

(24) PRCはり部材の動的終局限界に関する一考察

A STUDY ON THE DYNAMIC ULTIMATE LIMIT STATE OF PRESTRESSED REINFORCED CONCRETE BEAM

圓林栄喜\*, 香月智\*\*, 石川信隆\*\*\*, 小林一隆\*\*\*\*

Hidenobu ENRIN, Satoshi KATSUKI, Nobutaka ISHIKAWA, Kazutaka KOBAYASHI

\*工修 防衛大学校 研究員 土木工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\*工博 防衛大学校 助教授 土木工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\*\*工博 防衛大学校 教授 土木工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\*\*\*工博 日本サミコン(株) 技術部技術管理課 課長 (〒950-0925 新潟市弁天橋通 1-8-23)

キーワード: PRCはり, 動的終局限界, 付着すべり

(Prestressed reinforced concrete beam, Dynamic ultimate limit state, Bond slip)

1. はじめに

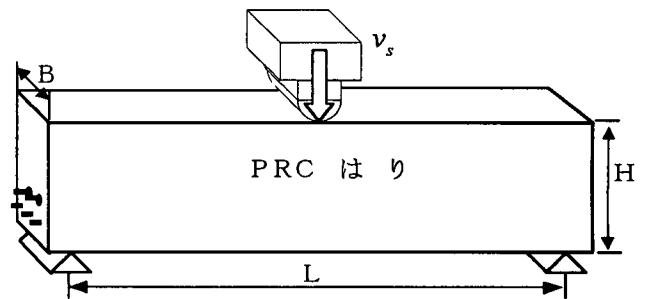
ロックシェッドのPCはり部材のじん性向上の一方法として、引張鉄筋をPC鋼線と組み合わせて使用するPRCはり部材が注目されている<sup>1)</sup>。これは、高剛性で高い弾性限界応力を持つが破断ひずみが小さいPC鋼線を、弾性限界応力は小さいが破断ひずみの大きい鉄筋によって補うことにより、はり全体のじん性向上を期待するものである。このような観点から、著者ら<sup>2)</sup>はPRCはりの静的および高速載荷による曲げ破壊実験を行い、その挙動を調べたところ、PC鋼線とコンクリート間のすべりの有無やその程度によつてはりの動的終局限界が大きな影響を受けることが判った。特に、定着長がわずかに不足する場合には、はり全域においてPC鋼線の付着力が欠如し、端部における引き込みが発生することも観察された。

本研究は、まずPC鋼線とコンクリートの付着すべりを考慮した動的解析法を提案した。次いで、完全付着および不完全付着の場合のすべてを包含できる計算プログラムを開発し、さらに、これを用いてはり全域でPC鋼線のすべりが生じた場合の実験結果をシミュレートして、そのメカニズムとはりの動的終局限界について考察したものである。

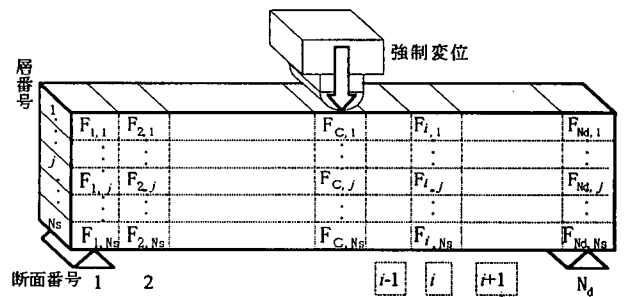
2. 解析モデル

(1) はり全体の離散化

本解析では、図-1に示すような離散化モデルを用いる。すなわち、図-1(a)に示す高速強制変位を



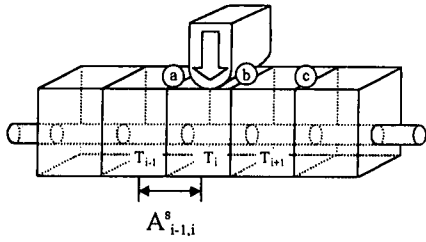
(a) 高速変形を受けるPRCはり部材



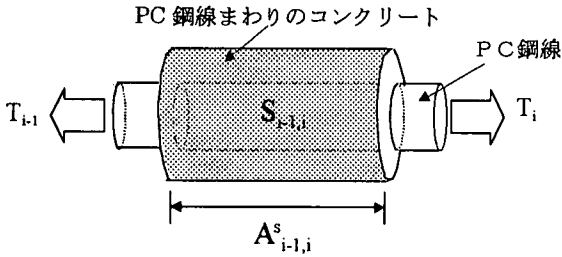
(b) 動的解析モデル

図-1 離散化モデル

受ける単純はりを、図-1(b)に示すように、はり軸方向に $N_d$ 個に分割したうえで、各分割されたはり要素を断面高さ方向に層状に $N_s$ 個に分割し、はり方向には軸直角方向の変位のみを自由度とする離散化要素モデルを作成した。それぞれの $i$ 要素断面内では、はり方向に分割されたコンクリートの境界線が常に平面保持の仮定が成立するものとして、断



