

四辺単純支持PC床板の衝撃載荷実験

EXPERIMENTAL STUDY OF SIMPLY SUPPORTED PC SLAB UNDER IMPACT LOADING

三上敬司* 岸 徳光** 松岡健一*** 能町純雄****

by Takashi MIKAMI, Norimitsu KISHI, Ken-ichi G. MATSUOKA and Sumio G. NOMACHI

The discussion in this paper is confined to the dynamic behavior of Prestressed Concrete (PC) slabs under impact loading. Especially, the dynamic responses of PC slabs in the transition between elastic and plastic regions are experimentally considered. The PC slabs used in this study are prepared according to the following specifications: 150cm × 150cm × 10cm in dimensions, double reinforcements with approximately 1% in both directions, and prestress of 50kgf/cm² in the both directions. The heavy weight has 70kgf weight and dropped to the center of slab with the maximum velocity 4m/sec.

From the experimental results, it has been observed that, in case of impact velocity 4m/sec, the plastic region caused near the loading point can not spread by the effects of prestress and the slab can elastically resist impact force with damping vibration. On the contrary, Reinforced Concrete (RC) slab was transferred in the state of being cracked in the tension side and vibrates with high damping.

1. まえがき

各種交通の防災施設としてのロックシェッドや、原子力発電所等の重要施設構造物は衝撃的な荷重載荷に対しても十分安全でなければならない。このような構造物を合理的に設計するためには、緩衝材を用いず直接構造物に衝撃荷重が作用する場合には構造部材の局所的な耐衝撃特性を、緩衝材を用い衝撃エネルギーの吸収および荷重作用時間を延長させる場合にはその緩衝システムの特性や構造物全体の動的応答性状の把握が肝要であるものと考えられる。

我国の土木工学の分野における衝撃問題に関する研究において、衝撃荷重が直接構造部材に作用する場合の実験的研究には、内田等による鉄筋コンクリート (RC) 床板の静的および衝撃吸収エネルギーの定量化に関する研究¹⁾、石川等による鋼管構造の衝撃挙動に関する研究^{2),3)} や大沼と伊藤等による各種コンクリート部材に関する耐衝撃性検討の研究^{4)~6)} などがある。

著者等も小型模型による各種構造部材に関する弾性実験や理論解析を行ない、理論の適用性について検討している^{7)~10)}。また、コンクリート部材の耐衝撃性検討のために重錘落下衝撃実験装置を設置し、RC床板やAFRPロッドを補強筋として用いたコンクリート床板等の衝撃実験を行ない、衝撃力の算定や応力波の伝播挙動、補強筋の歪の応答性状についての検討を行なっている^{11)~14)}。

RC構造に関する研究は上記のように各研究機関で行なわれており、ある程度の耐衝撃特性も明らかになってきている。しかしながら、プレストレストコンクリート (PC) 構造に関する研究は、著者の知る限りでは、大沼と伊藤等

* 工修 専修大学北海道短期大学助教授 土木科 (079-01 美瑛市光珠内町)

** 工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 (050 室蘭市水元町27-1)

*** 工博 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 (050 室蘭市水元町27-1)

**** 工博 日本大学講師 生産工学部土木工学科 (275 習志野市泉町1-2-1)

による貫通や裏面剥離が生じるような中高速度衝突衝撃に対する梁および床板の耐衝撃性に関する研究、園田等による実験的に材料特性を求め、その結果を用いた梁部材の動的曲げ耐力と変形性能を解析的に検討した研究¹⁵⁾、横山等によるPC・RC桁の静的耐力、衝撃耐力および変位照査法に関する研究¹⁶⁾の成果以外に見当たらない。衝撃荷重載荷時のPC構造体の動的挙動は、初期応力を受けているためひび割れの制御等RC構造体とは異なることが予想される。PC構造物の合理的な耐衝撃設計法の確立のためには、貫通、裏面剥離が起こる場合は勿論のこと、それらが発生しない程度の衝突衝撃荷重に対する応答性状も含め理論的および実験的研究が必要であるものと考えられる。

本研究では、このような観点より床板模型を用いて弾性から塑性初期領域までのPC部材の衝撃応答性状を明らかにすることを目的として、重錘衝撃の衝突速度を最大4m/secに限定した場合の重錘落下衝撃実験を行ない、先に報告しているRC矩形床板の挙動と比較する形で検討を行なった。また、本実験では初期導入応力を50kgf/cm²としている。

2. 衝撃実験

2.1. 衝撃荷重載荷装置

衝撃実験は、室蘭工業大学に設置している落錘衝撃万能試験機を用いて行なった(写真-1)。衝撃荷重は、先端が鋼製の円柱である重錘($\phi=15\text{cm}$, $W=70\text{kgf}$)を所定の高さにセットし、自由落下させることによって発生させている。重錘底部には片当たりを防止するために高さ2mmの球底としている。

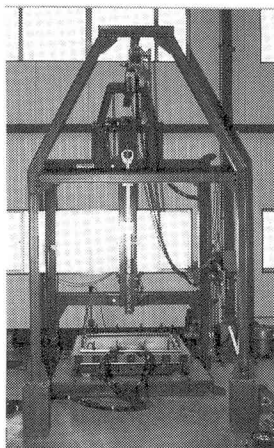


写真-1
落錘衝撃万能試験機

PC床板の支持部は、四辺単純支持を仮定し、この仮定にできるだけ近づけるためと床板の跳ね返りを防止するために支持部、床板上下に鋼製ローラーを設置し、ボルトを用いて支持台に固定している。なお、衝撃荷重は試験体中央部に限定して載荷することとした。

