

重錘落下実験によるPCはりの衝撃破壊挙動 に関する一考察

竹本憲介¹・圓林栄喜²・香月 智³・石川信隆⁴

¹学生会員 防衛大学校理工学研究科学生 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

²正会員 工博 防衛大学校研究員 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

³正会員 工博 防衛大学校助教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

⁴フェロー会員 工博 防衛大学校教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

本研究は、ボンドPCはりおよびアンボンドPCはりの衝撃破壊挙動を把握するため、まず静的載荷実験、繰り返し載荷および単一載荷の重錘落下衝突実験を行い、その破壊形態、重錘衝撃力、支点反力および変形性能について考察を行った。次に、重錘の初速度による運動量を力積に変換した荷重を入力することにより、簡易なはり要素モデルを用いた重錘落下衝突解析法を開発し、単一載荷衝突実験のシミュレーション解析を行ったものである。

Key Words: Weight dropping test, Failure behavior, Impact failure analysis, PC beam

1. 緒言

プレストレストコンクリート(PC)部材は、高耐力を有し短期施工が可能であるため、全国の急傾斜地の道路に数多くのPC落石覆工が設置されている。しかし、PC部材は一般に鉄筋コンクリート(RC)部材¹⁾に比べ変形性能つまりじん性に乏しいため、そのじん性向上策の必要性が指摘されている^{2), 3), 4)}。このためPC部材のじん性向上についていくつかの方法がこれまで提案されてきた。例えば、PC部材の圧縮側コンクリートを円形スパイラル筋で補強する方法^{5), 6)}やPC部材の引張側を鉄筋で補強するPRC (Prestressed Reinforced Concrete) 化^{7), 8)}が提案された。しかし、これらの方法は静的載荷の場合には顕著な有効性が認められたものの、衝撃載荷の場合には若干の有効性が認められたにすぎず、顕著な改善策とはならなかった。このため、別途PC部材のアンボンド化が提唱され、その動的じん性向上について高速載荷実験の観点から検討が行われた。その結果、アンボンドPCはりにはボンドPCはりに比べ約2倍の動的じん性があることが確認された^{9), 10)}。しかし、未だPC部材のアンボンド化の有効性について重錘落下衝突実験の観点から検討されていなかった。

そこで本研究では、まずPCはりのアンボンド化による動的じん性向上について、PCはり部材への重錘落下

衝突破壊実験によって検討を行った。すなわち、ボンドPCはりおよびアンボンドPCはりに対し静的載荷、繰り返し漸増衝突載荷および単一衝突載荷の3つの実験を行い、それらの破壊形態、荷重～変位関係などを調べ、アンボンドPCはりの重錘落下衝突実験による動的じん性向上の有効性について検討した。次に、簡易なはり要素を用いた衝撃破壊解析法を開発して実験結果をシミュレートし、本解析法の有効性についても検討した。つまり、重錘の初速度による運動量を力積に変換した荷重を入力して、簡易なはり要素を用いた衝撃応答解析法を開発し、重錘衝撃力～時間関係、変位～時間関係、重錘衝撃力～変位関係などを求め、実験結果との比較を詳細に行った。その際、衝突点において損傷を防止するためにポリプロピレン(EPP)の緩衝材を用いたが、その構成則が重錘衝撃力の算出に重要な要因であることを明らかにした。

2. 衝撃破壊実験

(1) 実験の概要

a) 落錘式衝突実験の概要

重錘落下衝突実験は、図-1に示すような防衛大学校内にある時計塔の内部に設置された落錘式衝撃実験装置を

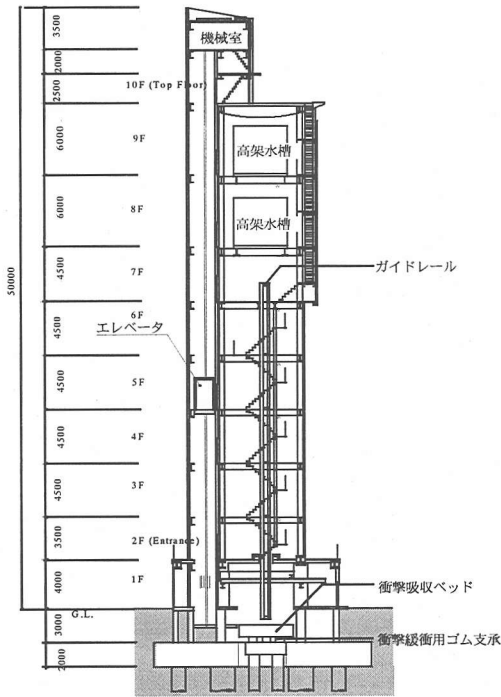


図-1 落錘式衝撃実験装置

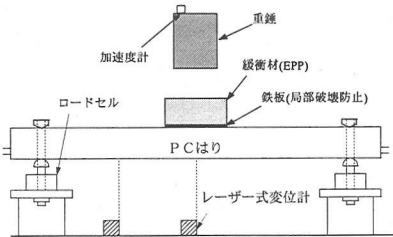
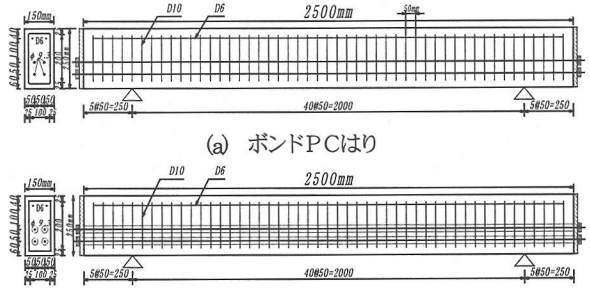


図-2 実験要領

用い、ガイドを通じて10kNの重錘を落下させてはりのスパン中央に衝突させた。衝突実験は、繰り返し載荷実験と単一載荷実験を行った。すなわち、表-1に示すように繰り返し載荷は、同一試験体に対して落下高さを徐々に上げながら破壊に至るまで載荷するものである。単一載荷は、繰り返し載荷で破壊した落下高さを基準に、それ以上の落下高さから破壊に至るまで供試体を個々に変えて載荷した。重錘の先端は平面で直径20cmの円形状であり、供試体は図-2に示すように支点部に支点反力測定用のロードセルを設置し、跳ね上がり防止用具ではりの上縁を固定した。また、はりの載荷点部にはポリプロピレン(EPP)の緩衝材(厚さ15cm、長さ40cm、幅15cm)を設置した。緩衝材は、はりに伝達される荷重を分散させ、局部破壊を防止して基本的にはりの耐力のみを算定するために用い、また念のためにEPPの下にさらに厚さ4.5mmの鉄板を敷いた。

表-1 実験ケース

載荷要領	供試体	落下高さ
静的	ボンドPCはり	0.01cm/秒
	アンボンドPCはり	
繰り返し載荷	ボンドPCはり1	50cm → 100cm
	ボンドPCはり2	5cm → 25cm → 50cm → 75cm
	アンボンドPCはり1	5cm → 25cm → 50cm → 100cm → 200cm
	アンボンドPCはり2	25cm → 50cm → 100cm → 125cm → 150cm
単一載荷	ボンドPCはり (3体)	75cm, 150cm, 200cm
	アンボンドPCはり (2体)	200cm, 250cm



(a) ボンドPCはり

(b) アンボンドPCはり

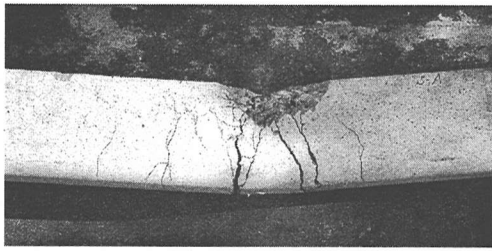
図-3 供試体寸法図

表-2 材料諸元

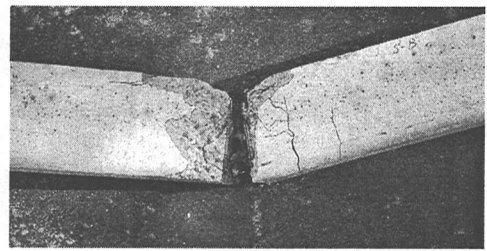
材料	項目	数値
全般	幅	15cm
	高さ	25cm
	長さ	250cm
	スパン	200cm
コンクリート	圧縮強度	49.4N/mm ²
	径	D10
スチール	間隔	5cm
	高さ	21cm
	幅	11cm
鉄筋	径(圧縮側)	D6
	降伏点	370N/mm ²
	引張強度	530N/mm ²
	破断時伸び	26.5%
PC鋼材	径(より線)	φ 9.3mm
	初期プレストリカ	66.6kN
	0.2%永久伸びに対する荷重	90.9kN
	引張荷重	98.7kN
	破断時伸び	7.5%