(a) はりの分割要素とすべり判定領域  $A_{i-1,i}^s$



(b) 付着力と張力の関係

図-2 はり要素の分割とすべり判定領域の設定

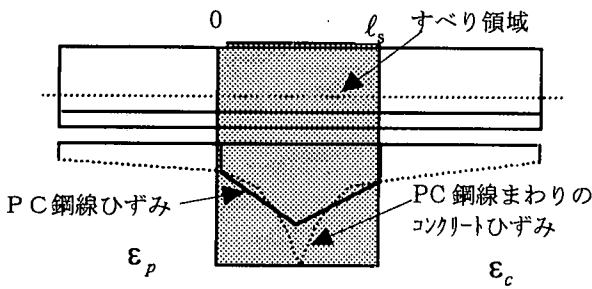


図-3 すべり領域におけるひずみ分布

面分割法により非線形の曲げモーメントを収束計算により求める。よって、最終的に線要素モデルとなる動的な力のつり合い条件は次式のように表される。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{F}_K(\mathbf{u}) = \mathbf{F}_e \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{M}$ : 質量マトリックス,  $\ddot{\mathbf{u}}$ : 加速度ベクトル,  $\mathbf{D}$ : 減衰マトリックス,  $\dot{\mathbf{u}}$ : 速度ベクトル,  $\mathbf{F}_K(\mathbf{u})$ : 剛性抵抗力ベクトル,  $\mathbf{F}_e$ : 節点外力ベクトル

## (2) 付着破壊のモデル化

### (a) すべり判定

図-2に示すように、離散化されたはりの隣接する2要素  $i-1, i$  の間に、すべり判定領域  $A_{i-1,i}^s$  を設けると、付着力  $S_{i-1,i}$  と PC 鋼線の引張力の差との間には、次の力の釣り合い条件式が成立する。

$$S_{i-1,i} = \Delta T = T_i - T_{i-1} \quad (2)$$

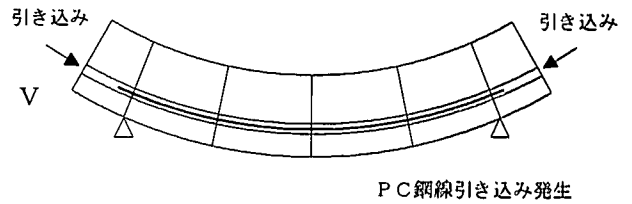
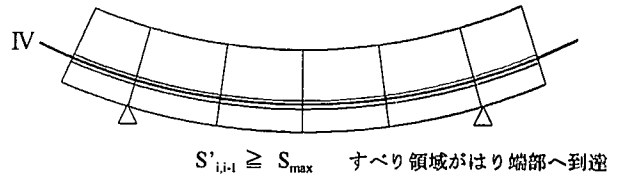
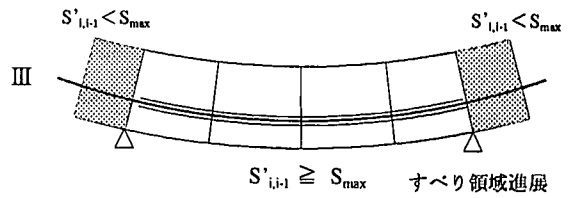
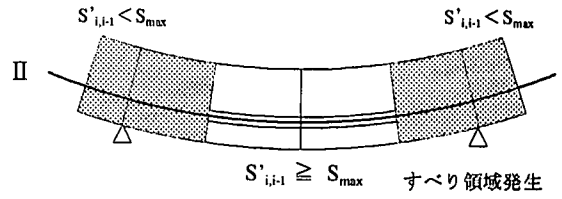
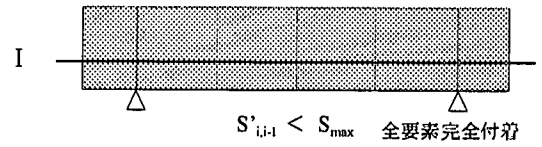


