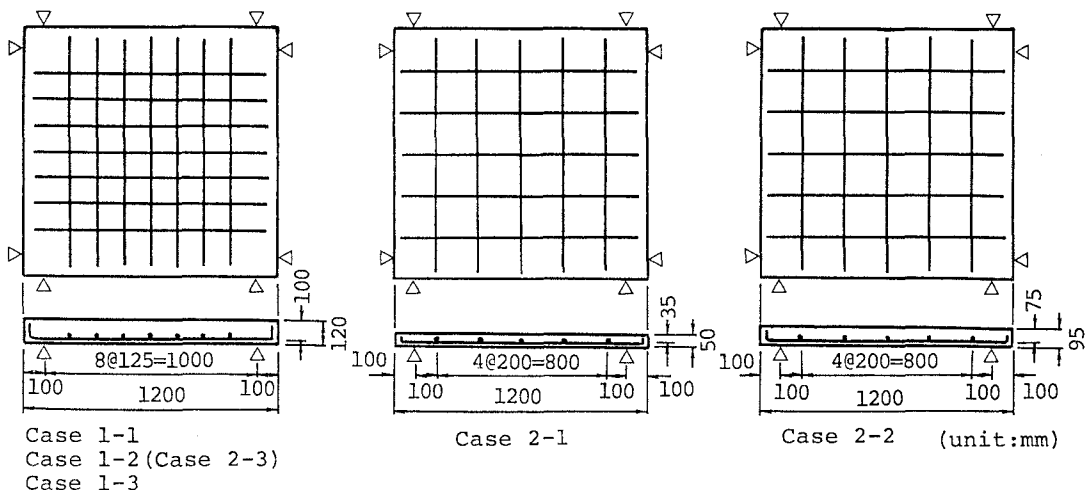


図-1 試験体の形状・寸法

たシリーズ [Case 1 ($q=0.02, 0.06, 0.10$)] および鉄筋係数を一定 (0.06) とし、有効高さ (あるいは a/d) を 3 種類に変化させたシリーズ [Case 2 ($d=3.5, 7.5, 10.0\text{cm}$; $a/d=12.14, 5.67, 4.25$)] である。実験に用いた試験体は、総数 23 体である。使用したコンクリートの示方配合を表-2に示す。粗骨材の最大寸法は、試験体の最小板厚を考慮して 10mm とした。コンクリートの圧縮強度は平均 325kgf/cm^2 であった。鉄筋の引張試験結果は表-3のとおりである。

(2) 載荷および計測方法

図-2に示す高速変形負荷装置を用い、装置の載荷体を試験体中央に接触させた状態からアクチュエータを急激に変位させることにより載荷した。高速変形負荷装置は、油圧ポンプで一定圧力に保たれた主アクチュエータの荷重 (最大荷重 50tonf) を 2 基のバランス・アクチュエータで保持し、次にバランス・アクチュエータに内蔵された制御バルブを機械的に一定速度で下方向に作動させて所定速度で試験体を変形させるものである。載荷体の載荷速度 (試験体の変形速度) は、フライ・ホイールの回転数を制御することにより $0\sim 4\text{m/sec}$ の範囲で任意

に設定できる。また載荷体の変位量は、 $0\sim 150\text{mm}$ の範囲で任意に設定可能である。使用した載荷体の大きさは、 $15\text{cm}\times 15\text{cm}$ の正方形鋼板 (板厚 5cm) である。試験体の支持条件は、 $100\text{cm}\times 100\text{cm}$ の四辺単純支持とした。なお、比較のために行った静的載荷実験も同一の載荷装置を使用した。

計測は、載荷荷重、試験体各部の変位、載荷体の加速度、鉄筋およびコンクリートのひずみについて行った。計測システムを、図-3に示す。載荷荷重は、主アクチュエータと載荷体の間に取り付けたロードセルにより測定した。載荷面の変位は、載荷体の変位を差動トランス型変位計 (増幅器の最大応答周波数 1kHz) により計測した。その他の変位は、試験体上面の変位を

表 - 1 試験体のパラメータ

試験体の種類	板厚 (cm)	有効高さ (cm)	せん断スパン比	鉄筋の種類	鉄筋間隔 (cm)	鉄筋係数
Case 1-1	12.0	10.0	4.25	$\phi 6$ (SR24)	12.5	0.02
Case 1-2 (Case 2-3)	12.0	10.0	4.25	D10 (SD35)	12.5	0.06
Case 1-3	12.0	10.0	4.25	D13 (SD30)	12.5	0.10
Case 2-1	5.0	3.5	12.14	D6 (SD40)	20.0	0.06
Case 2-2	9.5	7.5	5.67	D10 (SD35)	20.0	0.06

表 - 2 コンクリートの示方配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kgf/m^3)			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
10	8	4	45.0	43.9	153	340	801	1041

表 - 3 鉄筋の引張試験結果

鉄筋の種類	降伏点 (kgf/cm^2)	引張強度 (kgf/cm^2)
$\phi 6$ (SR24)	2803	3887
D6 (SD40)	4344	6236
D10 (SD35)	3742	5361
D13 (SD30)	3487	5551

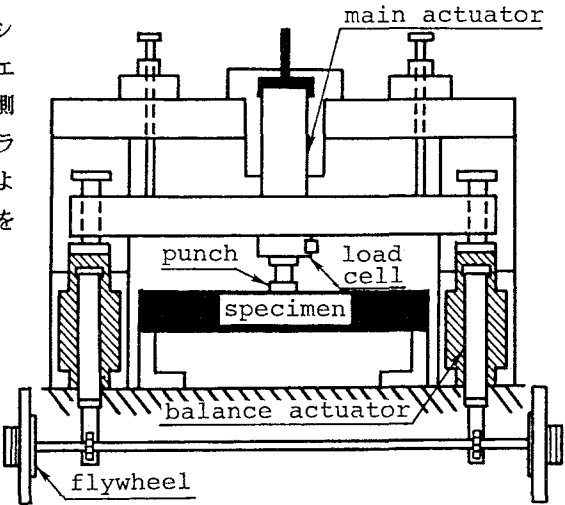


図 - 2 高速載荷装置

渦電流式非接触変位計（増幅器の最大応答周波数50kHz）を用いて測定した。加速度は、載荷体の慣性力を調べるために測定した。測定に用いたひずみゲージのゲージ長は、鉄筋の場合3mm、コンクリートについては粗骨材の最大寸法などを考慮して30mmとした。