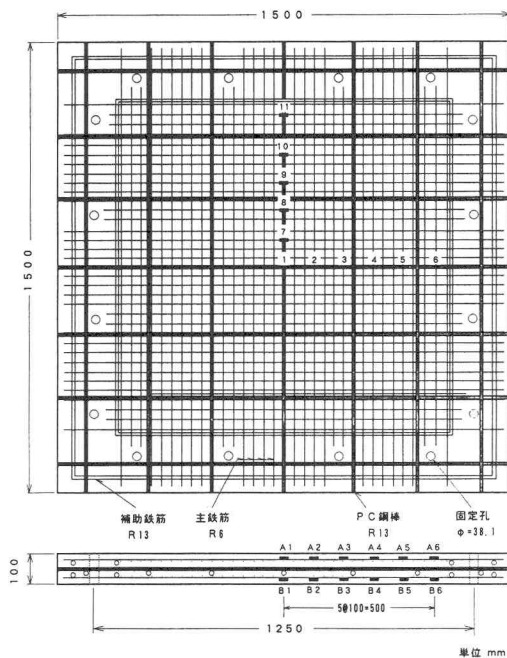


図-1 歪ゲージ貼付位置および配筋図

2.2. PC矩形床板

試験体は、電力中央研究所で行なわれた衝撃実験⁵⁾と同様な形状寸法150×150×10cm、かぶり1cmとし、鉄筋比は片側およびその1%の複鉄筋断面とし、R6を3.3cm間隔で配筋している。純スパンは2方向ともに125cmである。また、プレストレスは2方向に断面平均に50kgf/cm²の応力を導入することとし、各方向に直径13mmのPC鋼棒を断面中心部に配置した。プレストレス力の導入は床板の上下面に歪ゲージを貼付し、導入応力を計測しながら行なっている。プレストレス力は床板両端部鋼棒に7.5tf、内部の鋼棒に12tf導入している。歪ゲージの貼付位置および配筋図を図-1に示す。試験体に用いたコンクリートの配合は、表-1に示すとおりである。以上の仕様によりPC床板を8体製作し実験を行なった。表-2には、試験体名(PC-SLB10-15~22)、載荷番号(落下回数)と衝突速度(1~4m/sec)を示

表-1 コンクリート配合表

設計基準強度 (kgf/m ²)	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単体量 (kg/m ³)				
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 (ml/m ³)
400	20	8.5 ± 2.5	4.5 ± 1.0	35.0	40.3	151	431	721	1069	4.31

している。コンクリート床板は、4 体ずつ 2 度に分けて打設したため 28 日圧縮強度や弾性係数が多少異なったが、表-2のPC-SLB10-15~18の28日圧縮強度は567.9kgf/cm²、PC-SLB10-19~22は570.4kgf/cm²である。また、弾性係数は、それぞれ E₁ = 3.13×10⁵kgf/cm²、E₂ = 3.62×10⁵kgf/cm²であり、ポアソン比についてはいずれも0.20であった。

比較のために用いた RC床板に関する実験内容を表-3に示す¹²⁾。PC床板と同一の形状かつ配筋を有するものである。また、コンクリートの物性値は、28日圧縮強度が530kgf/cm²、弾性係数が3.24×10⁵kgf/cm²、ポアソン比が0.2である。

表-2 PC床板の試験体名および載荷順序一覧

試験体名	載荷番号	衝突速度 V(m/sec)	試験体名	載荷番号	衝突速度 V(m/sec)
PC-SLB10-15	-1	1.0	PC-SLB10-19	-1	1.0
	-2	1.0		-2	1.0
	-3	2.0		-3	2.0
	-4	3.0		-4	3.0
	-5	4.0		-5	4.0
	-6	4.0		-6	4.0
PC-SLB10-16	-1	2.0	PC-SLB10-20	-1	2.0
	-2	2.0		-2	2.0
	-3	2.0		-3	2.0
	-4	3.0		-4	3.0
	-5	4.0		-5	4.0
PC-SLB10-17	-1	3.0	PC-SLB10-21	-1	3.0
	-2	3.0		-2	3.0
	-3	4.0		-3	4.0
	-4	4.0		-4	4.0
PC-SLB10-18	-1	4.0	PC-SLB10-22	-1	4.0
	-2	4.0		-2	4.0
	-3	4.0		-3	4.0
	-4	4.0		-4	4.0
	-5	4.0		-5	4.0
	-6	4.0		-6	4.0

表-3 RC床板の試験体名および載荷順序一覧

試験体名	載荷番号	衝突速度 V(m/sec)	試験体名	載荷番号	衝突速度 V(m/sec)
RC-SLB10-11	-1	1.0	RC-SLB10-13	-1	3.0
	-2	4.0		-2	1.0
	-3	4.0		-3	1.0
	-4	4.0		-4	4.0
RC-SLB10-12	-1	2.0	RC-SLB10-14	-1	4.0
	-2	3.0		-2	4.0
	-3	4.0			
	-4	4.0			
	-5	4.0			

2.3. 計測方法

計測システムのフローチャートを図-2に示す。本実験では測定用センサーとして歪ゲージ型加速度計と歪ゲージを用いている。加速度計は重錘の衝突衝撃力を求めるために重錘腹部に取り付け、落下速度に対応して500Gと1000Gタイプの2種類を使い分けている。また、歪ゲージは床板内の鉄筋部の応力波動伝播特性を検討するために上下端筋の外縁部に貼付することとした。本実験ではゲージ長 2mm、ゲージ抵抗 120Ωの箔歪ゲージを使用し、キャブタイヤケーブルを用いた3線式1枚ゲージ法に基づいて測定を行なっている。これら各センサーからの信号は最大 50KHzまで測定可能な直流増幅器を用いて増幅し、周波数特性がDC~40