表-3 測定項目

計測項目	計測器材	諸元等
加速度	加速度計(重錘)	測定範囲: 500G 応答周波数: 10000Hz
支点反力	ロードセル	容量: 98.1kN
変位	レーザ式変位計	測定範囲: 300 ± 100mm 応答周波数: 915Hz



(a) ボンドPCはり
(変位 8cm : 破壊)



(b) アンボンドPCはり
(変位 17.5cm : 破壊)

写真-1 静的載荷時の破壊状態

	ボンドPCはり	アンボンドPCはり
静的載荷時	 P C 鋼材破断	 P C 鋼材破断
繰り返し載荷時	 P C 鋼材破断 (落下高さ 75cm)	 コンクリート圧壊 (落下高さ 150cm)
単一載荷時	 P C 鋼材破断 (落下高さ 150cm)	 P C 鋼材破断 (落下高さ 250cm)

図-4 破壊形態

なお、静的実験は、アムスラー試験機を用いてPCはりの中央点単一載荷を行った。

b) 供試体と実験ケース

供試体は、図-3 に示すようなボンドPCはりアンボンドPCはり（シースの中にグラウトを注入しない方式）の2種類を用意した。この供試体は、過去に行った一連の研究^{6), 10)}において、曲げ破壊先行で比較的じん性に富む基準断面を準用したもので、曲げ破壊させるためにせん断補強筋を50mmピッチで豊富に配置し、現象の複雑化を避けるため圧縮側の鉄筋は少なめにしている。また、両供試体とも供試体長2.5m、支点間距離2.0m、15cm×25cmの断面内にφ9.3mmのPC鋼より線を4本、D6圧縮鉄筋を2本有するものである。なお、供試体の初期プレストレス力はボンドPCはり、アンボンドPCはりともにフルプレストレス状態になるよう66.6kN/本を与えた。材料諸元を表-2に示す。

c) 計測項目

衝突実験時の計測項目は、表-3に示すように重錘加速度、支点反力、はり中央点直下および1/4点変位である。計測要領は、重錘加速度については重錘上部に加速度計

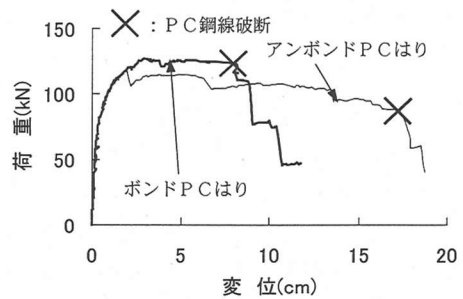


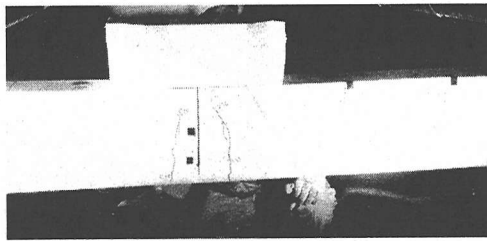
図-5 静的載荷時の荷重～変位関係

を設置し、支点反力については支点部に設置したロードセル、変位についてはレーザー式変位計によりそれぞれ計測した。

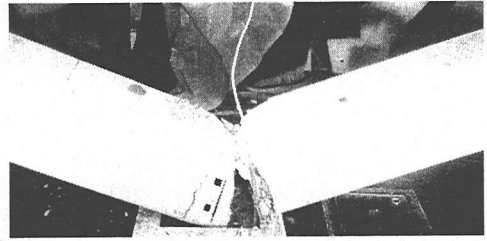
(2) 実験結果と考察

a) 静的載荷実験

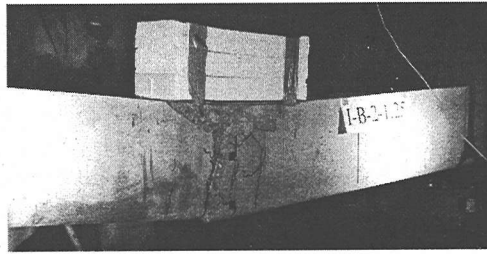
写真-1に静的実験結果における各供試体の破壊性状を示す。ボンドPCはりおよびアンボンドPCはりのいずれの場合もPC鋼材が破断して破壊した。そのコンクリ



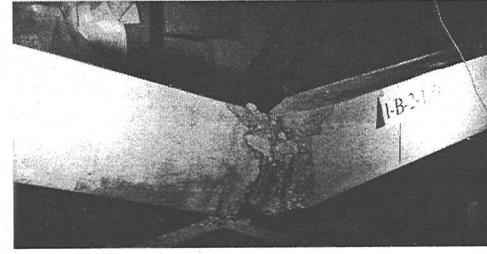
(a) ボンドPCはり
(落下高さ 50cm : 未破壊)



(b) ボンドPCはり
(落下高さ 75cm : 破壊)

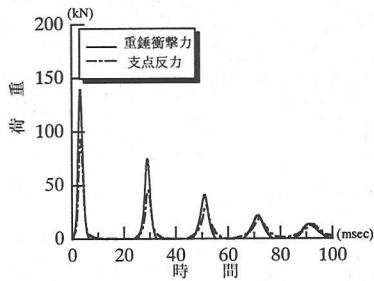


(c) アンボンドPCはり
(落下高さ 125cm : 未破壊)

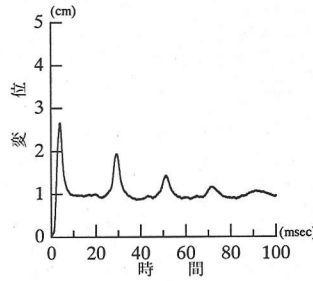


(d) アンボンドPCはり
(落下高さ 150cm : 破壊)

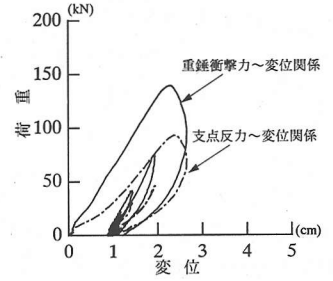
写真-2 繰り返し衝突実験時の破壊状態



(a) 重錘衝撃力, 支点反力～時間関係



(b) 変位～時間関係



(c) 重錘衝撃力, 支点反力～変位関係

図-6 繰り返し衝突実験における落下高さ 50cm のときの荷重, 変位の応答
(ボンドPCはり)

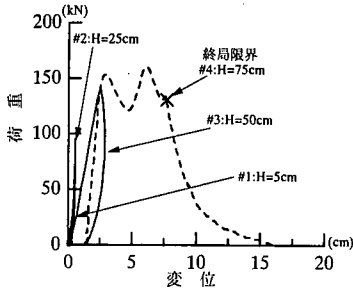
一ト部の剥落状況を見ると、ボンドPCはりは載荷点から左右に 50cm～70cm の範囲で 5～7 本のひび割れが生じ、中央の亀裂とともに載荷圧縮部の剥離も大きいのにに対し、アンボンドPCはりは、載荷部直下の亀裂が卓越して大きく他のひび割れは 2 本とその本数も少なく、非常にシャープに破断している。これはPC鋼材とコンクリートの付着がないため、ひび割れを分散させる効果がないためである。以上の結果を図-4 の上段に模式図によって示す。

図-5 に静的載荷時の荷重～変位関係を示す。ボンドPCはりもアンボンドPCはりも完全弾塑性型の挙動を示すが、最大耐力はボンドPCはりの方がやや大きく約 125kN で、アンボンドPCはりの方は約 110kN である。なお、アンボンドPCはりのピーク後すぐに荷重が下が