3. 実験結果および考察

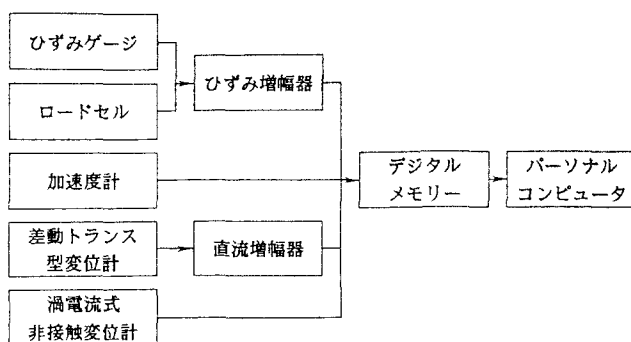


図-3 計測システム

(1) 終局破壊状況および変形挙動

図-4に、静的および高速載荷実験終了時の破壊状況の一例を示す。断面の破壊を示した図は、実際の状況を模式化して表している。なお、以後の説明では面上に生じた大きなひびわれを降伏線と称している。以下、それぞれのパラメータについて試験体別に考察する。

a) 鉄筋係数 q の影響

① Case 1-1 ($q=0.02$)

静的載荷の場合、それぞれの辺の中央に十字型のひびわれ破壊（以下、十字降伏線と呼ぶ）だけが生じている。これに対し、高速載荷の場合は静的載荷時の十字降伏線のほかに、各隅点近傍から載荷体の中心部を結ぶ斜めの降伏線（以下、斜め降伏線と呼ぶ）および載荷体の外縁部に沿った降伏線（以下、外縁部降伏線と呼ぶ）が生じている。静的載荷の場合は十字降伏線に変形が集中して曲げ変形した後、載荷面直下の鉄筋が破断することによって終局状態に至っている。一方、高速載荷の場合の外縁部降伏線および斜め降伏線は、試験体の慣性力に起因して生じたものと考えられる。すなわち、載荷面の外側は載荷直後の慣性力のため変位しにくく、あたかも剛性が大きくなったような状態となるため主として載荷部付近に外縁部降伏線が生じたものと考えられる。また、斜め降伏線は外縁部降伏線の発生にともなって生じたものと考えられる。したがって、静的載荷の場合は中央部のみが曲げ破壊し、そのほかの部分は剛体的挙動を示している。これに対し、高速載荷の場合は外縁部降伏線の内側に曲げ変形が局部的に集中するような挙動を示している。

② Case 1-2 (= Case 2-3: $d=10\text{cm}$ ($a/d=4.25$), $q=0.06$)

試験体上面の降伏線を調べると、静的載荷時は外縁部降伏線のみが生じ、高速載荷時は外縁部降伏線のほかに放射状に広がる降伏線（以下、放射状降伏線と呼ぶ）が生じている。ところが、試験体下面は静的載荷時と高速載荷時に大きな相違は認められない。試験体上面の破壊状況の相違は、コンクリートと鉄筋との付着による一体性に起因するものと考えられる。すなわち、高速載荷の場合は変形挙動が極めて短時間であり鉄筋とコンクリートとの付着が保たれるので、ひびわれ破壊の影響が試験体上面にも広がる結果となる。このために、上面にも放射状降伏線が生じたものと考えられる。この試験体では、試験体上面のひびわれ状況に若干の相違がみられるが、静的および高速載荷のいずれに対しても放射状降伏線に沿って曲げ変形が進行し、最終的には外縁部降伏線が生じることにより載荷体部分のコンクリートが押し抜けて終局状態に至ったものと考えられる。

③ Case 1-3 ($q=0.10$)

静的載荷の場合、試験体上面の破壊は載荷体による外縁部降伏線が生じているだけで、ほかの降伏線は生じていない。また試験体下面も、押し抜きせん断によるコンクリートの欠落だけが生じ降伏線は認められなかった。これに対し、高速載荷の場合は、Case 1-2 ($q=0.06$) に類似した破壊状況を示している。すなわち、静的載荷の場合はコンクリートの押し抜きせん断により終局状態に至ったのに対し、高速載荷時は Case 1-2 と同じように曲げ変形した後載荷体部分が押し抜ける変形挙動を示したものと考えられる。

b) 有効高さ(せん断スパン比)の影響

① Case 2-1 ($d=3.5\text{cm}$:

$$a/d=12.14)$$

静的載荷および高速載荷のいずれに対しても、ほぼ同様の破壊状況を示している。試験体上面は、放射状降伏線と載荷部を中心とした円状降伏線(以下、円状降伏線と呼ぶ)が生じている。また、試験体下面のコンクリートの欠落は載荷部分だけに生じている。この試験体の場合、終局状態に至るまでの変形量が大きいために版の面内方向に引張力が作用してコンクリートが引張破壊したため円状降伏線が生じたものと考えられる。また、載荷体の押し抜きによる外縁部降伏線は載荷体から10cm程度離れた位置に生じている。有効高さが小さい試験体の変形挙動は、静的載荷および高速載荷のいずれに対しても大きく曲げ変形した後、載荷面の外側が押し抜けて終局状態に至るものと考えられる。

② Case 2-2 ($d=7.5\text{cm}$:

$$a/d=5.67)$$

静的載荷の場合、Case 2-3およびCase 1-3とほぼ同様の破壊状況を示している。高速載荷の場合には、試験体上面の放射状降伏線のほかにCase 2-1の場合と同様に円状降伏線が生じている。静的載荷の場合は有効高さが大きいCase 2-3と同じような変形挙動を示すのに対し、高速載荷の場合は有効高さが小さいCase 2-1に類似した破壊状況を示している。

c) まとめ

静的載荷を受ける場合には鉄筋係数が増大するにしたがって、曲げ→曲げ押し抜き→押し抜きせん断と変形挙動が推移する。これに対し、高速載荷の場合は、局部的な曲げ型から曲げ押し抜き型の2種類の変形挙動に区分される。有効高さ(せん断スパン比)をパラメータとした場合の変形挙動は、載荷速度の大きさによらず有効高さが増大するにともなって曲げ型から曲げ押し抜き型に移行することが認められた。しかしd