KHzである帯域用

アナログデータレコーダに記録している。波形の再生は、最小サンプリングタイムが1μsecであるウェーブメモリーを介して任

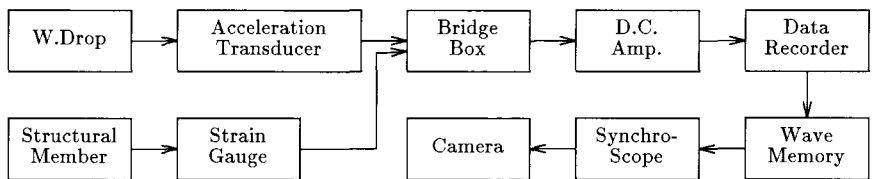


図-2 計測システムのフローチャート

意の時間軸に拡大し、シンクロスコープに静止画像を発生させ写真撮影する方法によっている。

3. 実験結果および考察

実験は、表-2に示したように、 $V=1, 2, 3, 4\text{m/sec}$ の衝突速度に対して必ず2枚の床板に処女載荷を行なうように載荷順序を設定して行なった。以下に各項目についての実験結果および考察において、引張部のコンクリートにひび割れが発生せずRCあるいはPC部材の全断面が有効と考えられる状態を状態Ⅰ、引張部のコンクリートにひび割れが発生し引張部のコンクリートを無視して断面の算定を行なうような状態を状態Ⅱと呼ぶこととする。

3.1. 重錘加速度の応答波形

図-3は、PC-SLB10-19-1、PC-SLB10-16-1、PC-SLB10-21-1、PC-SLB10-22-1の各衝突速度に対する重錘の加速度波形を示している。 W_{ac} は、重錘の点対称の位置に貼付された加速度計より求められる波形の1つである。図より第1波目の波動継続時間はいずれの場合も $400\sim 450\mu\text{sec}$ 程度であることがわかる。正の第2波目の波動は $V=1\text{m/sec}$ の場合には明確に示されているが、その他の場合には約10KHzの高周波が重ね合わされた状態となっている。主波動の周期を概算すると $0.9\sim 1.0\text{msec}$ 程度である。この値は重錘底部中央部分を固定とする重錘の鉛直方向最低次自由振動周期(0.9msec)に近似しており、高さ2mmの球底部によって重錘の自由振動が励起しているものと考えられる。一方、約10KHzの高周波成分は、加速度計の固有周期に関するカタログ値が9KHz(500G加速度計)、12KHz(1000G加速度計)であることより、加速度計の固有周期が励起されているものと考えられる。

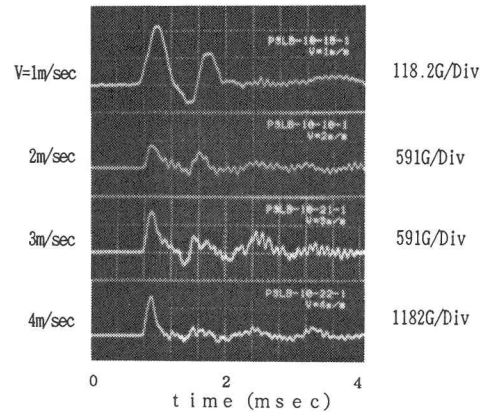


図-3 処女載荷時における重錘加速度の1応答波形

同一の形状寸法、鉄筋比を有するRC床板に関する実験結果と比較すると、両者ほぼ同様な応答波形を示しており、プレストレス導入による重錘加速度波形への影響は現れていないようである。また、各衝突速度における最大加速度は、それぞれ約250G、470G、830G、1650Gとなっている。

3.2. 鉄筋歪波形の分布特性

3.2.1. 歪の時刻歴応答

図-4は、PC-SLB10-15-1の衝突速度 $V=1\text{m/sec}$ に対する鉄筋各点の歪波形を示している。図中のA1~A11は上端筋の歪波形を、B1~B11は下端筋の歪波形を示している。なお、全計測時間は40msecであり、波形分布図は、基準軸より上側が引張歪、下側が圧縮歪を示している。歪の最大値は、荷重載荷点直下に生じ、上端筋のA1では約 160μ 、下端筋のB1では約 280μ である。A2、B2とA7、B7はお互いに直角方向の歪成分であるが、A2、B2は $\mp 70\mu$ 、A7、B7はそれぞれ -100μ 、 140μ となっており、A7、B7の方が大きな歪となっている。この現象は、RC床板も同様である¹²⁾。実験結果よりプレストレスを考慮すると中心部下端筋で 120μ 程度の実引張歪となり未だ弾性状態であるものと考えられるが、中心部上下縁には僅かであるが残留歪が発生している。歪波形は荷重が除荷したと考えられる約4msec経過した時点で急激に減衰し、その後、この床板の最低次固有周期(約5msec)に近い周期を有する減衰自由振動へ移行している。衝撃初期においてはA2~B6の歪に符号の逆転現象が見られることから、波動の進行に伴い床板に負の曲げモーメントが生じていることがわかる。これは波動先端部が固定端のように挙動していることを示してい

