高速載荷を受ける PC および PRC はりの 動的終局限界特性に関する実験的研究†

石川 信隆* 圓 林 栄 喜**
香 月 智* 太 田 俊 昭***

An Experimental Study on Dynamic Ultimate Limit States of Prestressed Concrete and Prestressed Reinforced Concrete Beams under High Speed Loading

by

Nobutaka ISHIKAWA*, Hidenobu ENRIN**, Satoshi KATSUKI*
and Toshiaki OHTA***

This paper presents an experimental study on the dynamic ultimate limit states of prestressed concrete (PC) and prestressed reinforced concrete (PRC) beams under high speed loading. First, the static and high speed loading tests were performed for the PC and PRC beams with different bond conditions, respectively. It was found from the tests that the ultimate deformations of unbonded PC and PRC beams become about 1.6 ~ 2.6 times larger than those of the bonded PC and PRC beams under high speed loading. Second, it was also noted that the ultimate deformations of bond PRC beams are in general about 30% larger than those of PC beams with the same flexural strength. Finally, it was found from the PC tendon strain distributions that the unbond condition of PC tendon influences remarkably on the ultimate deformations of unbond PC and PRC beams.

Key words: High speed loading, Ultimate limit state, Prestressed concrete beam, Prestressed reinforced concrete beam, Bond condition

1 緒 言

プレストレストコンクリート (PC) 部材は、一般に鉄筋コンクリート (RC) 部材に比べ高耐力を有するが、変形性能つまりじん性が小さいことが指摘されている。¹⁾

PC 部材のじん性向上を図るためこれまでいくつかの方法が提案されている。その一つは、圧縮側コンクリートを円形スパイラル筋で補強し、コンクリートの圧壊を防止することにより PC 部材のじん性を増加させる方法である。²⁾ この方法について著者ら³⁾ は、静的および高速載荷実験を行って確認したところ、円形スパイラル筋による補強は静的には有効であったが、高速載荷実験では PC 鋼材の破断が先行するため終局変位を増大させる効果が得られなかった。このように、PC 鋼材の破断を抑止するために補強鉄筋を用いて鋼材係数を増加させる、いわゆる PRC (prestressed reinforced concrete) 化も提案されている。さらに、著者⁴⁾ らは、PC 鋼材の付着状態が PC はりの変形性能に大きな影響を及ぼすことに着目し、アンボンド PC はり部材に対する高速載荷実験を行い、その有効性を確認した。しかし、これまでポストテンショニング方式による不完全ボンド状態の PC はりや PRC はりまたアンボンド PRC はりに対する検討はなされていなかった。

そこで本研究は、これまでの研究を総括する意味で、

まず静的曲げ耐力をほぼ一定とするような PC はりおよび PRC はりを選定し、その PC 鋼材の付着状態をプレテンショニング方式 (以下、ボンドタイプと呼ぶ)、グラウト強度を調整したポストテンショニング方式の不完全ボンドタイプ (以下、不完全ボンドタイプと呼ぶ) およびポストテンショニング方式のアンボンドタイプ (以下、アンボンドタイプと呼ぶ) の 3 種類とし、合計 6 種類のはりに対してそれぞれ静的および高速載荷実験を行い、荷重～変位関係、終局限界および破壊形態などを調べた。すなわち (1) PC 鋼材の付着状態による比較、(2) 静的と動的との比較、(3) PC と PRC はりとの比較、(4) 破壊形態を比較考察するとともに、それぞれの動的終局限界特性について調べた。なお、本研究の目的は付着方式を変えた PC および PRC はりの動的終局限界特性を調べることにあるが、比較のため静的終局限界特性についても同時に検討したものである。

2 実験の概要

2・1 載荷要領

静的および高速載荷実験とも高速変形負荷装置⁵⁾ (荷重容量 490kN, 最大載荷変形速度 4m/sec, ストローク限界 15cm) を用いて、Fig. 1 に示すように支間 1.0m で左右支点部を回転のみ許す固定治具で固定したはりに対して中央点で載荷した。静的載荷では、速度約 1cm/min

† 原稿受理 平成 11 年 3 月 1 日 Received Mar. 1, 1999

* 正 会 員 防衛大学校土木工学科 〒239-8686 横須賀市走水, Dept. of Civil Eng., National Defense Academy, Hashirimizu, Yokosuka, 239-8686

** 防衛大学校土木工学科 〒239-8686 横須賀市走水, Dept. of Civil Eng., National Defense Academy, Hashirimizu, Yokosuka, 239-8686

*** 九州大学大学院工学研究科都市環境システム工学専攻 〒812-8581 福岡市東区箱崎, Dept. of Civil Eng., Kyushu Univ., Higashi-ku, Fukuoka, 812-0053

Fig. 1. Static and high speed loading test.