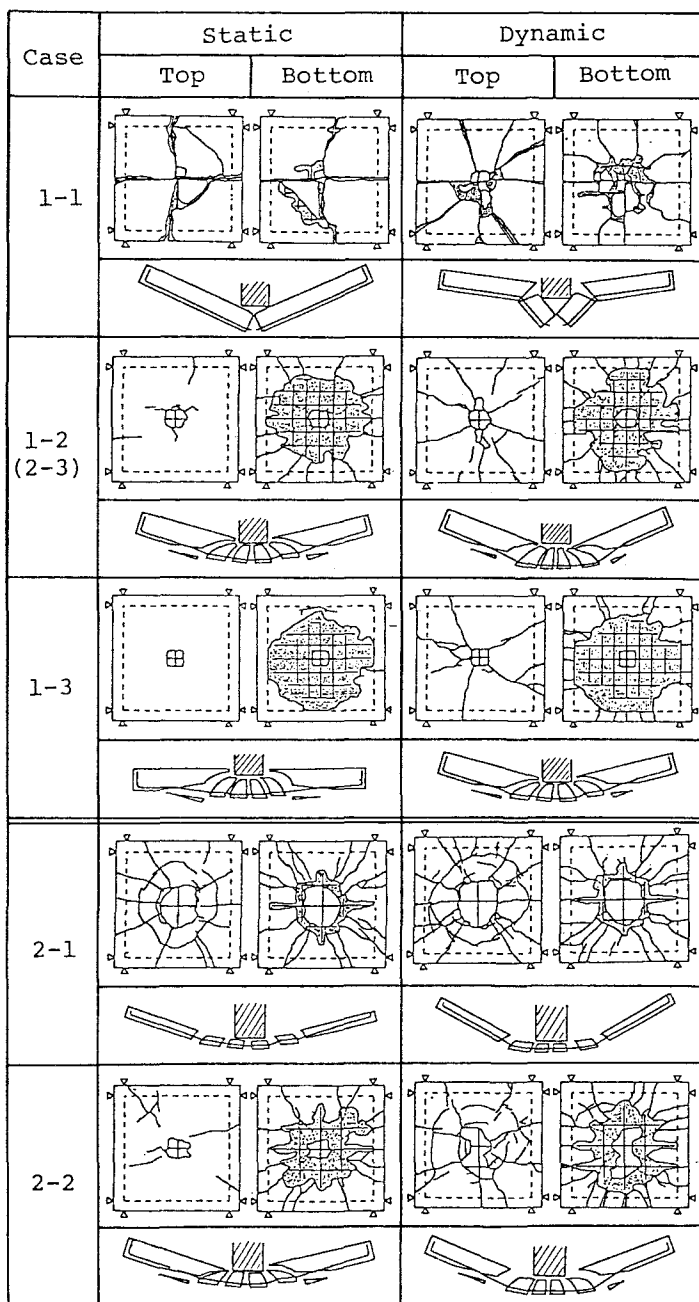


図 - 4 破壊状況

=7.5cm($a/d=5.67$)の場合には、高速載荷に対しては $d=3.5$ cm($a/d=12.14$)の試験体の変形状態に類似し、静的載荷に対しては $d=10.0$ cm($a/d=4.25$)の試験体の破壊状況に類似した傾向を示すことが認められた。高速載荷に対する破壊状況および変形挙動が静的載荷に対する場合と異なるのは、コンクリートや鉄筋に生ずるひずみ速度および試験体の慣性力の影響によるものと考えられる。

(2) 終局荷重

図-5(a)に終局荷重と鉄筋係数との関係を示し、図-5(b)に終局荷重と有効高さの関係を示す。図中の●印および○印はそれぞれ高速載荷および静的載荷に対する実験値を表している。図から、高速載荷に対する終局荷重はいずれの試験体においても、静的載荷時に比べ10～40%程度大きな値を示していることがわかる。高速載荷に対して終局荷重が増大するのは、ひずみ速度効果による鉄筋の降伏点やコンクリートの圧縮強度の増大および破壊状況が押し抜きせん断型から曲げ型に移行したことに起因するものと考えられる。とくに、鉄筋係数が大きいCase 1-3の場合の増大割合は、ほかの試験体に比べて大きく約40%の増加を示している。これは、静的載荷を受ける場合の破壊状況が押し抜きせん断型であったのに対し、高速載荷を受ける場合は曲げ押し抜き型に変化したためと考えられる。すなわち、高速載荷を受ける場合には、ひずみ速度効果によってせん断耐力の方が曲げ耐力を上回るために、曲げ耐力に達した時点で破壊に至ったものと考えられる。なお、RC部材の曲げ耐力およびせん断耐力に及ぼす載荷速度の影響についてはさらに検討する必要がある。

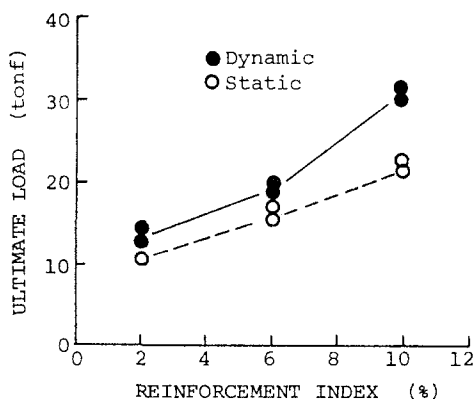


図-5(a) 終局荷重と鉄筋係数の関係

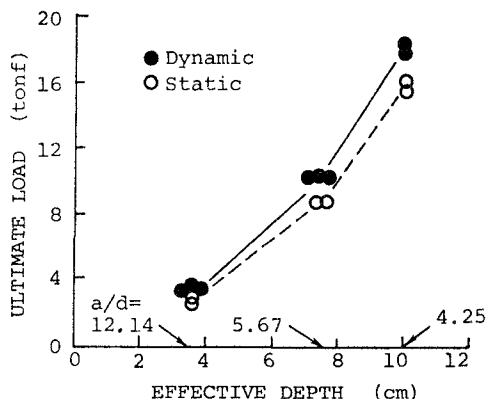


図-5(b) 終局荷重と有効高さの関係

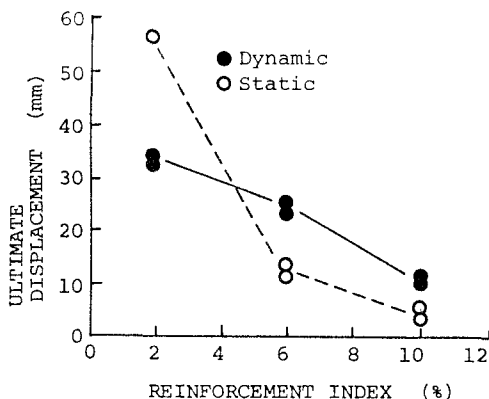


図-6(a) 終局変位量と鉄筋係数の関係

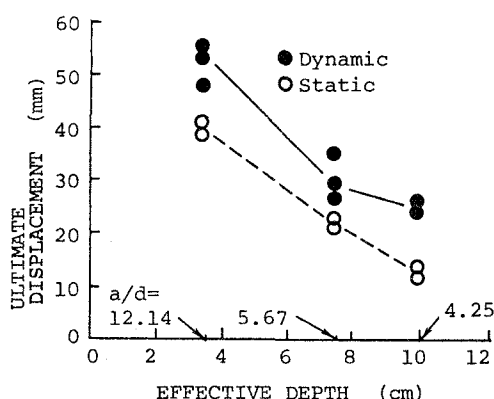


図-6(b) 終局変位量と有効高さの関係

(3) 終局変位置

図-6(a)および(b)に、それぞれ終局変位置と鉄筋係数および有効高さの関係を示す。図中の●印および○印はそれぞれ高速載荷および静的載荷に対して得られた実験値を表している。図から、鉄筋係数および有効高さが大きくなるにつれて、静的載荷および高速載荷に対する結果のいずれも終局変位置が減少する傾向が認められる。また、高速載荷と静的載荷に対する結果を比較すると、鉄筋係数が最も小さいCase 1-1を除き、いずれも高速載荷時の終局変位置の方が1.5~2倍程度大きな値を示している。これは、ひずみ速度効果によるコンクリートおよび鉄筋の終局ひずみなどの増大あるいは破壊形式の変化に起因するものと考えられる。一方、鉄筋係数が最小のCase 1-1の場合に、終局変位置が静的載荷に対するものより小さくなる。これは、高速載荷によって鉄筋が破断して終局状態に至ったことによる。つまり、十分な鉄筋量が配置されなければ、動的載荷に対しては終局変位置の増大を図ることができない。