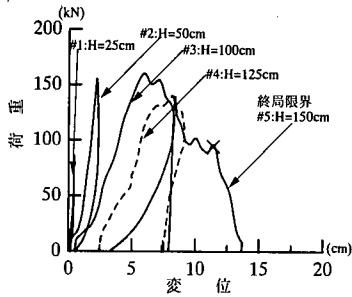
るのはコンクリートの引張縁にひび割れが生じることによるものである。一方、ボンドPCはりの終局限界変位は 8cm、またアンボンドPCはりの終局変位は 17.5cm で、この変位でそれぞれPC鋼材が破断する。この終局限界変位に至るまでの吸収エネルギーは、ボンドタイプが 8.6kN・m、アンボンドタイプが 18.9kN・m であり、アンボンドPCはりの吸収エネルギー能が約 2.1 倍となっている¹⁰⁾。

b) 繰り返し載荷実験

写真-2 には表-1 に示した手順の繰り返し実験における載荷後の供試体の破壊性状を示す。写真-2(a), (b) にはボンドPCはりの落下高さ 50cm (未破壊) と落下高さ 75cm (破壊) のものを示す。本研究では、①PC鋼材の破断または②圧縮側コンクリートの圧壊による耐力低下¹⁰⁾ の



(a) ボンドPCはり



(b) アンボンドPCはり

図7 繰り返し衝突実験のヒステリシス曲線

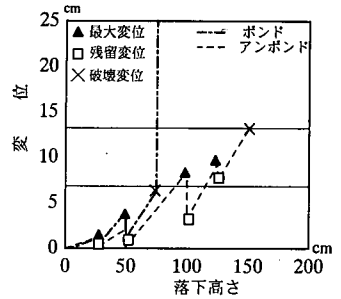


図8 繰り返し衝突実験時の変位の履歴

いずれか一方の成立時点をもって終局限界とするものとしたが、写真-2(a)の写真は、この定義に従って未だ破壊に至っていないものであり、写真-2(b)は破壊したと判定したものである。写真より明らかなように落下高さ50cmでは、損傷は比較的軽微でPC鋼材は破断せず、圧縮側コンクリートについても耐力を残存している。一方、落下高さ75cmではPC鋼線が完全に破断し破壊している。写真-2(c), (d)には同様にアンボンドPCはりの結果を示し、これらと写真-2(b)を比較すると、アンボンドPCはりの方が約2倍の高い落下高さで破壊していることがわかる。つまり、アンボンドPCはりは落下高さ125cmで大きな亀裂と広い領域でのコンクリートの剥離が確認できるが、アンボンド特有の除荷に伴うPC鋼材の復元力によってはいずれも全体が復元し残留変位もあまりない。しかし、落下高さ150cmになるとPC鋼線の破断なしに圧縮部コンクリートの大剥離によって破壊に至っている。以上の結果を図-4の中段に模式図によって示す。

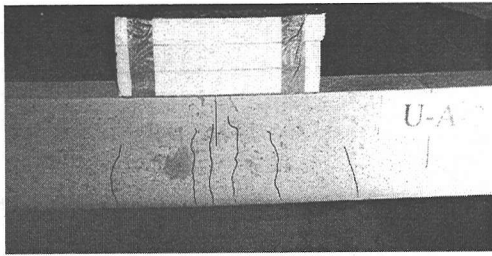
図-6に繰り返し衝突実験におけるボンドPCはりの落下高さ50cm(未破壊)とした場合の重錘衝撃力、支点反力および変位の時刻歴応答と重錘衝撃力および支点反力～変位関係を示す。図-6(a)より、この場合はリバウンドにより5回も再衝突していることがわかる。図中の実線は重錘衝撃力(重錘質量×加速度)を、破線は支点反力(2支点の合計)を示している。この2つの荷重には、時間的な応答としては良く似た応答を示すが、そのピーク値は支点反力の方が若干小さくなっている。

一方、図-6(b)の変位～時間関係を見ると第1回目に最大変位が2.5cmとなり、残留変位が1cmとなっている。第2撃目以降の応答では極大値が漸次低下する繰り返しであり、残留変位の増加は見られない。図-6(a)と図-6(b)の時間軸を同調させると、図-6(c)の荷重～変位関係が得られる。これより、重錘衝撃力の最大値は140kNに対し支点反力の最大値は95kNと約2/3に小さくなるが、いずれの場合も第1象限内にヒステリシスループを形成しており、特に第1回目のものが著しく大きく、PCはりに大きなダメージを与えていることがわかる。

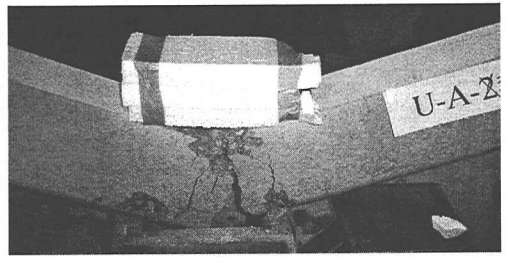
図-7にボンドタイプとアンボンドタイプの繰り返し衝突実験によるヒステリシス曲線を示す。これは、各実験のリバウンドによる再衝突のループを除いて第1回目のループのみを落下高さの増加に伴って追跡したものである。図-7(a)のボンドタイプでは、まず第1回目(落下高さH=5cm)および第2回目(H=25cm)の衝突時には、同一経路をたどって復帰しており、この落下高さまではほぼ弾性応答であることがわかる。第3回目(H=50cm)では、往路と復路のループが重ならず1cmの残留変位が生じている。第4回目(H=75cm)では、荷重約130kNを中心として振動を伴って変位が増加し続け約6.5cmのところで耐力が失われている。つまり、この時点でPC鋼線が破断したと思われる。一方、図-7(b)のアンボンドPCはりにおいても落下高さ25cmでは弾性応答であるが、50cmで0.5cmの残留変位を生じている。さらに落下高さ100cm、125cmでもやはり弾塑性状態になるが破壊せず復元しており、その残留変位は2cmと7.5cmとなる。最後の落下高さ150cmでは最大変位が12cmとなり、この時点でコンクリートが圧壊して終局限界変位となっている。

図-8には、繰り返し衝突実験での最大変位および残留変位の履歴と落下高さとの関係を示す。ボンドPCはりの落下高さ25cmでの最大変位は2cmであるが、残留変位はなく、はり内部の損傷は小さい。落下高さを50cmに増やすと最大変位は3.4cmとなり残留変位が1.5cmとなり、はり内部に損傷が蓄積されるが、変位の弾性的復元能力が2cmであることもわかる。その後75cmの落下高さで破壊しその終局限界変位は6.5cmとなる。一方、アンボンドPCはりでも落下高さ50cmまではほぼ同じ履歴をたどる。落下高さ100cmにおいて最大変位は7.8cmとなり、ボンドPCはりの終局限界変位を超える応答値を示すが、破壊せず残留変位3cmまで復元しその弾性的復元能力が4.8cmとボンドPCはりの約2倍以上有する。その後落下高さの増加に伴って最大変位と残留変位がともに増加するが、落下高さ150cmで12cmの終局限界変位を迎える。

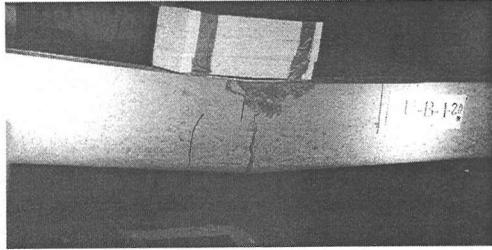
以上より、図-8の履歴から判断される終局限界変位は、



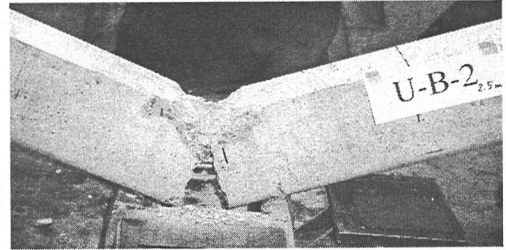
(a) ボンドPCはり
(落下高 75cm : 未破壊)



(b) ボンドPCはり
(落下高 150cm : 破壊)