図-4 すべり領域の進展

ここで、 $T_{i-1}, T_i$ : それぞれ  $i-1, i$  要素における PC 鋼線の張力,  $S_{i-1,i}$ :  $A_{i-1,i}^s$  領域に生ずる付着力。

このすべり判定領域での付着状態は次の2つの状態に分類される。

$$S_{i-1,i} < S_{max} \quad (\text{完全付着}) \quad (3-a)$$

$$S_{i-1,i} = S_{max} \quad (\text{すべり状態}) \quad (3-b)$$

ただし、 $S_{max}$ : 限界付着力 ( $= \alpha S_{s,max}$ ),  $\alpha$ : 動的付着係数, 静的限界付着力  $S_{s,max}$ 。

ここで、動的付着係数を導入するのは、従来の研究によって荷重速度が大きくなると、付着応力が2~4倍に増加することが知られているからである<sup>3)</sup>。なお、この静的限界付着力  $S_{s,max}$  は、コンクリート標準示方書<sup>4)</sup>で用いられている次式により求める。

$$S_{s,max} = f_{bok} \cdot b \cdot l_{i,i-1} = 0.28 f'_{ck}{}^{2/3} \cdot b \cdot l_{i,i-1} \quad (4)$$

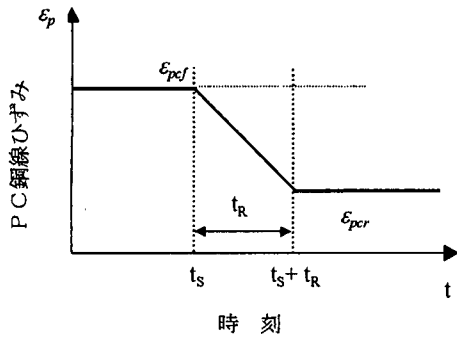


図-5 PC鋼線の引き込みに伴うひずみ低下モデル

ここで、 $f_{bok}$  : 付着強度 (異形鉄筋),  $b$  : PC鋼線の周長,  $l_{i,i-1}$  : 付着要素長,  $f'_{ck}$  : 設計基準強度.

さて、各すべり判定領域が、すべり状態にあるか否かを判定するためには、まず、完全付着であることを仮定した上で、仮の付着力  $S'_{i-1,i}$  を次式によって求める。

$$S'_{i-1,i} = T'_i - T'_{i-1} \quad (5)$$

ここで、 $T'_i$ ,  $T'_{i-1}$  : 分割要素内のPC鋼線のひずみをその周辺のコンクリートと等しくした場合のPC鋼線引張力.

その上で、次のように判定する。

$$S'_{i-1,i} < S_{max} \quad \longrightarrow \quad (\text{完全付着}) \quad (6-a)$$

$$S'_{i-1,i} \geq S_{max} \quad \longrightarrow \quad (\text{すべり状態}) \quad (6-b)$$

### (b) すべり領域の変形適合条件とPC鋼線の力の釣り合い

式(6-b)によってすべりが生じているとされた領域では、図-3に示すように、PC鋼線のひずみとコンクリートのひずみは一致しない。しかし、その全領域での伸び量 ( $\Delta l_{cpc}$ ,  $\Delta l_{cc}$ ) は一致しなければならず、次の変形適合条件が成立する。

$$\Delta l_{cpc} = \int_0^{l_s} \epsilon_p dl = \int_0^{l_s} \epsilon_c dl = \Delta l_{cc} \quad (7)$$

ただし、 $l_s$  : すべり領域の長さ,  $\epsilon_p$  : PC鋼線ひずみ,  $\epsilon_c$  : PC鋼線まわりのコンクリートひずみ.  $\Delta l_{cpc}$ ,  $\Delta l_{cc}$  : すべりが生じている領域内でのPC鋼線の伸び量, およびPC鋼線まわりのコンクリートの伸び量.