(4) エネルギー吸収容量

図-7(a)および(b)に、それぞれエネルギー吸収容量と鉄筋係数および有効高さの関係を示す。図中、●印および○印はそれぞれ高速載荷および静的載荷に対する実験値を表している。エネルギー吸収容量は、RC床版の荷重～載荷点変位関係において、終局状態に至るまでの面積として算定した。図-7(a)から、静的載荷に対しては鉄筋係数が大きくなるにつれてエネルギー吸収容量は減少することがわかる。これは、鉄筋係数が増大すると終局荷重は増大するが、終局変位置の減少の程度の方が大きくなるためである。したがって、鉄筋係数を増大することにより終局荷重は増大するが、必ずしもエネルギー吸収容量を増加させることにはならない。これに対し、高速載荷を受ける場合は、Case 1-2 ($q=0.06$) が最大値を示す。鉄筋係数が最小のCase 1-1は、静的載荷に対するよりも小さなエネルギー吸収容量を示しているが、これは前述したように、破壊形式が異なったためと考えられる。図-7(b)をみると、有効高さが大きくなるにつれてエネルギー吸収容量が増大することがわかる。これは、有効高さの増大によって終局荷重の増加割合が、終局変位置の減少割合を上回ることによる。また、いずれの試験体も、高速載荷を受ける場合の方が静的載荷時よりも大きな値を示している。一般に、高速載荷を受ける場合は終局荷重と終局変位置がともに増大するので、静的載荷よりも大きなエネルギー吸収容量を有する。ところが、鉄筋係数がある値（例えば、最小鉄筋比）より小さいと、静的載荷時の変形挙動と高速載荷時の変形挙動が異なることがあり、高速載荷時のエネルギー吸収容量の方が逆に小さくなる場合がある。

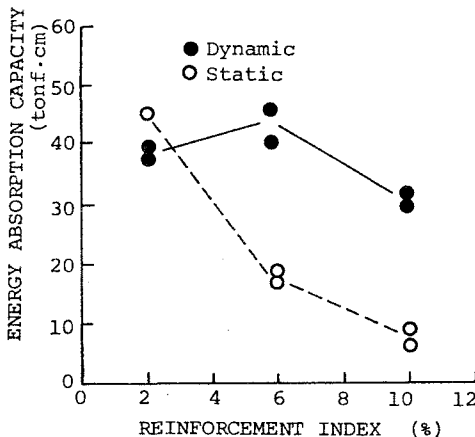


図-7(a) エネルギー吸収容量と鉄筋係数の関係

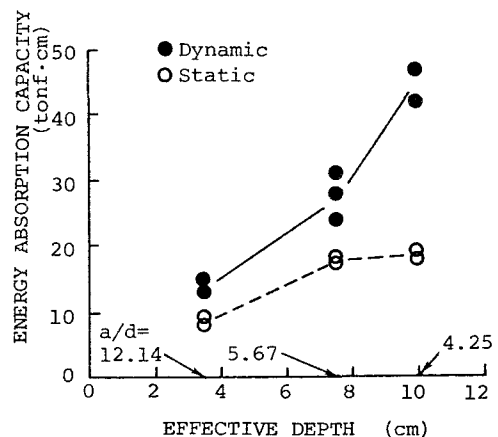


図-7(b) エネルギー吸収容量と有効高さの関係

4. ひずみ速度の影響を考慮した終局限界性能の算定法

静的な荷重を受けるRC床版の力学的挙動を解明するための解析は、平板弾性理論や終局強度理論をはじめ有限要素法や積層要素法などの手法を用いたものがある^{9), 10)}。動的な荷重を受ける場合は、部材がひずみ速度をもって変形するために静的載荷時の挙動とは異なることが明らかである。この観点から、衝撃荷重を受けるRC床版の弾塑性挙動を調べるため、藤井ら⁹⁾、内田ら¹¹⁾は有限要素法を用いた弾塑性衝撃応答解析を行っている。しかしながら、ひずみ速度の影響は考慮されておらず、またRC床版の終局限界性能を算定するまでには至っていない。一方、RC床版の曲げ終局荷重を求める実用解法の一つとして、降伏線理論がある。この方法に基づけば、弾性理論では解析が困難な特殊な形状や支持条件下にある床版の解析が可能であり、しかも十分合理的な静的曲げ耐力を与えることが知られている¹²⁾。本研究では、変形速度に依存するRC床版の終局限界性能を算定するため、降伏線理論および塑性解析における剛塑性理論にひずみ速度効果を考慮した簡易な算定方法を提示する。

実験の結果から、終局状態に至るまでのRC床版の挙動は、図-8に示すように①弾性域(OA)、②弾塑性域(AB)、③塑性域～破壊(BC)の3つに大きく区分できる。解析にあたっては、載荷開始から破壊に至るまで一つの手法で追跡できることが望ましいが、塑性域での大変形を対象とする場合にはひびわれや付着すべりなどの影響を取り入れることが極めて困難であり複雑となる。そこで本研究では、各段階ごとに異なる理論・手法を用いて荷重と変位の関係を求め、これらの結果を順次つなぎ合わせるにより破壊までの挙動を追跡するという方法を用いた。算定手順の概要を図-9に示す。破壊に至るまでの断面の曲げモーメント～曲率関係は、一般によく用いられている切断法¹²⁾を用いている。また、載荷点の変位 δ に対応する荷重は、 δ を逐次増加させる変位増分型の算定方法を用いた。すなわち、弾性域における荷重は平板弾性理論^{13)～15)}を用いて求めた。弾性から塑性に至る段階では塑性時の剛性は不明であり、かつ塑性時剛性は一般に小さい。そこで、本研究では塑性時の剛性を零とみなして弾性時剛性と塑性時剛性ととの平均値を平板弾性理論に適用することによって荷重を求めている。さらに、塑性域から破壊に至る段階では、降伏線理論と剛塑性理論との併用により算定した。変形速度に対応して生じるひずみ速度の効果は、実験によって得られた材料(鉄筋、コンクリート)の応力～ひずみ関係に基づいて定式化した。ひずみ速度の影響を受ける曲げモーメント～曲率関係は、これらの式を切断法に導入することによって求めることができる。曲げモーメントが求まれば、ひずみ速度効果を受ける荷重は平板弾性理論および剛塑性理論によって得られる。