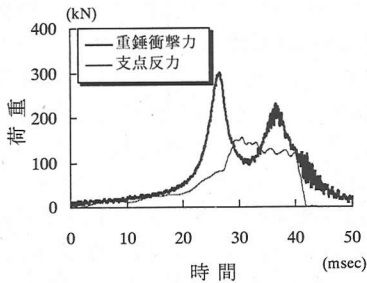


(c) アンボンドPCはり
(落下高 200cm : 未破壊)

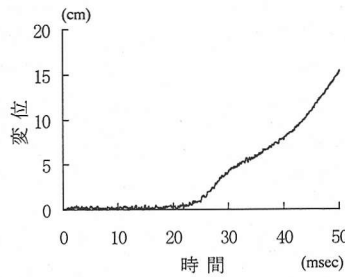


(d) アンボンドPCはり
(落下高 250cm : 破壊)

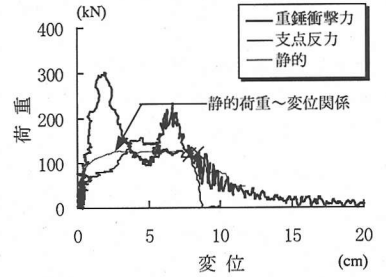
写真-3 単一載荷時の破壊状態



(a) 重錘衝撃力～時間関係



(b) 変位～時間関係



(c) 重錘衝撃力, 支点反力～変位関係

図-9 ボンドPCはりの単一衝突実験の荷重, 変位応答 (落下高さ 150cm)

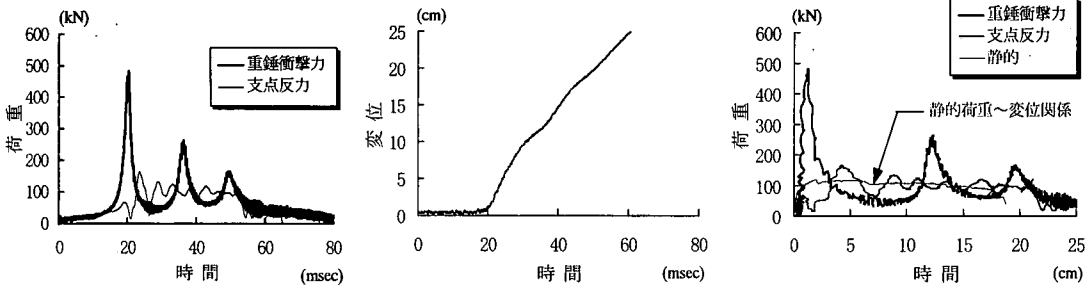
ボンドPCはりが6.5cm, アンボンドPCはりが12cmと容易に判定でき, 重錘落下繰り返し衝突実験によってもアンボンドPCはりの方が約2倍のじん性 (ductility) があることが確認された。

c) 単一載荷実験

写真-3には単一載荷による破壊性状を写真-2と同様な方法で比較できるように示している。単一載荷では, その落下高さに至る前のダメージの蓄積がないので, 写真-3(a)に示した落下高さ 75cm では, 繰り返し載荷の写真-2(b) (落下高さ 75cm で破壊) のようには破壊していない。しかし, 落下高さ 150cm ではPC鋼材が破断しはり全体が破壊した。写真-3(c)のアンボンドPCはりは, 落下高さ 200cm で中央に亀裂を生じているが, 未だ完全に破壊していない。つまり, 繰り返し載荷時には写真-2(d)のように落下高さ 150cm で破壊したが, 単一載荷では

200cmでも破壊していない。写真-3(d)は落下高さ 250cmの場合で, PC鋼材が破断してはりが完全に破壊しており, 写真-2(d)の繰り返し載荷の落下高さ 150cmの場合よりも約100cm高い。この場合, はり軸方向のひび割れの分布がほとんどなく, 中央部の亀裂のみによってシャープに破壊することが注目される。以上の結果を図-4の下端に模式図によって示す。

図-9に, ボンドPCはりに対する単一衝突実験の荷重および変位の応答 (落下高さ 150cm で破壊) を示す。図-9(a)の荷重の時刻歴応答を見ると, 重錘衝撃力が衝突直後に鋭い波形の荷重を示すのに対し, 支点反力の方はやや緩やかな応答を示している。図-9(b)の変位応答では, 変位が衝突直後よりやや遅れた 50ms から単調に増加しており, はりが破壊に至ったことがわかる。この変位応答の開始時間が遅れた理由としては, 重錘の衝突直後に



(a) 重錘衝撃力～時間関係 (b) 変位～時間関係 (c) 重錘衝撃力, 支点反力～変位関係

図-10 アンボンドPCはりの単一衝突実験の荷重, 変位応答 (落下高さ 250cm)

緩衝材の変形のみが先行して現れ、緩衝材が十分に変形した後はりの変位が動き始めたためと思われる。図-9(c)には荷重～変位曲線を示すが、重錘衝撃力は慣性力の影響により静的に比べ過大な荷重を生じ、逆に支点反力は過小な荷重となることがわかる。

次に、図-10 はアンボンドPCはりに落下高さ 250cm で単一衝突させた際の荷重および変位の応答を示したものである。この場合もボンドPCはりと同様に、重錘衝撃力は支点反力よりも大きな荷重を示し、振動の影響が大きく現れている。この図-9, 10 を通じて重錘衝撃力または支点反力の荷重～変位関係が静的実験で得られるものと著しく異なる形状となっている。これは、重錘衝撃力が慣性力による影響を受けるためと緩衝材として用いた EPP の変形による影響のためである。また支点反力は明らかに載荷点から離れた位置での計測であるために、はり内部で伝達された曲げまたはせん断変形振動の影響を受けるためと思われる。ちなみに、これらの影響はたとえ緩衝材を設置しない実験を行っても衝突点局部の変形が同様な影響を与えらると思われる。

3. 衝撃破壊解析

(1) 解析の基本式

a) 運動方程式

本研究では、前述した重錘落下衝突実験を図-11のような軸力要素とはり要素による離散化モデルで表すものとする。このシステム全体の運動方程式は、変位ベクトルと外力ベクトルの既知の部分と未知の部分に分けて次のように表される。

$$\begin{bmatrix} m_{kk} & m_{ku} \\ m_{ku} & m_{uu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_k \\ \ddot{u}_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{kk} & D_{ku} \\ D_{ku} & D_{uu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_k \\ \dot{u}_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{kk} & K_{ku} \\ K_{ku} & K_{uu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_k \\ u_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_u \\ F_k \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 \ddot{u} , \dot{u} , u : それぞれ節点の加速度, 速度, 変位ベクトル, F : 節点外力ベクトル, m : 質量マトリクス, D : 減衰マトリクス, K : 剛性マトリクスであり、添字 k は、known の略で既知の量を示し、添字 u は、unknown の略で

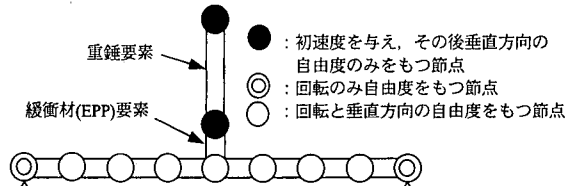


図-11 重錘落下衝突実験の解析モデル

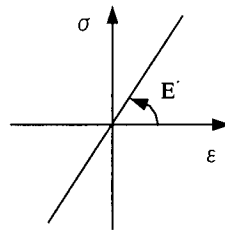


図-12 重錘要素

未知の量を示す。すなわち、 F_u は未知であり、 \ddot{u}_u , \dot{u}_u , u_u は未知数である。一方、 F_k は既知であり、また既知の \ddot{u}_k , \dot{u}_k , u_k が境界条件などによって与えられるので、時刻 $t + \Delta t$ における未知の \ddot{u}_u , \dot{u}_u , u_u は Newmark β 法の積分関係によって次式のように求められる。

$$u_{u,t+\Delta t} = u_u + \Delta t \dot{u}_u + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_u + \beta_N \Delta t^2 (\ddot{u}_{u,t+\Delta t} - \ddot{u}_u) \quad (2a)$$

$$\dot{u}_{u,t+\Delta t} = \dot{u}_u + \frac{\Delta t}{2} (\ddot{u}_{u,t+\Delta t} + \ddot{u}_u) \quad (2b)$$

$$\begin{aligned} \ddot{u}_{u,t+\Delta t} = & [m_{uu} + \frac{\Delta t}{2} D_{uu} + \beta_N \Delta t^2 K_{uu}]^{-1} [F_{u,t+\Delta t} - m_{kk} \ddot{u}_{k,t+\Delta t} - D_{kk} \dot{u}_{k,t+\Delta t} \\ & - D_{ku} (\dot{u}_u + \frac{\Delta t}{2} \ddot{u}_u) - K_{ku} u_{k,t+\Delta t} \\ & - K_{ku} \{u_u + \Delta t \dot{u}_u + (\frac{1}{2} - \beta_N) \Delta t^2 \ddot{u}_u\}] \end{aligned} \quad (2c)$$