るものと考えられる。

図-5(a), (b)は、PC-SLB10-2-1とRC-SLB10-14-1の衝突速度4m/secにおける鉄筋各点の歪波形を比較して示している。歪の座標に関しては図-4と同様である。PC床板の鉄筋歪の応答波形(図-5(a))をみると、下端筋の最大歪はB1で約1000 μ 、上端筋の最大歪はA1で約-320 μ となっており圧縮歪に比べて引張歪の方が約3倍強大きな応答値となっている。これより、床板の中心部分では、ひび割れが発生して剛性が低下しているものと推測されるが、衝撃荷重除荷後はV=1m/secの場合と同様な減衰自由振動状態に移行している。これは載荷点近傍がひび割れ発生によって局部的に剛性が低下するもの載荷点から離れた領域(B3, 9以遠)ではプレストレスの効果によってひび割れ発生が阻止され、全体としては残留歪も少なく弾性に近い状態で振動しているものと考えられる。

一方、RC床板の場合には、V=1m/secに対する歪波形をここには示していないが、このときは荷重除荷後、この床板の固有周期に近い周期が5msec前後の減衰自由振動を示しPC床板と同様の挙動を示すことが明らかになっている。これに対して、V=4m/secの場合には、衝撃荷重載荷時に載荷点において6msec程度で最大歪が上下縁で $\pm 1250\mu$ 程度の応答を示すが、除荷後はPC床板のような減衰自由振動を示すことなく急激に減衰し、残留歪値に収斂している。また、ゲージB5、B11点においても200 μ 以上の

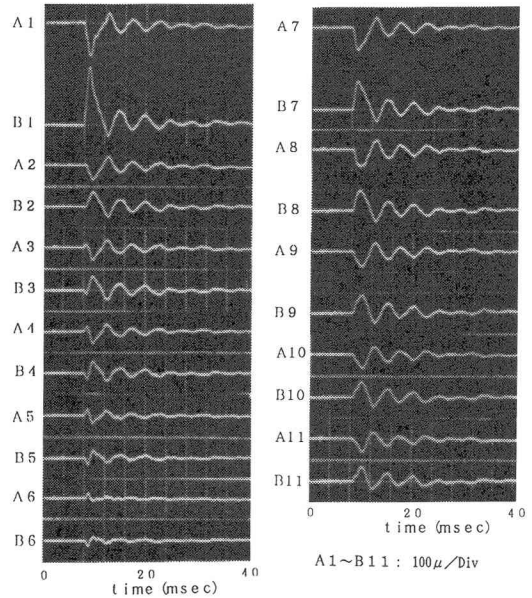


図-4 衝撃速度V=1m/sec、処女載荷時におけるPC-SLB-15の上下端筋歪波形

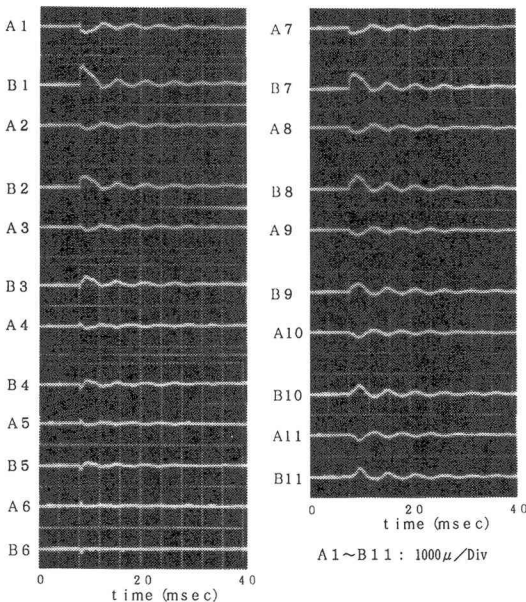


図-5(a) 衝撃速度V=4m/sec、処女載荷時におけるPC-SLB-22の上下端筋歪波形

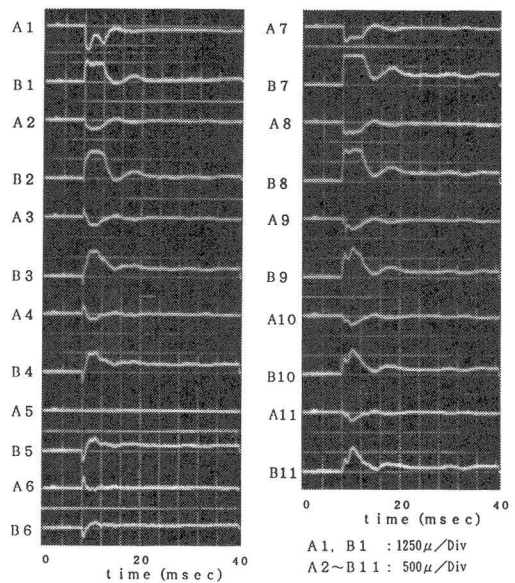


図-5(b) 衝撃速度V=4m/sec、処女載荷時におけるRC-SLB-14の上下端筋歪波形¹²⁾

歪が発生しており、ほぼ床板の裏面全体においてひび割れが発生し上下端筋の歪成分はそれぞれ圧縮、引張領域内のみに変動しているようである。RC床板でも、PC床板と同様にA2、B2とA7、B7とを比較するとA7、B7の方が大きい値を示す傾向にある。

これより、本実験の範囲では、PC床板は重錘重量 70kgf、衝突速度 $V=4\text{m/sec}$ 程度の衝突衝撃荷重に対して振動周期が約 5.5msecとなり $V=1\text{m/sec}$ の場合よりも若干長くなるものの、 $V=1\text{m/sec}$ の場合と同様減衰自由振動を示し状態Ⅱでの弾性振動状態を保持していると思われる。また、ひび割れ発生領域を載荷点近傍に限定している。このことは、平均応力 50 kgf/cm^2 のプレストレスが、効果的に作用していることを明示している。