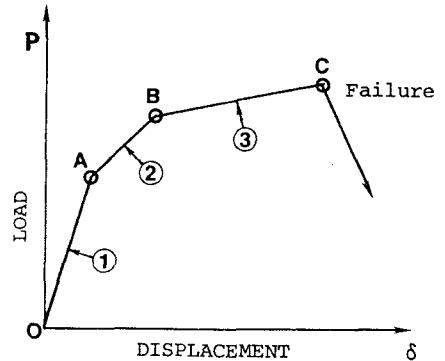


図-8 荷重～変位関係の模式図

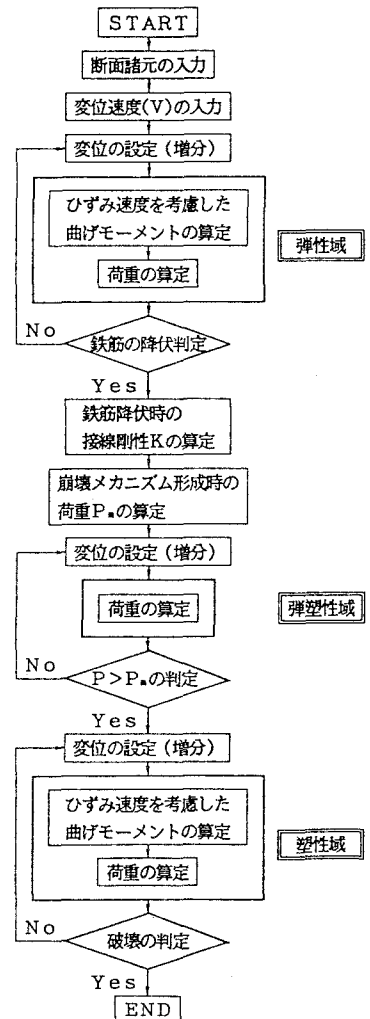


図-9 モーメントの算定手順

本論文では、終局限界性能の大きさを評価する目的から、高速载荷を受けるRC床版の塑性域から破壊に至るまでの荷重～変位関係の算定方法についてのみ説明する。降伏線理論では、部材に生じた降伏線によって崩壊メカニズムが形成された後RC床版を剛塑性体とみなし、仮想仕事とつり合い条件によって終局荷重を決定するものである。つまり、この理論を用いるにはまずRC床版の塑性モーメントと崩壊メカニズムを求める必要がある。

(1) RC床版の塑性モーメント

降伏線理論に用いる塑性モーメントは、はり材の解析手法をそのまま適用して算定できる¹²⁾。なお、はりの塑性モーメントを与える式は、圧縮側コンクリートのストレス・ブロックの形状の仮定によって種々の表現が提示されている¹⁸⁾。本解析では、部材断面をいくつかの要素に分割して各要素での力のつり合い条件から断面の中立軸を決定し、塑性モーメントを求めるという切断法を用いている。さらに本研究では、この手法の中に以下に示す各式に高速载荷によって生じるひずみ速度の影響を考慮した。

本実験に用いた試験体は、縦横方向の鉄筋量が等しい等方性床版であるので、任意方向の断面に対する単位幅あたりのモーメントはすべて等しいものとみなしている。また、高速で変形する鉄筋の応力～ひずみ関係はこれまでに報告された実験結果¹⁷⁾に基づいて定式化した以下の近似式¹⁸⁾を用いている(図-10参照)。

$$\sigma_f / \sigma_{fy} = 10^a \cdot \log \dot{\epsilon} + b + c \quad \text{----- (1)}$$

$$\sigma_{fu} / \sigma_{fy} = \sigma_f / \sigma_{fy} \quad \text{----- (2)}$$

ここに、 σ_f 、 σ_{fu} ：高速载荷を受ける鉄筋の降伏点および引張強さ(kgf/cm²)、 σ_{fy} 、 σ_{fy} ：静的载荷を受ける鉄筋の降伏点および引張強さ(kgf/cm²)、 a 、 b 、 c ：試験体の材料定数(文献14)によれば、 $a=0.1524$ 、 $b=-1.3394$ 、 $c=0.9350$)である。なお、式(1)におけるひずみ速度の適用範囲は、 $10^{-6} \sim 10^2/\text{sec}$ である。鉄筋のヤング係数はひずみ速度の影響を受けないものとし、 $E_s=2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ とする。鉄筋降伏以後のひずみ硬化は、ひずみ速度効果による引張強さの増加率が降伏点の増加率と等しいと仮定して式(2)で表している¹⁹⁾。またRC床版が面部材であるので、圧縮側コンクリートが拘束状態にあることと簡便のために、コンクリートの応力～ひずみ関係は次のパラボラ・直線式¹²⁾で表す(図-11参照)。

$$\begin{aligned} \sigma &= k \cdot \sigma_c' \cdot \{2(\epsilon / \epsilon_{co}) - (\epsilon / \epsilon_{co})^2\} & : \epsilon \leq \epsilon_{co} \\ \sigma &= k \cdot \sigma_c' & : \epsilon_{co} < \epsilon < \epsilon_{cu} \end{aligned} \quad \text{----- (3)}$$

ここに、 σ_c' ：高速载荷時のコンクリートの圧縮強度(kgf/cm²)、 ϵ_{co} ：パラボラの頂点におけるひずみ、 k ：コンクリートの品種・品質によって定まる定数(ここでは $k=1$ とする)である。式(3)で与えられるコ

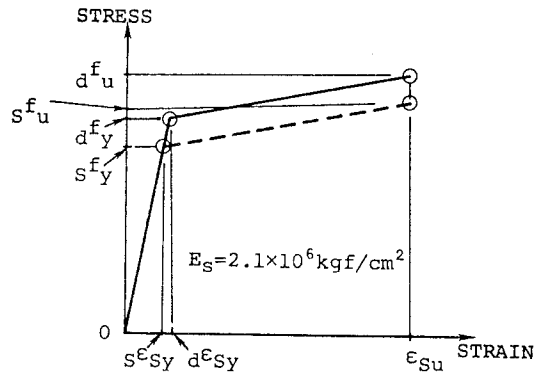


図-10 鉄筋の応力～ひずみ関係のモデル化

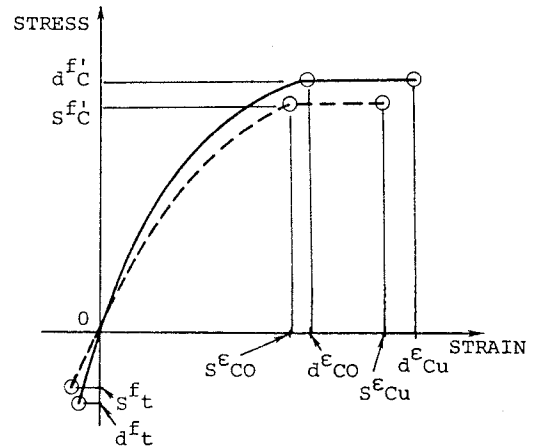


図-11 コンクリートの応力～ひずみ関係のモデル化

コンクリートの応力～ひずみ関係に対するひずみ速度の影響は、圧縮強度 (f_c') とパラボラの頂点におけるひずみ (ϵ_{co}) に対し以下の式で考慮している。

$$\frac{f_c'}{f_{co}'} = \frac{\alpha + \beta \log(a' \dot{\epsilon}) + \gamma \{\log(a' \dot{\epsilon})\}^m}{\alpha + \beta \log(a' \dot{\epsilon}_s) + \gamma \{\log(a' \dot{\epsilon}_s)\}^m} \quad (4)$$