ただし、添字 t は時刻を、 Δt は時間増分を表し、 β_N は Newmark β 法のコントロール定数で通常 $1/4 \sim 1/6$ が用いられる。

ここで、構成則が非線形の場合に式(1)は変位、速度および加速度に関して微小増分間の式に変換され、剛性マトリクスは増分間の接線剛性マトリクスを用いるものとする。

表-4 重錘のデータ

断面積 A(cm ²)	350
長さ L(cm)	120
密度 ρ(kg/cm ³)	1.7×10 ³
ヤング率 E(N/cm ²)	2.05×10 ⁷

表-5 EPP 緩衝材のデータ

断面積 A(cm ²)	600
長さ L(cm)	15
密度 ρ(kg/cm ³)	0.566×10 ³

る。
よって、 $\ddot{u}_u, \dot{u}_u, u_u$ が既知となるので未知の外力 F_u は次式によって求められる。

$$F_u = m_{uk}\ddot{u}_k + m_{uu}\ddot{u}_u + D_{uk}\dot{u}_k + D_{uu}\dot{u}_u + K_{uk}u_k + K_{uu}u_u \quad (3)$$

b) 重錘の構成則

重錘に相当する部分は軸力要素とし、構成則は図-12 に示すように弾性の応力(σ)～ひずみ(ε) 関係を用いた。

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4)$$

具体的には、前述した実験に合わせて表-4 に示す入力値を用いた。

c) 緩衝材の構成則

緩衝材に相当する部分は、弾塑性軸力要素とする。ただし、実験では緩衝材として EPP(Expanded Polypropylene) を用いたので、その静的および高速荷重(荷重速度: 4m/sec) による荷重～変位関係は図-13 に示すようになる。図-13 より高速荷重では静的荷重に比べ約 2~3 倍の荷重が生じていることがわかる。本研究では、これを図-14 に示すように線形化した応力(σ)～ひずみ(ε) 関係にモデル化するものとした。すなわち、その構成則は次式のようになる。

$$\sigma = \bar{\sigma} + \bar{E}\Delta\varepsilon \quad (5)$$

ここで、 $\bar{\sigma}$: 前段階の応力、 \bar{E} : 増分間の接線ヤング係数、 $\Delta\varepsilon$: 増分ひずみ。なお、この要素では引張側の応力は生じないものとしている。その入力値を表-5 に示す。

d) はり要素の剛性マトリクス

図-15(a) に示す両端に曲げモーメントが働く要素の端回転角ベクトル q_i と図-15(b) の節点変位ベクトル u_i との変形適合条件は次式のように表される。

$$\begin{bmatrix} q_{Li} \\ q_{Ri} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\ell_i} & -1.0 & \frac{1}{\ell_i} & 0 \\ \frac{1}{\ell_i} & 0 & -\frac{1}{\ell_i} & 1.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{LY} \\ u_{L\theta} \\ u_{RY} \\ u_{R\theta} \end{bmatrix} \quad (6a)$$

すなわち、

$$q_i = B_i u_i \quad (6b)$$

よって、変形適合マトリクス B_i は次式となる。

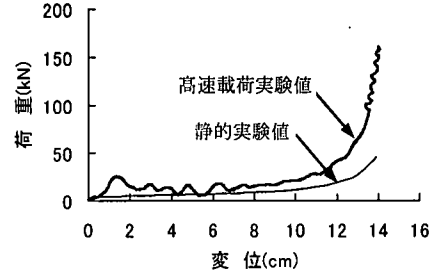


図-13 緩衝材(EPP)の荷重～変位関係

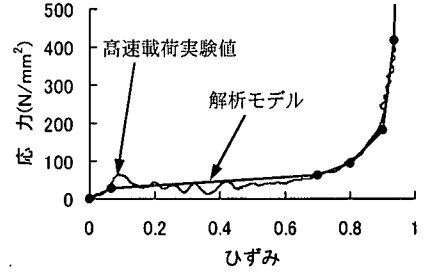
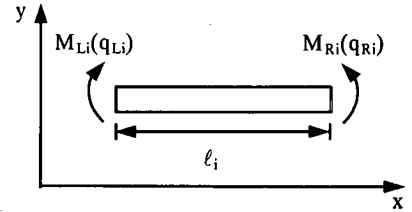
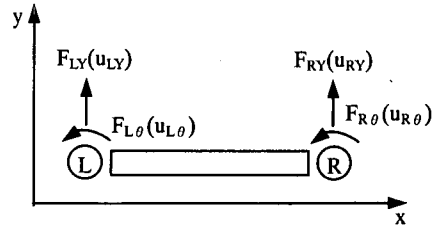


図-14 緩衝材(EPP)の応力～ひずみ関係



(a) 要素端曲げモーメント(M)と端回転角(q)



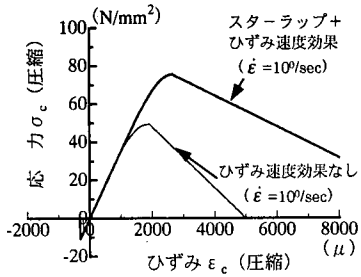
(b) 節点外力(F)と変位(u)

図-15 はりモデル

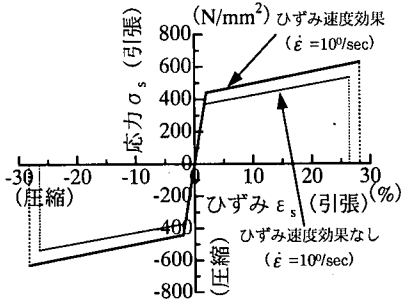
$$B_i = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\ell_i} & -1.0 & \frac{1}{\ell_i} & 0 \\ \frac{1}{\ell_i} & 0 & -\frac{1}{\ell_i} & 1.0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

また、節点外力 F_{ki} (剛性抵抗力) と端曲げモーメント M_i との関係は仮想仕事の原理によって次式となる。

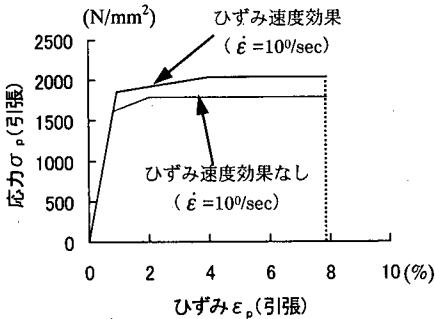
$$\begin{bmatrix} F_{LY} \\ F_{L\theta} \\ F_{RY} \\ F_{R\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\ell_i} & \frac{1}{\ell_i} \\ -1.0 & 0 \\ \frac{1}{\ell_i} & -\frac{1}{\ell_i} \\ 0 & 1.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{Li} \\ M_{Ri} \end{bmatrix} \quad (8a)$$