Fig. 2. High speed loading machine and specimen.

(0.017cm/sec) で荷重治具を変位させ、荷重治具先端は $\phi 50\text{mm}$ の円柱形によって線荷重する治具を用いた。また今回の高速荷重実験は、荷重速度を 300cm/sec の一定速度（静的約 17650 倍の速度）で、供試体の耐力が急に低下する時点（終局限界状態）まで荷重した。Fig. 2 に高速荷重実験状況を示す。

2・2 測定項目および測定要領

計測項目は、荷重点荷重、荷重点上変位（荷重板）、荷重点下変位、PC 鋼材のひずみおよび荷重点加速度である。荷重は容量 490kN のひずみゲージ式ロードセル、変位はレーザ式変位計、PC 鋼材のひずみは鋼材用ひずみゲージによってそれぞれ測定した。また、高速荷重時は加速度計により加速度を計測した。用いた計測器等の諸元を Table I に示す。また高速荷重実験時の各データはサンプリングタイム $50\mu\text{sec}$ で計測し、A/D 変換後に 1msec の単純移動平均を行っている。

2・3 供試体および実験ケース

供試体は、Fig. 3 に示すように長さ 150cm （純スパン 100cm ）、断面高さ 25cm 、断面幅 15cm のはり部材である。ここで小型（短スパン）とした理由は、高速荷重実験においてははりの終局限界状態を現出させるため、高速変形荷重装置のストローク限界である 15cm 以内ではりを確実に破壊させる必要があるためである。つまりスパンが長いと終局変位が大きくなり、 15cm 以内で破壊が生ぜず、特に今回のような変形状態が大きいのと思われる

Table I. Measurement item and measuring sensor properties.

item	measuring sensor	values
load	Load cell	capacity: 490kN
displacement	laser displacement sensor	range: $300 \pm 100\text{mm}$ response frequency: 915Hz
strain of PC tendon	strain gauge	factor: 2.14 resistance: $120.5 \pm 0.5 \Omega$
acceleration	accelometer	range: 500G response frequency: 10000Hz

Table II. Material properties.

material	items	values
beam	width	15cm
	height	25cm
	length	150cm
	span	100cm
concrete (mortar)	strength	44.7N/mm^2
stirrup	diameter	D10
	pitch	$3\text{cm}, 5\text{cm}$
	height	21cm
	width	11cm
rebar	diameter (compression side)	D6
	diameter (tension side)	D13
	yield point	370N/mm^2
	tension strength	530N/mm^2
prestressed tendon	elongation at fracture	26.5%
	diameter(strand) (bar)	$\phi 9.3\text{mm}$ ($\phi 9.0\text{mm}$)
	prestressing force	66.6kN
	yield point	1761N/mm^2
	tensile strength	1912N/mm^2
	elongation at fracture	7.5%