また式(3)中のひずみ ϵ_{co} は、次式で与える。

$$\epsilon_{co} = \alpha_0 + \beta_0 \log \dot{\epsilon} + \gamma_0 (\log \dot{\epsilon})^{m_0} \quad (5)$$

ここに、 α 、 β 、 γ 、 m 、 a' 、 α_0 、 β_0 、 γ_0 、 m_0 はコンクリートの種類によって定まる値で、表-4のように与えられている¹⁷⁾。なお鉄筋の破断ひずみは、ひずみ速度の影響を受けない¹⁸⁾ものとした。コンクリートの終局ひずみに対するひずみ速度の影響は、本研究で同時に行った円柱供試体の高速載荷実験の結果に基づいて定式化した次式を用いた。

$$\epsilon_{cu}/\epsilon_{cu0} = 1.33 + 0.07 \log \dot{\epsilon} \quad (6)$$

ここに、 ϵ_{cu} ：高速載荷に対する円柱供試体の終局ひずみ、 ϵ_{cu0} ：静的載荷に対する円柱供試体の終局ひずみ（ここでは、0.31%の値を用いた）である。

表-4 コンクリートのひずみ速度関係式の係数

α	400	α_0	2240
β	5.30	β_0	15.0
γ	0.65	γ_0	4.0
m	3.27	m_0	2.31
a'	0.14		

(2) 崩壊メカニズム

床版の崩壊メカニズム形成は、床版の形状や支持条件などの違いによって相違する。縦横の長さが同一の正方形試験体に対し4辺単純支持の条件で行った本実験の場合、破壊時のひびわれ状況は図-12(a)のようであった。この結果に基づいて、図-12(b)のように降伏線をモデル化した。図-13は、正方形RC床版の崩壊メカニズムとその幾何学的関係を示したものである。4辺単純支持の正方形床版が版中央に集中荷重を受ける場合、床版の4隅は支持辺にてこ作用によって α - α 軸を回転軸として持ち上がる状態になる。回転軸となる α - α 軸の位置は、各隅点からXの距離である。いま、載荷部分が δ だけ下方に変位したときの、版に生じた降伏線によって分割されたブロックI、IIについて降伏線の長さ ℓ と回転角 θ を求める。

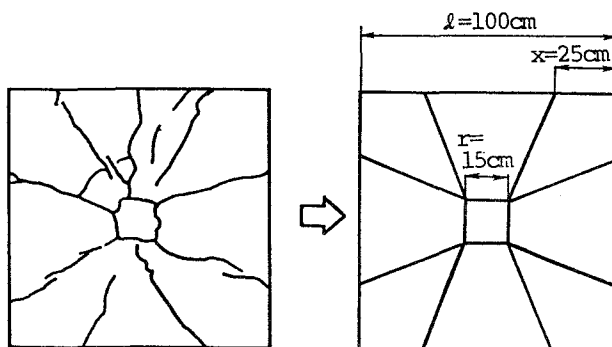
図-13において、辺DEの長さ ℓ_2 は $\ell - 2X$ 、 β - β 軸回りの回転角 θ_2 は $2\delta/(\ell - r)$ である。分割部IIにおける α - α 軸の長さCDは、 $\ell_1 = \sqrt{2}X$ 、 α - α 軸回りの回転角 θ_1 は $\sqrt{2}\delta/(\ell - r - X)$ となる。分割部I、IIと同じものが、版全体では各4つずつあるので、塑性モーメント M_p (kgf・cm/cm) による内部仕事は、

$$\begin{aligned} U &= 4M_p \theta_1 \ell_1 + 4M_p \theta_2 \ell_2 \\ &= 4M_p X \sqrt{2} \frac{\sqrt{2}\delta}{\ell - r - X} \\ &\quad + 4M_p (\ell - 2X) \frac{2\delta}{\ell - r} \end{aligned}$$

で与えられる。一方、荷重Pによる外力仕事Wは $W = P \cdot \delta$ であり、 $U = W$ の条件から荷重Pは次のように表される。

$$\begin{aligned} P &= 4M_p X \sqrt{2} \frac{\sqrt{2}}{\ell - r - X} \\ &\quad + 4M_p (\ell - 2X) \frac{2}{\ell - r} \quad (7) \end{aligned}$$

Wを最小とするXのとき、崩壊メカニズムが形成されるので、 $\partial W / \partial X = 0$ の関係から $X = (1 - \sqrt{2}/2)(\ell - r)$ を得る。本実験の場合 $\ell = 100\text{cm}$ 、 $r = 15\text{cm}$ なので、 $X = 25\text{cm}$ と



(a) 実験で生じた降伏線 (b) 計算に用いた降伏線パターン

図-12 RC床版の降伏線パターン

なる。このとき、崩壊メカニズム形成時の荷重 P_m は式(7)から $P_m=8.04M_p$ となる。

また、メカニズム形成以後の荷重 P^* は

$$P^*=8.04(M_p+\Delta M) \quad \text{---(8)}$$

で算定される。ここに、 ΔM ：メカニズム形成以後の曲げモーメントの増分である。

(3) 塑性域における載荷面変位と塑性回転角による曲率の関係

剛塑性理論における塑性ヒンジの考え方を、崩壊メカニズム形成後の床版の挙動に適用する。部材の塑性回転によって生じる曲率はひびわれ部分に集中する。したがって、ある広がりをもった塑性域長さ l_p は回転によって生じた曲率 $\phi-\phi_y$ が平均的に分布する区間、すなわち等価塑性ヒンジ長 l_{eq} として仮定することができる(図-14参照)。つまり、降伏線で区切られた床版の各ブロックは剛体であると仮定しているので、塑性ヒンジ形成後の床版の挙動は断面的にみるとはり部材の挙動と同様であるとみなすことができる。そこで本研究では、RCはり部材を対象として実験により求められた次のCorleyの式を用いることにする。

$$l_{eq}=0.5d+0.2\sqrt{d}(z/d)$$

ここに、 d ：有効高さ(cm)、 z ：せん断スパン長(cm)である。このとき、塑性回転角 θ_p は次式で表される。

$$\theta_p=(\phi-\phi_y)\cdot l_{eq} \quad : \phi > \phi_y \quad \text{---(9)}$$

一方、各分割部の塑性回転角 θ_p はいずれも等しく、

$$\theta_p=(\delta-\delta_m)/L \quad \text{---(10)}$$

で与えられる。ここに、 δ_m ：崩壊メカニズム形成時の載荷面の変位(cm)、 L ：分割部の回転長さ(cm)である。式(9)と(10)から、載荷面変位と曲率の関係が次のように得られる。

$$\phi-\phi_y=(\delta-\delta_m)/(L\cdot l_{eq}) \quad \text{---(11)}$$

同様に、変位速度 V と曲率速度 $\dot{\phi}$ の関係は

$$\dot{\phi}=V/(L\cdot l_{eq}) \quad \text{---(12)}$$

となる。崩壊メカニズムが形成されるまでの荷重、変位および曲率は、別途計算により求まっているので、メカニズム形成以後の曲率と曲率速度は式(11)、(12)から求められる。また、ひずみ速度の影響(式(1)～