(a) ひずみ速度効果とスターラップの拘束効果を同時に考慮したコンクリートの応力～ひずみ関係



(b) ひずみ速度効果を考慮した鉄筋の応力～ひずみ関係



(c) ひずみ速度効果を考慮したPC鋼材の応力～ひずみ関係

図-16 各材料の応力～ひずみ関係

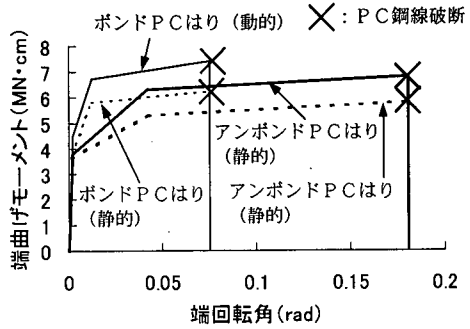


図-17 ボンドPCはりアンボンドPCはりの要素の曲げモーメント～端回転角関係

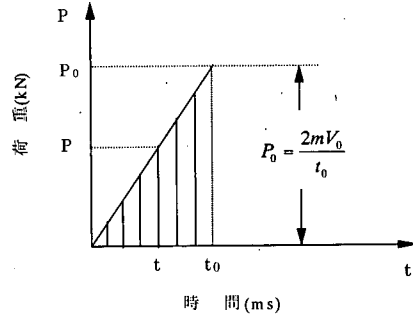


図-18 変換荷重～時間関係

ここで、 $E_i I_i$ ははり要素の換算曲げ剛性で断面分割法を用いて曲げモーメント～曲率関係の勾配から求められる。 l_i ははり要素の長さ。

次に、弾塑性範囲における端曲げモーメント～端回転角の関係については、図-3の供試体断面に対し図-16のような各材料の応力～ひずみ関係を用いて断面分割法¹⁰⁾により曲げモーメント～曲率関係を求めたうえで、図-17のように3段階の弾塑性モデルとし、この曲率に有効断面高さの2/3の高さを乗ずること(塑性ヒンジ長)により端回転角 q に変換した。また、動的な断面分割法では、PC鋼材、鉄筋、コンクリートの各材料に対して、図-16に示したひずみ速度効果および拘束効果を考慮した構成則を用いた^{11), 12)}。さらに、アンボンドPCはりについては、文献10)で行った滑りを考慮したはり解析を参考にボンドPCはりの完全付着のひずみに低減率を乗ずる断面分割法を導入した⁵⁾。

よって、弾塑性領域では次式のように表される。

$$\Delta M_i = k_c \Delta q_i \quad (9)$$

$$\Delta M_i = k_{ep} \Delta q_i \quad (11a)$$

ただし、 $\Delta M_i, \Delta q_i$ は、端の曲げモーメント増分ベクトル、端回転角増分ベクトルを示し、 k_c は次値となる。

$$k_{ep} = k_c - k_c N_s [N_s^T K_c N_s + H_s]^1 N_s^T k_c \quad (11b)$$

ここで、 N_s, H_s は次式のような線形化降伏条件式の中で、アクティブになっているものの係数マトリクス、またはベクトルを表す。

$$k_c = \begin{bmatrix} \frac{4E_i I_i}{l_i} & -\frac{2E_i I_i}{l_i} \\ -\frac{2E_i I_i}{l_i} & \frac{4E_i I_i}{l_i} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\psi = N^T M - H \lambda - r \leq 0 \quad (12)$$

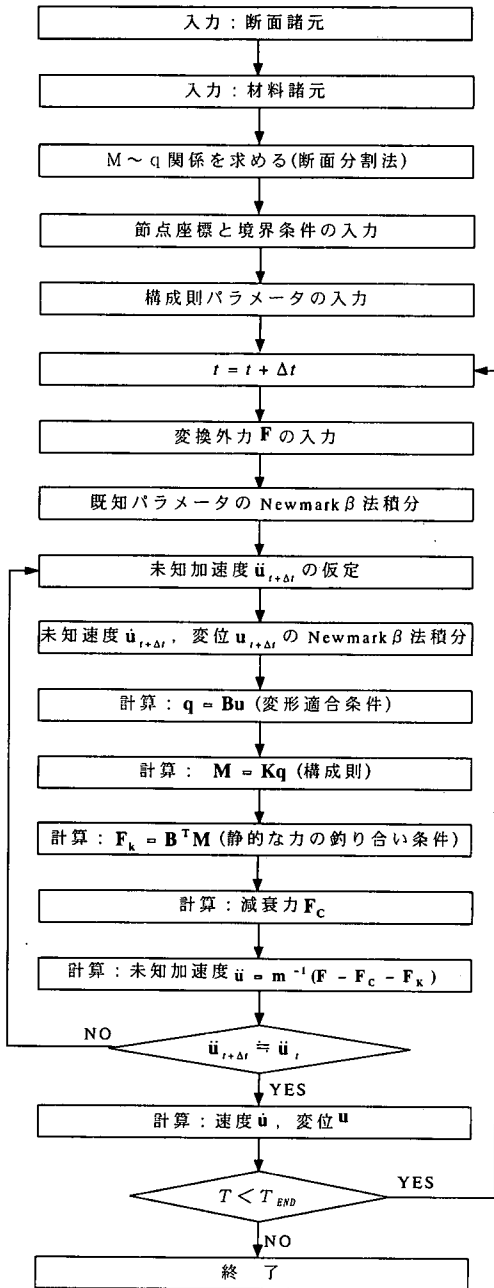
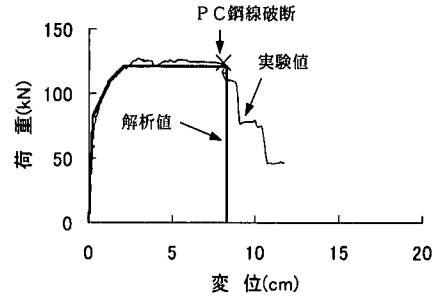


図-19 解析手順

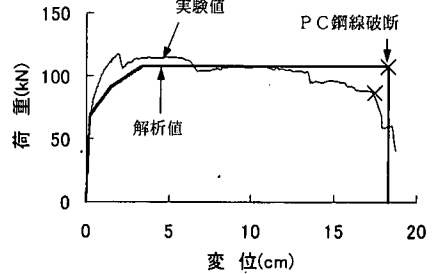
ここで、 ψ : 線形化降伏関数ベクトル、 \mathbf{N} : 線形化降伏条件式の法線方向マトリクス、 \mathbf{H} : 硬化係数、 λ : 塑性乗数ベクトル、 \mathbf{r} : 塑性容量ベクトルである。

式(10)は式(11b)の一部として表されることを考慮すると、要素の接線剛性マトリクスは次式として表される。

$$\mathbf{K}_t = \mathbf{B}^T \mathbf{k}_{epi} \mathbf{B}_i \quad (13)$$



(a) ボンドPCはり



(b) アンボンドPCはり

図-20 静的載荷実験における荷重～変位関係

e) 入力荷重

重錘落下衝突実験において重錘初速度 V_0 は、次式のように与えられる。

$$V_0 = \sqrt{2gH} \quad (14)$$

ここで、 g : 重力加速度、 H : 重錘の落下高さ。

この重錘初速度による運動量 mV_0 を力積に変換すると、図-18に示すように $P_0 t_0 / 2$ として表される。よって、初速度 V_0 の代わりに次式のような外力 P を入力荷重として与えることとした。

$$P = \frac{P_0}{t_0} t \quad (0 \leq t \leq t_0) \quad (15)$$

ただし、 $P_0 = 2mV_0/t_0$ 、 m : 重錘の質量、 $t_0 (= 10^{-2} \text{ms})$: 外力の作用時間。

(2) 計算手順

以上の基本式に基づいて、解析はNewmark β 法を用いて行うこととした。解析の流れを図-19に示す。

(3) 解析結果と考察

a) 静的載荷の場合

図-20(a)に静的解析で得られたボンドPCはりの荷重～変位関係を示す。まず荷重は変位2.6cmでピーク値を迎えた後その耐力を維持し、変位8cmでPC鋼線の破断によって耐力が失われている。これを実験値と比較すると、解析値はピーク値付近および破断点変位も良く実験値をシミュレートしていることがわかる。図-20(b)のア