3.2.2. スパン方向の下端筋歪分布

図-6、7は処女載荷時の衝突速度が $V=1\text{m/sec}$ 、 4m/sec における各時間ステップの床板下端筋の歪分布をRC床板の場合と比較して示している。図-6は衝突速度が $V=1\text{m/sec}$ における結果である。 $t=0.2\sim 2\text{msec}$ までの歪分布より、PC、RC床板とも衝撃荷重による主歪波動が支持点に向かって伝播しやがて低次の振動モードを形成する状態がわかる。 $t=0.8\sim 1\text{msec}$ まではPC、RC床板ともほぼ同様の歪分布を示している。 $t=1\text{msec}$ 以降 4msec までは、PC床板の場合には、プレストレスを考慮した実引張歪

が 120μ 程度で未だひび割れが発生していないと思われ、各点の歪は零レベルまで徐々に減少している。一方、RC床板の場合には B3~B6点まではPC床板と同様に挙動しているようであるが、B1~B2点ではPC床板の場合よりも大きい値を示し、 $t=3.5\text{msec}$ までは減少の時間的な割合も小さいが、 $3.5\sim 4\text{msec}$ で急激に零レベルに戻っていることがわかる。PC床板の場合と対比して考えると、これは荷重載荷点近傍にひび割れが発生して剛性が局部的に低下しその結果荷重の低下と対応して歪が減少できないことを示しているものと思われる。 $t=4\text{msec}$ 以降において、PC床板の場合には図-5に示されるように自由振動状態であることが確認できる。

一方、RC床板の場合には文献 12) より各点の歪波動から減衰自由振動状態に移行していることが明らかになっているが、本歪分布図からは確認することが困難である。これはひび割れの進行等によって零点が移動したためと考えられる。

図-7には衝突速度 $V=4\text{m/sec}$ の場合における結果を示している。この場合はPC、RC床板ともに衝撃初期より載荷点で 500μ 以上の歪が発生しているが、 $V=1\text{m/sec}$ の場合と同様に主歪波動の支点方向への伝播状況が明確に示されている。 $t=0.2\text{msec}$ ではPC、RC床板ともほぼ同じような歪分布を示しているが、それ以降では特に載荷点直下でRC床板の場合がPC床板より大きな値を示している。PC床板の場合には最大約 1000μ の歪が発生し、プレストレスを考慮してもひび割れが発生しているものと考えられるが、最大歪発生後徐々に減少し、 $V=1\text{m/sec}$ の場合と同様に $t=4\text{msec}$ でほぼ零レベルとなっている。これは前述のように、載荷点近傍部 (B1~B3) でひび割

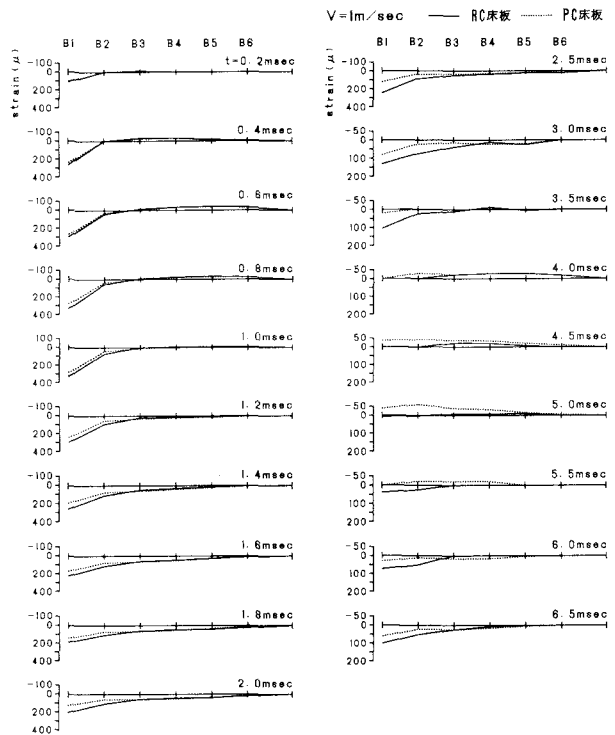


図-6 処女載荷時における衝突速度 $V=1\text{m/sec}$ 、PC-SLB 10-15およびRC-SLB10-11¹²⁾の各下端筋歪分布

れが発生して剛性も低下しているが、プレストレスの効果によりひび割れ発生領域が制御され、弾性状態に近い挙動を示しているものと考えられる。

一方、RC床板の場合は B4 ~ B5点近傍まで 500 μ 程度の歪が発生してほぼ床板の裏面全体にひび割れが進展しているようである。また、載荷点部は $t=5.5\text{msec}$ で零レベルに戻っており、 $V=1\text{m/sec}$ の場合やPC床板の場合に比べ一層塑性化が進行しているものと推察される。

以上より、本実験の範囲では載荷点部が1000 μ 程度の歪が発生するような場合において、RC床板の場合にはひび割れが周辺部に進展し広い領域で塑性化が進行するが、PC床板の場合にはプレストレスが有効に作用してひび割れが載荷点近傍のみで発生し、ほぼ一様な減衰振動状態を示すことが明らかになった。

3.2.3. 衝撃履歴の影響

繰り返し衝撃荷重載荷に対するPC床板の動的挙動を検討するために、衝突速度 $V=4\text{m/sec}$ の繰り返し載荷を与え、重錘加速度および上下端筋の歪を測定した。図-8には、繰り返し衝