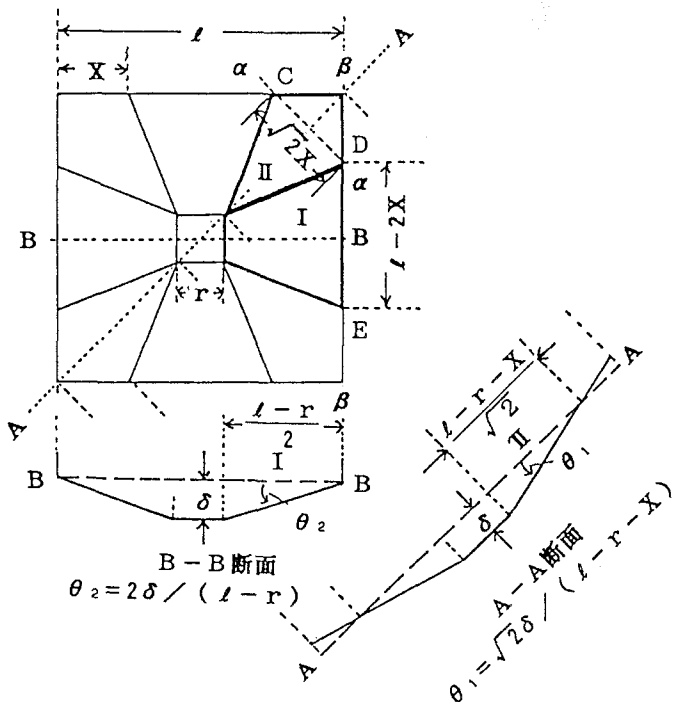


図-13 RC床版の崩壊メカニズムに対する仮想降伏線と回転角

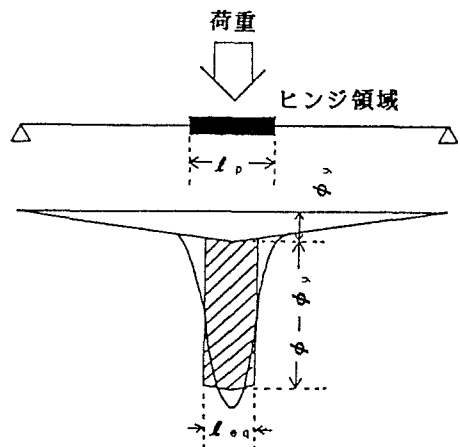


図-14 塑性ヒンジ領域と等価塑性ヒンジ長

(6)を考慮した塑性域での曲げモーメントは、各変位増分に対して逐次に算定される。このときの荷重は、式(8)から算定できる。コンクリートの上縁のひずみが終局ひずみに達するか、または鉄筋の引張ひずみが破断ひずみに達するまで変位を増加させ、図-9に示す手順を繰り返す。本研究では、変位増分の大きさを0.5mmとした。

図-15は、終局荷重とRC床版の有効高さの関係を示し、図-16は終局変位量と有効高さの関係を示している。両図中、実線はひずみ速度の影響を考慮した場合の計算結果を表し、破線は考慮しない場合(静的)の計算結果を表している。図から、ひずみ速度を考慮した本計算法による結果は、実験値と極めて良好に一致することがわかる。

図-17には、エネルギー吸収容量と床版の有効高さとの関係を示している。図中、●印は実験値、実線はひずみ速度の影響を考慮した場合の計算値、破線は考慮しない場合の計算値を表している。エネルギー吸収容量は、計算で求めた荷重～変位関係において終局状態に至るまでの面積を算定したものである。ひずみ速度の影響を考慮しない静的計算では、実験値をかなり下側に評価することになる。その程度は、有効高さが大きくなるにしたがって顕著である。これに対し、ひずみ速度の影響を考慮した本計算法によって、有効高さの増大にともなうエネルギー吸収容量の増加や値の大きさを適切に評価できることがわかる。

5. まとめ

本研究は、RC構造の基本的部材の一つであるRC床版を対象として、その動力学特性と終局限界性能を定量的に評価することを目的とした。この目的から、まず高速載荷実験および静的載荷実験を行った。実験では、RC床版の鉄筋係数および有効高さをパラメータとして、破壊に至るまでの挙動や終局限界性能について調べ、両実験による結果の比較・検討を行った。また、動的載荷に対する終局限界性能を定量的に評価するために、ひずみ速度の影響を考慮した解析法を提示した。計算結果と実験値との比較から、本解析法の適用性を確認した。本研究で得られた成果は、以下のように要約できる。