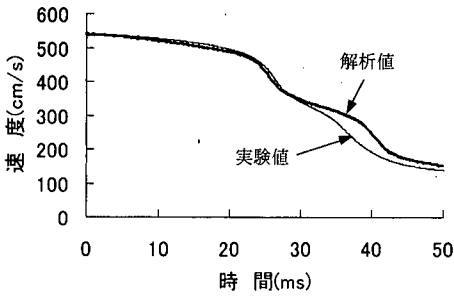


図-21 ボンドPCはりの重錘の速度～時間関係

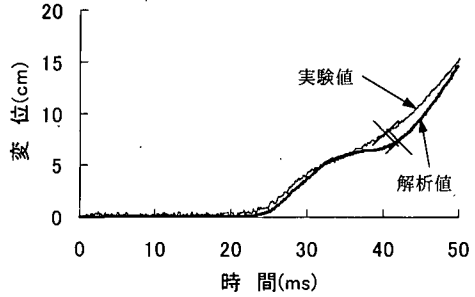


図-22 ボンドPCはりの载荷点下部変位～時間関係

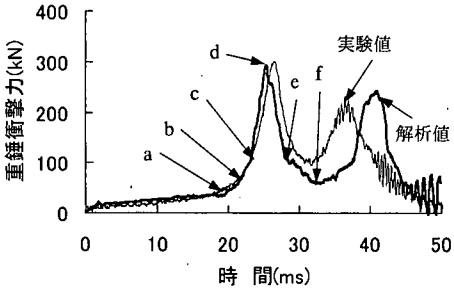


図-23 ボンドPCはりの重錘衝撃力～時間関係

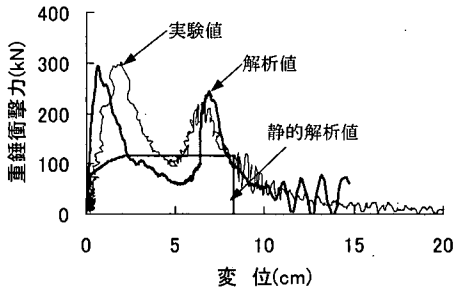


図-24 ボンドPCはりの重錘衝撃力～载荷点下部変位関係

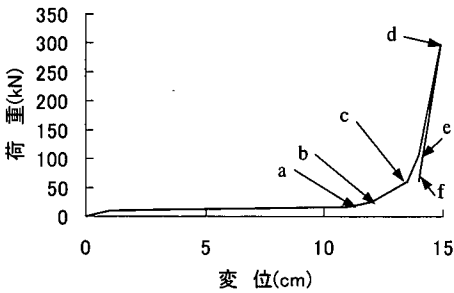


図-25 緩衝材要素の応答経過

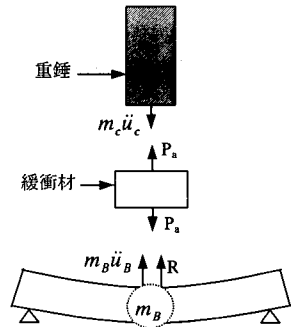


図-26 緩衝材の力の釣り合い

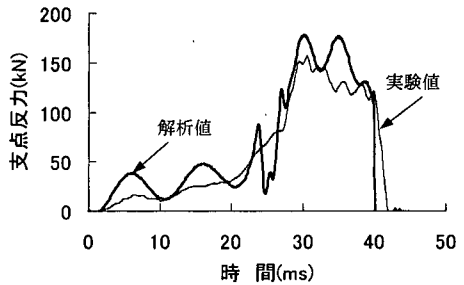


図-27 ボンドPCはりの支点反力～時間関係

ンボンドPCはりの場合も同様にほぼ良く一致しているが、PC鋼材の破断点変位がやや実験値より小さい。

b) 単一载荷 (ボンドPCはり) の場合

図-21 に重錘落下衝突実験および解析で得られた重錘の速度～時間関係を示す。解析値は全般的に実験値を良くシミュレートしている。まず、重錘は初速度 542cm/s でありに衝突を開始し 25ms までにはほぼその速度を保つが、その後急に速度が低下する。この 25ms までは EPP が初期の圧縮変形をしている状態であり、重錘の速度を徐々に低下させている。25ms で急に低下した速度は 42ms で再度低下しその後一定の速度で低下している。これは、42ms でありが破断し抵抗力を発揮しなくなったためである。

図-22 に解析と実験のはりの载荷点下部変位～時間関係を示す。この場合も解析値と実験値とはほぼ良く一致

している。すなわち、25ms までは EPP の抵抗力が小さいためほとんど変位が生じていないが、25ms 以降は単調に変位は増加し、42ms で PC 鋼材の破断に対応する破壊が表れる。

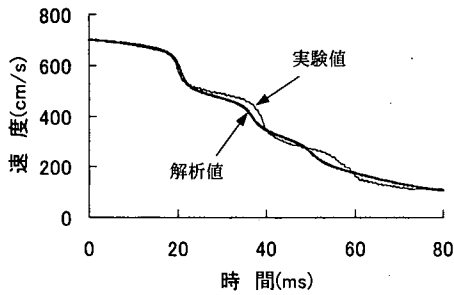


図-28 アンボンドPCはりの重錘速度～時間関係

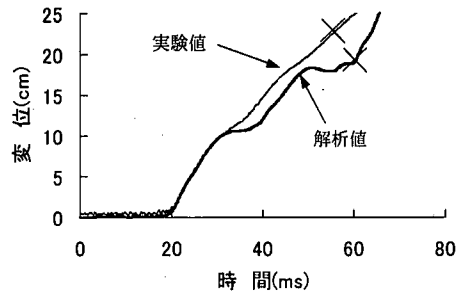


図-29 アンボンドPCはりの荷重点下部変位～時間関係

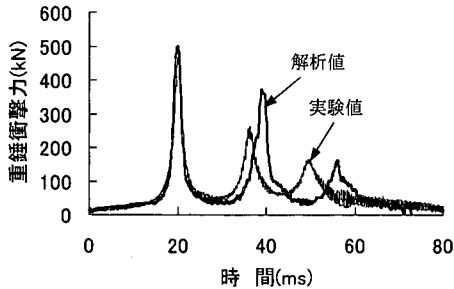


図-30 アンボンドPCはりの重錘衝撃力～時間関係

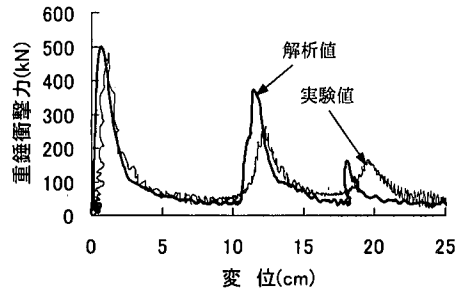


図-31 アンボンドPCはりの重錘衝撃力～荷重点下部変位関係

図-23に重錘衝撃力 ($m_h \ddot{u}$) と時間の関係を示す。解析値も実験値も20msを境に急激に重錘衝撃力が増加し、実験値では26ms、解析では25msでピーク値の300kNに達している。その後、急激に低下した重錘は再度緩やかに上昇して、実験では37.5ms、解析では42msで2つ目の小さなピーク値を迎えている。この図-22と23の2つのグラフから、はりの重錘落下実験に対する荷重～変位関係を描くと図-24のようになる。解析値は、実験値よりも衝突直後の荷重の立ち上がりが早いと全体的によくシミュレートしている。参考までに、図-20(a)のはりの静的抵抗力～変位曲線を図-24に併記したが、重錘衝撃力～変位曲線とは全く異なっており、ピーク値だけを比べると、衝撃時には耐力が静的の約2.5倍にも達している。そこで、図-24の変位2.5cm未満の第1ピークに至る重錘衝撃力の時間経過点を図-23のa～f点に求めて、この間の緩衝材の抵抗力～変形曲線をプロットすると図-25のようになり、図-13(または図-14)に極めて良く一致している。すなわち、この緩衝材の構成則の非線形な形状が、そのまま図-23や図-24の重錘衝撃力の立ち上がり特性に転写されていることがわかる。つまり局部緩衝材の構成則が重錘衝撃力に著しく重要な影響を及ぼしていることがわかる。これは、図-26に示す重錘～緩衝材～はりの動的な力の釣り合い関係から当然のことと考えられる。

次に、図-27に実験と解析によって得られた支点反力～時間関係を示す。解析による支点反力は荷重開始後徐々に増加し $t=23ms$ で約80kNになっている。その後、中央