この領域でのPC鋼線は、式(3-b)を満足するよ

うに、式(1)の釣り合い条件によって各要素内のPC鋼線の軸力が求められる。

### (c) はり両端部でのPC鋼材のすべりとそのモデル化

さて、中央載荷を受けるはりのPC鋼線すべり領域は、図-4に示すような進展過程をたどると考えられる。前述のモデルを用いるとこのように中央部からすべり領域は拡大するが、IVに示すように、はり両端まですべり領域が達すると、PC鋼材は初期引張力の解放にともなって、はり内部に引き込まれる。この状態では、式(7)の変形適合条件は成立せず、はり全領域で、式(2)と式(3-b)によってのみPC鋼線の状態が決定される。このIVからVへ移行するには、遷移時間を要するものと考え、図-5に示すようなPC鋼線ひずみの低下に関するモデル化を行った。

$$\epsilon_p = \epsilon_{pcf} \quad 0 \leq t < t_s \quad (8-a)$$

$$\epsilon_p = \epsilon_{pcf} - (\epsilon_{pcf} - \epsilon_{pcr}) \frac{\Delta t}{t_R} \quad t_s \leq t < t_s + t_R \quad (8-b)$$

$$\epsilon_p = \epsilon_{pcr} \quad t \geq t_s + t_R \quad (8-c)$$

ただし、 $t_s$  : PC鋼線引き込み開始時刻,  $t_R$  : 緊張力緩和所要時間,  $\Delta t$  : 引き込み開始からの経過時間,  $\epsilon_{pcf}$  : PC鋼線引き込み開始時のPC鋼線ひずみ,  $\epsilon_{pcr}$  : PC鋼線のひずみ低下終了時のPC鋼線ひずみ

### (3) 材料の構成則

本解析では、図-6~8に示すようなコンクリートに対してはスターラップ<sup>5)</sup>とひずみ速度の効果を考慮した応力~ひずみ関係<sup>5)</sup>、鉄筋<sup>5)</sup>、PC鋼線<sup>6)</sup>については、ひずみ速度効果を考慮した応力~ひずみ関係を用いた。

### 3. 解析結果と考察

提案する解析法の妥当性を検討するため、図-9に示すPRC断面で行った高速載荷実験結果<sup>1)</sup>のシミュレーションを行った。実験結果の荷重~変位関係を図-10に示すが、その形状は、軟化型の弾塑性挙動を示している。また、高速載荷時の破壊性状に