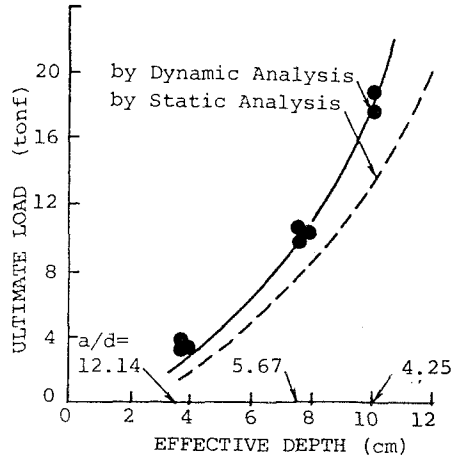


図-15 終局荷重と有効高さの関係

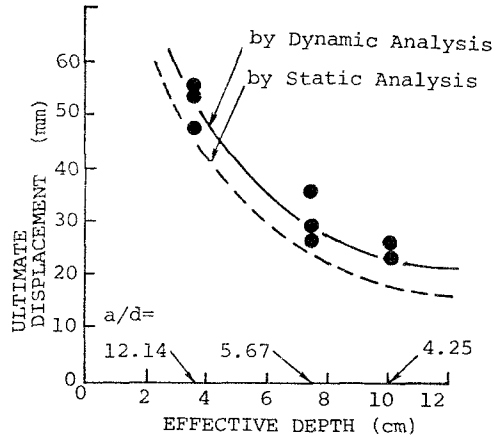


図-16 終局変位量と有効高さの関係

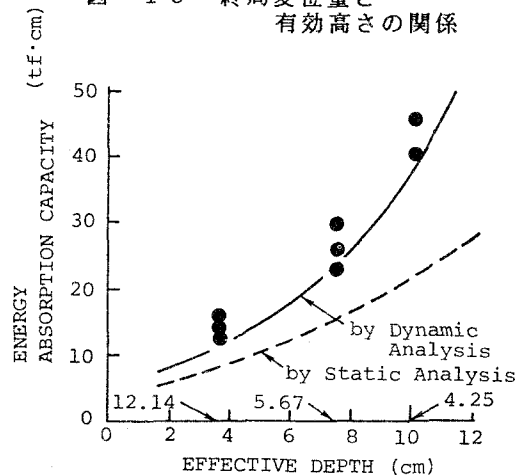


図-17 エネルギー吸収容量と有効高さの関係

- (1) 静的載荷および高速載荷に対する変形挙動は、鉄筋係数の増大または有効高さの増大にともない、いずれも曲げ型から曲げせん断型に移行する。
- (2) 鉄筋係数の大きいRC床版 ($q=0.10$) が静的載荷を受ける場合、押し抜きせん断によって極めて脆性的な破壊挙動を示す。高速載荷を受ける場合は、比較的変形の大きい曲げ押し抜き型の弾塑性挙動を示す。
- (3) 静的載荷および高速載荷に対するRC床版の終局荷重は、高速載荷の方が大きな値を示すが、いずれも鉄筋係数の増大または有効高さの増大にともなって増大する。
- (4) 終局変位量は、静的載荷および高速載荷のいずれに対しても鉄筋係数の増大または有効高さの増大にともなって減少する。
- (5) 静的載荷を受ける場合のエネルギー吸収容量は、鉄筋係数の増大にともなって減少する。一方、高速載荷に対しては、エネルギー吸収容量が最大となる鉄筋係数が存在 (本実験では、 $q=0.06$) する。また、エネルギー吸収容量は、鉄筋係数が最小の試験体 ($q=0.02$) を除いて、高速載荷を受ける場合の方が静的載荷時よりも大きな値を示す。
- (6) 有効高さが増大すると、エネルギー吸収容量は静的載荷および高速載荷のいずれに対しても増大する。また、その割合は高速載荷時の方が静的載荷時よりも大きい。
- (7) 鉄筋量の増加は必ずしもエネルギー吸収容量の増大にはつながらないが、圧縮鉄筋を配置することやコンクリートのせん断補強を適切に行うことにより、エネルギー吸収容量の増大を図ることができる。
- (8) 高速載荷を受けて曲げ破壊するRC床版 ($q=0.06$ 程度) の終局限界性能は、本研究で提示した手法によって良好に評価できる。ただし、鉄筋係数の多少や変形速度の大きさによってはRC床版の破壊形態が曲げ破壊とはならず、別途の解析法が必要である。

なお、本研究で取り扱った試験体は、鉄筋係数が0.02～0.10、有効高さが3.5cm～10.0cm ($a/d=12.14\sim 4.12$)、版の大きさ120cm×120cmの範囲であるので、当然ながら本研究で得られた成果の適用に制約を受ける。また、圧縮側鉄筋の存在とその多少およびせん断補強筋がRC床版の終局限界性能に及ぼす効果を調べること、そして破壊形態の相違に対応できる解析法を開発することが今後の課題として残されている。

謝辞 本実験を実施するにあたり、防衛大学校理工学研究科学生 丸山貴司君のご協力を得た。ここに付記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 竹田仁一，立川博之，藤本一男：コンクリートと衝撃（衝撃を受けるコンクリートの性状と実験），コンクリート工学，Vol.15，No.4，pp.1-11，1977.4
- 2) Committee on Nuclear Structures and Materials of the Structural Division of the ASCE：Structural Analysis and Design of Nuclear Plant Facilities，Chapter 6，pp.309-384，1976
- 3) 竹田仁一，河村隆：爆発による鉄筋コンクリート構造物の変形，破壊の定量的予測，工業火災協会誌，Vol.46，No.4，pp.182-194，1985
- 4) 高橋芳彦，辻本雅洋，山田伊智郎，大野友則，内田孝：高速載荷を受けるRC部材の終局限界性能に関する実験的研究，コンクリート構造物の靱性とその評価法に関するコロキウム論文集，pp.163-172，1988.3
- 5) 辻本雅洋，高橋芳彦，大野友則，内田孝：高速変形するRCはりおよびRC床版の曲げ耐力，土木学会第42回年次学術講演会概要集第I部，pp.184-185，1987.10

- 6) 辻本雅洋, 江崎賢治, 高橋芳彦, 内田孝: 高速変形するRC床版の終局限界性能に関する実験的研究, 土木学会第15回関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.62-63, 1988.3
- 7) 丸山貴司, 下田治, 平岡伸一, 高橋芳彦, 内田孝: 衝撃荷重を受けるコンクリート円柱供試体の応力伝播に関する基礎的研究, 土木学会第15回関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.18-19, 1988.3
- 8) 丸山貴司, 高橋芳彦, 内田孝: 横拘束を受けるコンクリート円柱供試体の動力学特性に関する実験的研究, 第43回年次学術講演会概要集第I部, pp.298-299, 1988.10
- 9) 藤井学, 宮本文穂, 鮎子多浩一, 中辻純一郎: 鉄筋コンクリート版構造の衝撃破壊挙動解析に関する基礎的研究, コンクリート工学年次講演論文報告集, pp.609~614, 1987
- 10) 土橋由造, 内山武司: 積層要素による床版の弾塑性解析, 日本建築学会論文報告集, 第266号, pp.41~49, 昭53.4
- 11) T.Uchida, H.Tsubota and T.Yamada: Experimental Investigation on Reinforced Concrete Slabs Subjected to Impact Loading, Paper J5/1, SMirt-8, Brussels, pp.173~178, 1985
- 12) 小阪義夫, 森田司郎: 鉄筋コンクリート構造, 丸善出版, 昭52
- 13) 東洋一, 小森清志: 平板構造, 建築構造学大系11, 彰国社, 昭45
- 14) 坪井善勝: 平面構造論, 丸善出版, 昭30
- 15) S.Timoshenko and S.Woiniwski-Krieger: Theory of Plates and Shells, 2nd ed., Mc Graw-Hill, New York, 1959
- 16) ACI, Committee 318: Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI 318-71), American Concrete Institute, Detroit, 1971
- 17) 竹田仁一, 立川博之: 高速圧縮荷重を受けるコンクリートの力学的諸性質とその基本的関係式(構造物及び構造材料の高速荷重に対する力学的性質の研究, その4), 日本建築学会論文報告集, 第78号, pp.1~6, 昭37.10
- 18) 高橋芳彦, 塩治長, 大野友則, 石川信隆, 内田孝: ひずみ速度効果を考慮した鉄筋コンクリートはりの衝撃曲げ応答解析, 構造工学論文集, Vol.32A, pp.669~682, 1986
- 19) 岩井哲, 吉田望, 中村武, 若林寛: 構造部材の挙動に及ぼす載荷速度の影響に関する実験的研究(その1), 日本建築学会論文報告集, 第314号, pp.102~111, 昭57.4
- 20) Corley W.: Rotational Capacity of Reinforced Concrete Beams, Proc. of ASCE, Vol.92, ST5, 1966

(1988年10月12日受付)