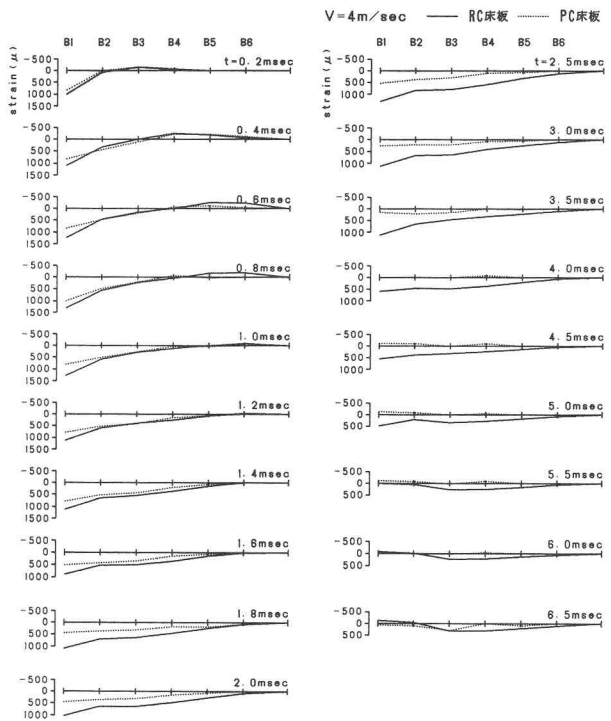


図-7 処女載荷時における衝突速度 $V=4\text{m/sec}$ 、PC-SLB10-22およびRC-SLB10-14¹²⁾の各下端筋歪分布

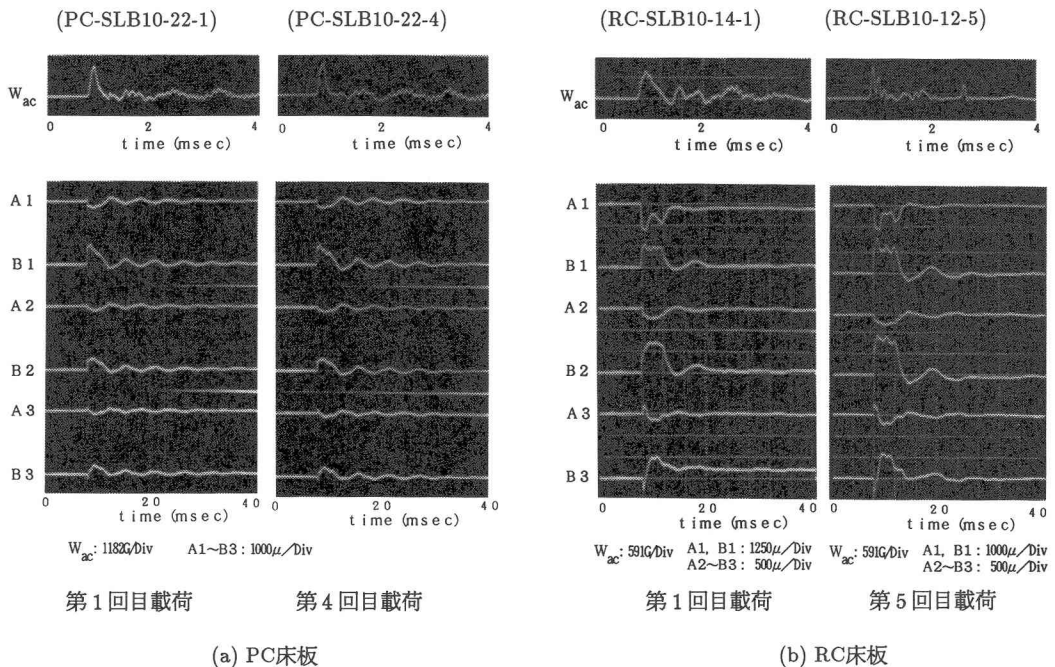


図-8 衝突速度 $V=4\text{m/sec}$ 、繰り返し載荷時におけるPC床板、RC床板の重錘加速度および鉄筋歪波形

撃荷重載荷における重錘加速度 (W_{ac})と上下端筋歪 (A1~B3) の応答波形をRC床板の場合の結果と比較して示している。(a)図がPC床板PC-SLB10-22の第1回目と第4回目載荷の結果であり、(b)図が RC床板の結果である。なお、RC床板の場合は、同じ衝突速度で 4回繰り返し載荷された結果がないため、ここでは、第 1回目載荷として RC-SLB10-14 を、第5回目載荷として RC-SLB10-12の結果を示している。なお、載荷履歴は衝突速度 $V=2m/sec$ 、 $3m/sec$ 、 $4m/sec$ 、 $4m/sec$ である。応答波形はいずれも零点補正を行った後実験を行っている。従って、各波形には過去の残留歪成分は含まれていない。

(a)図はPC床板の結果であるが、第 1 回目載荷時には前述のように、B1、B2点でそれぞれ最大約1000 μ 、500 μ 程度の歪が発生し載荷点近傍の裏面にひび割れが発生しているものと考えられるが、除荷後は下端筋で若干の零点移動を生じ減衰自由振動となっている。第 4回目載荷時の応答波形をみると、加速度および歪波形とも第 1 回目載荷時とほぼ同様であり、繰り返し載荷によってひび割れ等の発生による剛性低下が周辺部へ進行せず、床板の動的挙動特性は変化しないことがわかる。