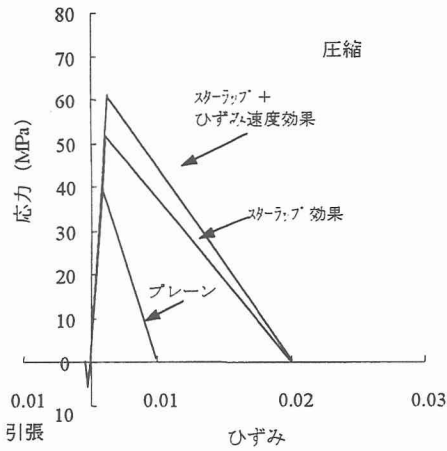


図-6 コンクリートの応力～ひずみ関係

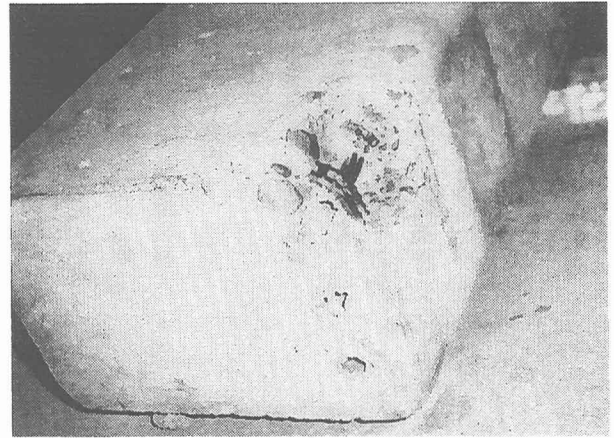


写真-1 PC鋼線の引き込みの状態

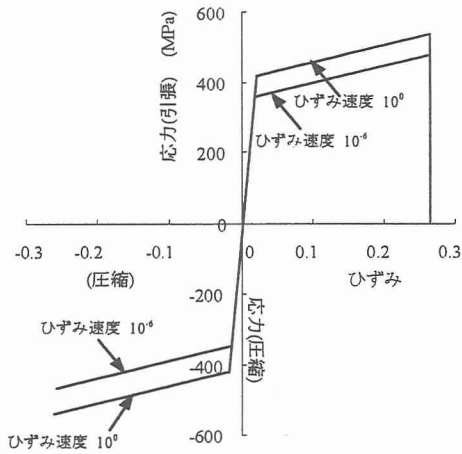


図-7 鉄筋の応力～ひずみ関係

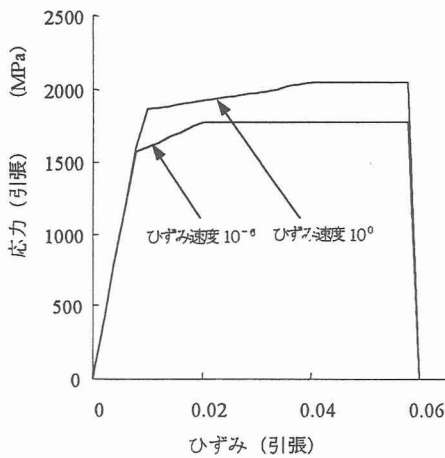


図-8 PC鋼線の応力～ひずみ関係

において写真-1に示すようなPC鋼線のすべりが確認されたことから、このすべりが軟化挙動に影響を及ぼしたのではないかと考えられる。表-1に解析に用いた入力条件を示す。

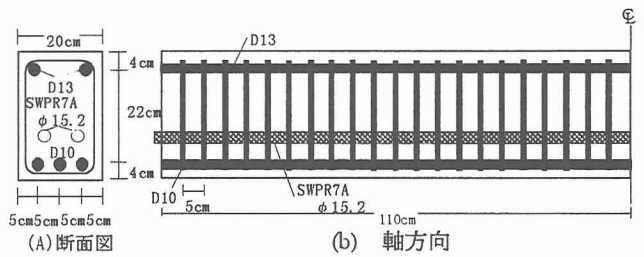


図-9 供試体諸元および断面

表-1 解析に用いた入力条件

はり分割数	10	コンクリート圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	39.0
断面分割数	25	鉄筋降伏点(N/mm <sup>2</sup> )	343.
はり幅(cm)	220.	鉄筋引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	500.
はり高さ(cm)	30.	鉄筋破断ひずみ	0.25
スパン(cm)	200.	PC鋼線降伏点(N/mm <sup>2</sup> )	1580.
はり質量(kg)	330	PC鋼線引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	1740.
時間増分Δt(sec)	1.0×10 <sup>-6</sup>	初期プレストレス(kN/本)	147.
構造減衰係数β(sec)	5.0×10 <sup>-6</sup>	PC鋼線破断ひずみ	0.06
緊張力緩和時間t <sub>R</sub> (sec)	2.0×10 <sup>-3</sup>		

(1) 動的付着係数  $\alpha$  が荷重～変位関係に及ぼす影響

急速に引張力が増大する場合の限界付着力の増大倍率は静的に比較して2～4倍とされている<sup>3)</sup>が、正確なモデルがないため、完全付着状態 ( $\alpha=5.0$ ) の解析結果と動的付着係数  $\alpha$  を 1.0, 2.0, 3.0 と徐々に変化させた解析結果の比較を図-10と図-11に示す。

図中の○はPC鋼線の引き込みが開始された点を、●はPC鋼線が破断した点を示す。▲は、断

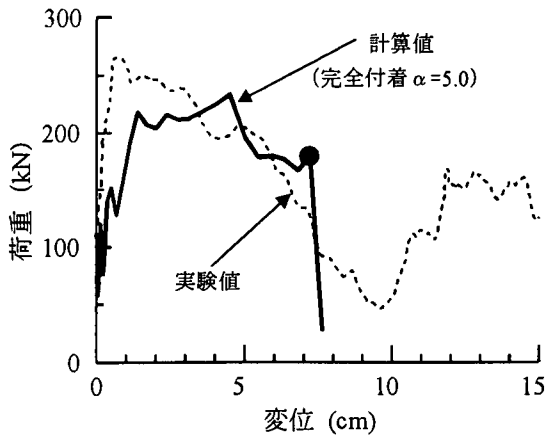


図-10 完全付着 ( $\alpha=5.0$ ) の解析結果と実験結果の荷重～変位関係 (高速載荷時)