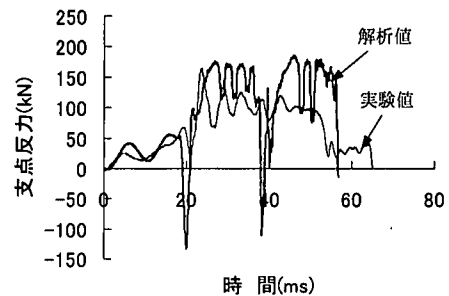


図-32 アンボンドPCはりの支点反力～時間関係

点での重錘衝撃力がピークを迎える $t=25ms$ 付近で、支点反力はいったん急激に荷重が低下するが、再び175kNに増加して35msまでその反力を維持する。この時の実験値は約160kNであり、解析値もこの値よりやや大きいながらもほぼ追従していることがわかる。

c) 単一載荷(アンボンドPCはり)の場合

図-28にアンボンドPCはりの重錘速度～時間関係の実験値と解析値を示す。この場合も解析値は実験値を良くシミュレートしていることがわかる。すなわち、重錘は初速度700cm/sではりに衝突を開始し、20msまではほぼその速度を保つが、その後徐々に速度が低下し始める。つまり20msまではEPPが初期の圧縮変形をしている状態であり、重錘速度を低下させる抵抗力を発揮していない状態である。その後、重錘の速度変化は小さくなり、38.5msで再度急に減速してはりに衝突する。この減速は

40ms～50msでも同様に生じており、55ms以降は減速度がほぼ一定となる。これは、55msではりが破断し抵抗力を発揮しなくなるためである。

図-29にはアンボンドPCはりの載荷点下部変位～時間関係を示す。t=20msまではEPPの抵抗力が小さいためほとんど変位が生じていないが、20ms以降は単調に変位は増加し55msでPC鋼材が破断している。この破断点の解析値は実験値に比べると若干遅れている。

図-30にアンボンドPCはりの重錘衝撃力($m\ddot{u}_c$)と時間の関係を示す。解析値も実験値も20msを境に急激に重錘衝撃力が増加し、20msでピーク値の500kNに達している。その後、急激に低下した重錘は再度緩やかに上昇して2回目のピーク値の380kNに達する。その後実験では50ms、解析では57msで3回目の小さなピーク値を迎える。この図-29と30の2つのグラフから時間軸を同調させて荷重～変位関係を描くと図-31のようになり、解析値は実験値をほぼ良くシミュレートしていることがわかる。アンボンドPCはりの場合もボンドPCはりと同様に局部緩衝材の構成則を忠実に追従することが、重錘衝撃力を良くシミュレートできるポイントであることがわかる。

また、図-32に実験と解析によって得られた支点反力～時間関係を示す。支点反力は、ボンドPCはりと同様に荷重開始後徐々に約50kNまで増加するが、中央点での重錘衝撃力がピークを迎えるt=20ms付近で、解析はいったん急激に荷重が低下して再び180kNに増加する。その後、重錘衝撃力がさらにピークを迎えるt=38.5ms付近で再度急激に荷重が低下するが、概ね185kNを中心に振動しており、この間の解析値は実験値よりやや大きな値を示している。

4. 結 言

本研究は、まずボンドPCはりおよびアンボンドPCはりの静的載荷実験および重錘落下衝突実験を行い、その破壊挙動について実験的に検討した。次に重錘落下衝突解析法を開発し、実験結果のシミュレートを行った。本研究で得られた成果を要約すると以下ようになる。

- (1)静的実験の終局変位は、ボンドPCはりの8cmに対し、アンボンドPCはりでは18cmと大きなじん性を示した。また終局限界変位に至るまでの吸収エネルギーは、ボンドタイプが8.6kN・m、アンボンドタイプが18.9kN・mであり、アンボンドPCはりの静的吸収エネルギーはボンドPCはりに比べ約2.1倍大きくなった。
- (2)繰り返し衝突載荷における破壊落下高さがボンドPCはりの75cmに対し、アンボンドPCはりでは150cmであり、一方の単一衝突載荷ではボンドPCはりの150cmに対し、アンボンドPCはりでは250cmとなっ

た。これより、重錘落下衝突実験においてもアンボンドPCはりの方がボンドPCはりに比べ約2倍のじん性があることが確認された。

- (3)繰り返し衝突実験において非破壊応答時の最大変位と残留変位との差(弾性的復元能力)を比べると、ボンドPCはりが2cmであるのに対し、アンボンドPCはりは4.8cmとこの場合もアンボンドPCはりが粘り強いことが認められた。
- (4)衝突実験の重錘衝突荷重や支点反力の荷重～変位関係に緩衝材の局部変形応答や慣性力の影響が大きく現れるため、静的載荷時の場合とは極めて異なった曲線となることが確認された。
- (5)重錘初速度を力積に変換して入力荷重を与えることにより、簡易なはりモデルを用いた重錘落下衝突解析法を開発した。
- (6)緩衝材(EPP)の動的構成則を忠実に表現することにより、ボンドPCはりおよびアンボンドPCはりの重錘衝撃力および支点反力をほぼ良くシミュレートできることが認められた。

なお、本研究で用いたPCはりは、PC鋼材の破断先行型の曲げ破壊タイプのものであり、論文中に述べた断面分割法の適用性も含め、今後多様な実験パラメータについて検討する必要がある。

謝辞：本研究を行うに当たり、供試体を提供して下さった日本サミコン(株)若林修氏に心から感謝致します。また、重錘落下実験では、本校大野友則教授のご協力を得たことを付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) Bentur, A., Mindess, S. and Bathia, N.: The Fracture of Reinforced Concrete under Impact Loading, Materials Research Society Symposium Procedure, Vol.64, pp.225～234, 1986.
- 2) 鈴木計夫、藤岡正見：プレストレストコンクリート曲げ部材断面の終局域特性について-終局限界点の設定とその特性-、セメント技術年報、31巻、pp.477～481, 1977年。
- 3) 岡本伸：プレストレストコンクリート構造物の耐震安全性、プレストレストコンクリート、Vol.21, No.4, 1979年8月。
- 4) 西山峰弘、六車照、渡辺史夫：横高速によるコンクリート系部材の曲げ靱性改善、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、II-33～44, 1988年3月。
- 5) 建築学会：プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種PC)構造設計・施工指針・同解説、pp.132～143, 1986年1月。
- 6) 圓林栄喜、小林一隆、香月智、石川信隆：高速載荷時の円形スパイラル筋で補強したPCはりの弾塑性挙動に関する一考察、構造工学論文集、Vol.42A, pp.1235～1246, 1996年

- 3月.
- 7) 今野久志, 佐藤弘史, 長尾彰洋: P C鋼材量および鉄筋量の割合を変化させたP R C梁の衝撃実験について, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集, pp.1620~1621, 1994年8月.
 - 8) 岸徳光, 竹本伸一, 三上浩, 今野久志: T型P R C梁の静的・衝撃耐荷性状に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1827~1838, 1998年3月.
 - 9) 圓林栄喜, 園田佳巨, 小林一隆, 石川信隆, 佐藤弘史: 高速載荷を受けるアンボンドP Cはりの動的じん性に関する一考察, 第3回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.315~320, 1996年5月.
 - 10) 圓林栄喜, 香月智, 石川信隆, 太田俊昭: P CはりおよびP R Cはりのアンボンド化による動的じん性向上とその推定法, 土木学会論文集, No.634/V-45, pp.227~241, 1999年11月.
 - 11) 高橋芳彦, 大野友則, 太田俊昭, 日野伸一: 衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの弾塑性挙動に及ぼす材料のひずみ速度効果, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.1567~1580, 1991年3月.
 - 12) 園田佳巨, 小林直行, 石川信隆, 佐藤紘志: ひずみ速度効果を考慮したP C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.

(2000. 5. 26 受付)

A STUDY ON THE IMPACT FAILURE BEHAVIOR OF PRESTRESSED CONCRETE BY WEIGHT DROPPING TEST

Kensuke TAKEMOTO, Hidenobu ENRIN, Satoshi KATSUKI and Nobutaka ISHIKAWA

This paper presents both experimental and analytical approaches for the failure behaviors of bonded and unbonded PC beams under impact loading. First, the static, incremental and single weight dropping tests were performed in order to examine the failure behavior from the points of view of failure mode, impact load, and support reaction and so on. Second, the impact failure analysis based on the beam elements was developed by giving the external force in which the momentum due to initial velocity is transformed into the impulse. It is confirmed that this impact failure analysis method can simulate well experimental results by the single weight dropping test.