一方、(b)図のRC床板の場合は、第 1 回目載荷においてB3点でも 1000 μ 以上の歪が生じ、ほぼ床板の裏面全体にひび割れが発生し剛性が低下することによって除荷後波動が急激に減衰することや残留歪が発生することは前述のとおりである。第 5 回目載荷時の場合は、第 1 回目載荷時に比べ載荷時の歪の振幅が若干大きくなりかつ除荷後の振動周期が 2msec程度長くなっている以外は第 1 回目載荷時と同様の変動状態となっている。これより同程度の繰り返し荷重載荷に対して、RC床板は振動周期が長くなっていることより剛性低下が徐々に進行しているものと考えられるが、第 1 回目載荷に比べて繰り返し載荷による剛性低下の割合は小さいものと考えられる。

以上より、衝突速度が4m/secの繰り返しの場合、RC床板は第 1 回目載荷の時点で裏面全体にひび割れが発生して状態Ⅱとなりその後著しい剛性低下を示さない。また、PC床板の場合はプレストレスの効果により載荷点近傍のひび割れが繰り返し載荷によって周辺部に進展することなく、載荷点近傍では状態Ⅱとなるものの全体としては中立軸の移動もなく弾性に近い状態で減衰自由振動を呈することが明らかになった。

3.3. 最大衝撃力

最大衝撃力の算定に関しては、弾性体間の衝突現象に対して Hertzの衝突理論を適用して得られた Love の解法など¹⁷⁾があげられる。本研究では重錘の衝突速度を小さくして弾性理論が適用できる範囲内に限って板に関する実験を行なっているため弾性接触論に基づいた衝撃力算定式を用いて実験結果との比較検討を試みることにした。解析式の誘導は、文献18)に詳細に述べられているのでここでは結果のみを示す。すなわち、最大衝撃力 Pは、

$$P = \frac{2EaVe^{-\beta\omega t}}{(1-\nu^2)\omega\sqrt{1-\beta^2}} \sin \omega \sqrt{1-\beta^2} \quad \dots(1)$$

ここで、減衰項および角振動数に相当する β 、 ω はそれぞれ次式のように示される。

$$\beta = \frac{1}{4h^2} \sqrt{\frac{3Ma}{2\rho}} \quad , \quad \omega = \sqrt{\frac{2Ea}{M(1-\nu^2)}} \quad \dots(2),(3)$$

最大衝撃力が発生する時間 t は

$$t = \frac{1}{\omega\sqrt{1-\beta^2}} \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{\beta} \quad \dots(4)$$

となる。ただし、V、a、Mは重錘の衝突速度、半径および質量であり、E、 ν 、 ρ 、hは床板の弾性係数、ポアソン比、密度および厚さである。

本研究では、 $E=3.13 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ 、 $\nu=0.2$ 、 $a=7.5\text{cm}$ 、 $h=10\text{cm}$ 、重錘重量 $W=70\text{kgf}$ 、床板の単位体積重量 $\gamma = 2.5\text{tf/m}^3$ として理論値を求めた。本解析値では、式(1)の時間関数部の平方根の中が負の値となるため過減衰状態と

なり、関数も三角関数型から双曲線関数型に変換される。(4)式より最大衝撃力が生じる時間は、 $t=0.110\text{msec}$ 程度となる。この値は、図-3 で示した実験結果より若干早い時間となっているようである。また、前述したように両供試体の弾性係数には相違がみられるため、本論文では、 E_1 の値を基準値として用い衝撃力を補正して理論値との比較検討を行っている。

図-9には、上記の弾性接触論より求めた衝撃力と、各衝撃実験で得られた最大加速度に重錘の質量を乗じて求められる値を比較して示している。ただし、実験値が重なるところではできるだけ重ならないように左右にずらして示している。図から明らかなように、 $V=1\text{m/sec}$ の場合は理論値が多少大きい値を示している。一方、文献 12)によれば $V > 1\text{m/sec}$ の場合では、RC床板における理論値は実験値の平均的な値を与えているが、PC床板の実験値は理論値を下限值として全体的に理論値より大きい値を示しているようである。また、本実験の範囲では落下回数による衝撃力の低下は見られないようである。以上により、弾性接触論から求められる衝撃力の算定式は、本実験の範囲で求められた PC床板の衝撃力のほぼ下界値を与えるものと考えられる。

4. まとめ

本論文は、貫通や裏面剥離が発生しない弾性状態から塑性状態に移行するような領域における PC 部材の動特性を検討するために、寸法が $150 \times 150 \times 10\text{cm}$ でかつ鉄筋比が約1%の複鉄筋コンクリート床板の2方向に平均 50kgf/cm^2 のプレストレスを導入した PC床板を作製し、 70kgf 重錘を用いた衝撃実験を行なった。実験は主に弾性領域から塑性初期の領域に限定するために最大衝突速度を 4m/sec とした。重錘加速度と鉄筋部における歪波形を測定することによって、床板が低次の振動状態へ移行するまでの過渡的な応答性状についての把握や衝撃力の評価を RC床板と比較する形で検討を行なった。本実験の範囲で得られた結果を要約すると以下ようになる。