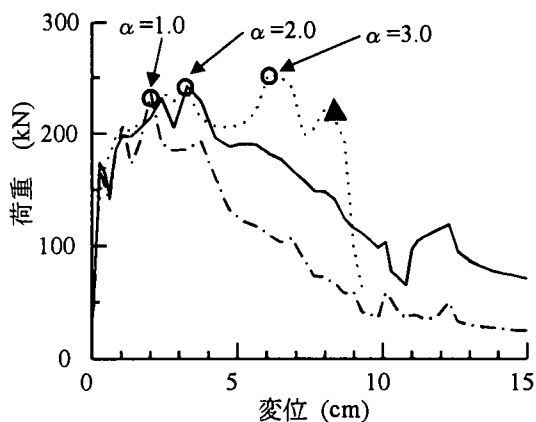


図-11 各動的付着係数における荷重～変位関係

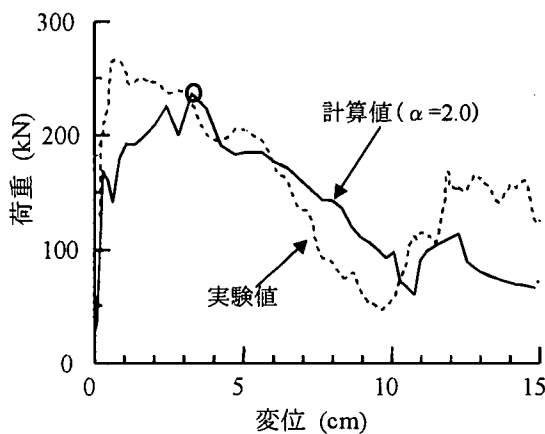


図-12  $\alpha=2.0$  の解析結果と実験結果の比較

面内のアンバランスにより耐力が急落した点を示す。

まず図-10より、完全付着の場合はPC鋼線の破断が生じているが、今回の実験ではそのような現象は生じておらず、写真-1に示すようなPC鋼線のすべりが確認されたことから、軟化現象が起こっているものと思われる。次に、図-11より $\alpha$

の増大つまり限界付着力が増大するに従い、PC鋼線の引き込み開始点が遅くなるのがわかる。

また、 $\alpha=3.0$  の場合つまり限界付着力が静的の3倍の場合は、断面内の不安定のために耐力が急激に失われる点が解析的に現れるが、実験的には現れていない。よって、 $\alpha=2.0$  とした場合の計算結果と実験結果の荷重～変位関係を図-12に示す。図-12より、 $\alpha=2.0$  の場合には、弾性限界が生ずる変位に若干のずれが生じるが、弾性領域と耐力のピークから軟化領域に至る全体的な傾向を良くシミュレートできている。

### (3) PC鋼線ひずみ分布の変化

図-13に各動的付着係数ごとのPC鋼線ひずみ分布の変化を示す。まず、限界付着力を静的な抵抗値とする $\alpha=1.0$  (図-13(a))では、5msでは中央点においてすべりが開始し、10msでは全領域にすべり領域が拡大し、30msでは全領域で初期プレストレス力が抜けてひずみがなくなっている。次に、実験値との対応性が最も良かった $\alpha=2.0$  (図-13(b))では、15msですべりが全領域に拡大しているが、その限界付着力が静的の2倍であるため、中央点でのPC鋼線のひずみも $\alpha=1.0$ の場合よりも大きくなっている。その後、初期プレストレス力が抜けて、35msでPC鋼線のひずみの低下が終了する。 $\alpha=3.0$  (図-13(c))の場合も同様である。一方、動的付着係数 $\alpha=5.0$ とする完全付着モデル(図-13(d))では、はり中央部でのPC鋼線ひずみが極端に卓越して増加するため、载荷開始後20msでは破断ひずみを超えてしまう。

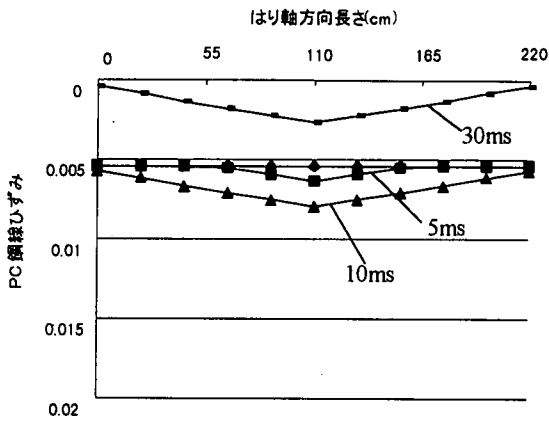
以上より、動的付着係数 $\alpha$ を導入することにより、PC鋼線のひずみ分布特性を良く把握できたものと考えられる。