- 1) 衝突速度 1m/sec の場合、PC床板は載荷点も含めほぼ弾性状態にあり、RC床板同様に減衰自由振動状態にある。
- 2) 衝突速度 4m/sec の場合、RC床板は裏面全体にひび割れが発生して除荷後波動が急激に減衰し、残留歪値に収斂している。一方、PC床板の場合は 50kgf/cm^2 のプレストレスが有効に作用して床板裏面のひび割れ発生領域を載荷点近傍に限定させ、振動周期が若干長くなるものの減衰自由振動を示している。
- 3) 衝突速度が $V=4\text{m/sec}$ におけるスパン方向の下端筋歪分布より、PC、RC床板とも荷重載荷初期に波動が支持点方向に伝播している状態を確認できた。
- 4) 衝突速度 $V=4\text{m/sec}$ における繰り返し衝撃荷重の場合には、RC床板は第1回目載荷以後剛性低下が小さいことが明らかになっている。一方、PC床板の場合は、プレストレスの効果により載荷点近傍のひび割れが繰り返し載荷によって周辺部に進展することなく、ほぼ一様な状態で減衰自由振動を呈している。
- 5) 弾性接触論より得られた最大衝撃力は、重錘の衝突衝撃力のほぼ下界値を与えるようである。

今後、これらの実験結果と各種の理論を用いて解析結果との比較を行ない、各理論の適用性等について検討したいと考えている。

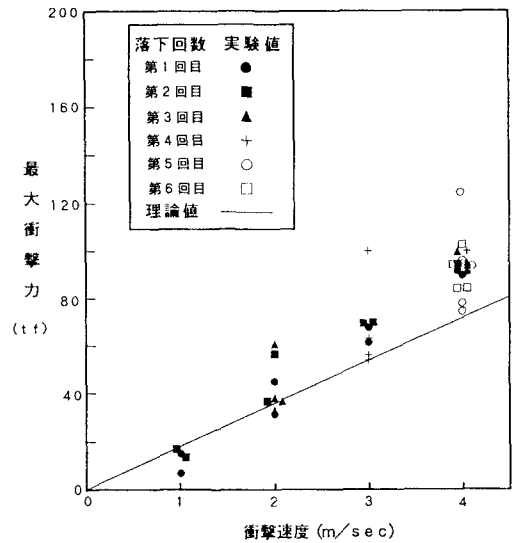


図-9 最大衝撃力と衝撃速度との関係

参 考 文 献

- 1) T.Uchida,H.Tsubota,T.Yamada: Experimental Investigations on Reinforced Concrete Slabs subjected to Impact Loading, Trans.8th SMIRT, Vol.J, Aug., pp.173~178,1985.
- 2) 斎藤英明・石川信隆・大野友則・水山高久: 鋼管片持ばりの衝撃吸収エネルギーに関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第386号/I-8, pp.321~328, 1987年10月.
- 3) 星川辰雄・香月智・石川信隆・飯田毅: 衝撃荷重を受ける鋼管円弧固定アーチの動的応答, 土木学会論文集, 第416号/I-13, pp.245~253, 1990年4月.
- 4) Ohnuma,H.,Ito,C,Takano,H. and Nomachi,S.G. : RC Beam Response Due to Impact by Moderate Speed Gun, Theoretical and Applied Mechanics, Vol.33, pp.329~336, 1984.
- 5) Ohnuma,H. and Ito,C. : Experiment and FEM Analysis of Impact Behavior of Prestressed Concrete Slabs Subjected to a Hard Projectile, Transactions of the Japan Concrete Institute, pp.495~502, 1985.
- 6) 伊藤千浩・大沼博志・白井孝治・能町純雄: 飛来物の衝突に対するコンクリート構造物の設計手法, JCIコロキウム-RC構造のせん断設計法に関する解析的研究, pp.227~234, 1989.
- 7) 岸徳光・松岡健一・能町純雄・吉田紘一: 一方向に補剛された両端単純支持矩形板の衝撃応答特性について, 構造工学論文集, Vol.33A, pp.549~557, 1987年3月.
- 8) 菅田紀之・岸徳光・松岡健一・尾崎 諒: 剛性マトリックス法の衝撃応答解析への適用性, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.1519~1527, 1991年3月.
- 9) 岸徳光・松岡健一・能町純雄: 有限ブリズム法を用いた単鉄筋RC梁の位相速度分散曲線とモード分布, 構造工学論文集, Vol.35A, pp.785~793, 1989年3月.
- 10) 松岡健一・岸徳光・泉智夫・三上敬司・能町純雄: 衝撃力を受ける単純支持RC矩形板の動的挙動, 土木学会北海道支部論文報告集, 第47号, pp.119~124, 1991年2月.
- 11) 菅田紀之・岸徳光・松岡健一・尾崎 諒: H型鋼を用いた門型ラーメンの弾性衝撃実験, 土木学会北海道支部論文報告集, 第47号, pp.137~142, 1991年2月.
- 12) 松岡健一・岸徳光・大沼博志・能町純雄: 四辺単純支持RC矩形板の重錘落下衝撃実験, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.1587~1596, 1992年3月.
- 13) 三上浩・岸徳光・松岡健一・能町純雄: 組紐状AFRPロッドを用いたコンクリートスラブの重錘落下衝撃挙動, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.1591~1602, 1991年2月.
- 14) 岸徳光・松岡健一・大沼博志・能町純雄: PCスラブを用いた低速度重錘落下衝撃実験, 落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.33~36, 1991年3月.
- 15) 園田佳巨・小林直行・石川信隆・佐藤紘志: 歪速度効果を考慮した PCはり部材の動的曲げ耐力と変形性能, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.1455~1465, 1992年3月.
- 16) 横山功一・大塚久哲・金子学: 衝撃荷重を受けるPC・RC桁の破壊時挙動と変位照査法について, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.1543~1551, 1992年3月.
- 17) A.E.H.Love: A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity, 4th ed., Dover Publications, pp.198~220, 1944.
- 18) 大沼博志: コンクリート構造物の高温クリープと衝撃応答特性に関する研究, 北海道大学学位論文, 1984.

(1992年9月21日受付)