## 4. 結論

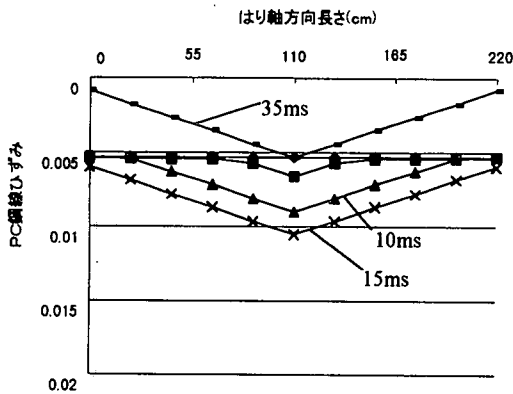
本研究は、PRCはりの破壊メカニズムに及ぼすPC鋼線とコンクリートのすべりの影響を考慮した解析法を開発し、実験との比較検討を試みたものである。

本研究により得られた成果を要約すると以下のようなようになる。

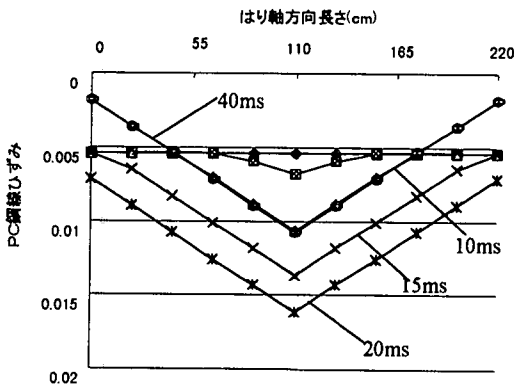
- (1) PC鋼線とコンクリートのすべりモデルを提案し、高速载荷を受けるPRCはりの動的解析法を開発することができた。



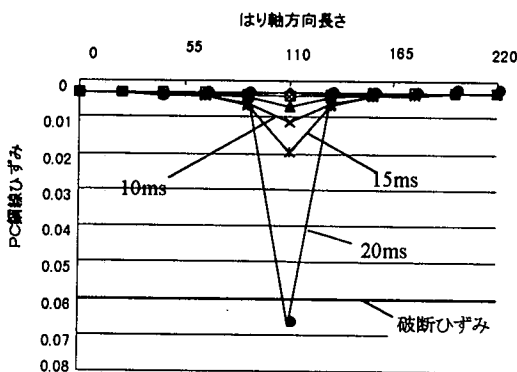
(a)  $\alpha = 1.0$



(b)  $\alpha = 2.0$



(c)  $\alpha = 3.0$



(d) 完全付着 ( $\alpha = 5.0$ )

図-13 各動的付着係数におけるPC鋼線ひずみ分布の変化

(2)その際、限界付着力の動的効果を表す動的付着係数 $\alpha$ の導入と、すべり領域が拡大した場合のPC鋼線ひずみ低下モデルを提案することにより、すべり開始後の軟化領域を良く表現できることを確認した。また、PC鋼線のひずみ分布特性をも良く把握できることを示した。

(3)静的限界付着力の2倍の限界付着力を与えたシミュレーション結果は、PC鋼線の定着長不足による引き込みを含む実験結果を良くシミュレートできた。

今後、衝撃的な荷重下におけるPC鋼材とコンクリート間の動的付着力について詳細な実験を行い、その妥当性を検証する必要があると考える。

#### 参考文献

- 1) 建設省土木研究所構造研究室, 社団法人プレストレストコンクリート建設業協会: PRC製ロックシェッドの設計法に関する共同研究報告書, 第148号, 1996年3月
- 2) 園林栄喜, 香月智, 石川信隆, 小林一隆, 山口弘: PRCはりの高速載荷時の弾塑性挙動と限界吸収エネルギー, 土木学会第52回年次講演会講演概要集, I-B, pp.404~405, 1997年9月
- 3) 石本陽一, 島弘: 鉄筋とコンクリート付着応力-すべり関係に及ぼす載荷速度の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.2, 1993年6月
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書(設計篇), PP.19, 1996年3月
- 5) 高橋芳彦, 大野友則 他: 衝撃を受ける鉄筋コンクリートはりの弾塑性挙動に及ぼすひずみ速度効果, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.1567~1580, 1991年3月.
- 6) 園田佳臣, 小林直行 他: ひずみ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.