アンボンド PC・PRC はりの場合の終局限界を確実に把握するためには、スパンを短くする必要があったためである。このため、プレテンション方式の PC・PRC はりにおいても付着すべりが生じないようにはり端部に定着具を設けた。また、短スパン（せん断スパン比 2.5）のためせん断破壊を防止する目的で、スターラップに D10 の鉄筋を使用し、荷重点では 50mm 間隔、支点部では 30mm 間隔で配筋し、曲げ破壊を生じさせるように工夫した。供試体の種類は、ボンドタイプの PC はり（A タイプ）と PRC はり（D タイプ）を基準断面とし、グラウト材の強度を調整して付着力を低下させた不完全ボンドタイプの PC はり（B タイプ）と PRC はり（E タイプ）、PC 鋼材とモルタル間の付着を完全になくしたアンボンドタイプの PC はり（C タイプ）と PRC はり（F タイプ）の付着方式を変えた合計 6 種類である。断面内の鉄筋および PC 鋼材の配置を Fig. 3 に示す。また、PC 鋼材に生じるひずみの特性を調べるため、各 1 体のみ $\phi 9.3\text{mm}$ の PC 鋼より線の代わりに $\phi 9.0\text{mm}$ の異形 PC 鋼棒を用いた。ひずみゲージの貼付位置を Fig. 3 に示す。さらに、PC はりおよび PRC はりの断面の配筋にあたっては、そのじん性評価の目安としての鉄筋鋼材係数 q_{sp} を使い、建築学会²⁾でじん性確保のため推薦値としている $q_{sp} = 0.25$ に近い値、つまり PC はりでは $q_{sp} = 0.259$ 、PRC はりでは 0.249 を採用した。使用した材料諸元を Table II

Fig. 3. Specimen.

に示す。初期緊張力についてはいずれの供試体についてもフルプレストレス状態を想定して、 $66.6\text{kN}/\text{本}$ の緊張力を与えた。また、本実験では供試体断面が小さいので、PC鋼材とコンクリート間の付着をなるべく均一化する目的から、プレミックスタイプのモルタルを使用した。実験時のモルタルの平均圧縮強度は $44.7\text{N}/\text{mm}^2$ であった。なお、グラウトについては、設計時の圧縮強度を $20\text{N}/\text{mm}^2$ としていたが、実験時の平均圧縮強度は $39.4\text{N}/\text{mm}^2$ であった。実験ケースは、PC鋼より線を用いる場合、静的および高速載荷実験に対して各2体の計24体、異形PC鋼棒を用いる場合、各1体の計12体で合計36体である。

3 実験結果および考察

3・1 終局限界点の定義

PCはりの終局限界点の定義については、Ghoshら⁶⁾の最大曲げモーメント ($M_{\max}$) 時点、岡本ら⁷⁾や本岡ら⁸⁾の提案する $0.8 \sim 0.9M_{\max}$ になる時点、また鈴木ら⁹⁾が提案する終局限界点で① ($C=T$) $\max$ となる時点 (C : 圧縮合力, T : 引張合力), ② 引張鋼材の破断点, ③ 主筋座屈点, ④ 横補強筋破断点などがある。

ここでは、終局限界点を定義するために以下の方法を用いた。まず Fig. 4 に A タイプ (ボンド PC はり) と D タイプ (ボンド PRC はり) の静的載荷時の荷重～変位関係とその面積を逐次積分して得られる累積吸収エネルギー～変位関係を示す。この図から、A タイプでは変位 4.5cm , D タイプでは 6.2cm の位置で荷重が急に低下し、

Fig. 4. The definition of ultimate limit states due to PC tendon fracture.

(Static load-displacement relation and accumulated absorption energy-displacement relation of Type A and D)

Fig. 5. The definition of ultimate limit states due to mortar crushing.

(Static load-displacement relation and accumulated absorption energy-displacement relation of Type C)

これに対応して累積吸収エネルギーの勾配も変化し始める。これは、この変曲点で PC 鋼線が破断したためで、この時点を PC 鋼材の破断による終局限界と定義する。また、Fig. 5 に C タイプ (アンボンド PC はり) の荷重～変位関係と累積吸収エネルギー～変位関係を示す。この供試体では、モルタル圧壊によって終局限界に達している。このモルタル圧壊点を判定する方法としては、PC 鋼材のひずみのもどり開始点を使用する方法が一般的ではあるが、本研究では高速載荷時の実験にも共通する判定法を使用する必要がある。しかし、高速載荷時には、どうしても PC 鋼材のひずみに振動が表れるため、もどり点を判定することが困難である。そこで、本研究では、Fig. 5 に見られるように累積エネルギーの勾配が変化し始める点と荷重～変位関係での荷重低下状況を総合的に判定して、その終局限界と定めるものとした。この方法

Fig. 6. Static load-displacement relation (comparison of bond condition).

Fig. 7. High speed load-displacement relation (comparison of bond condition).

によると静的載荷時には PC 鋼材のひずみのもどり開始点とほぼ一致する。すなわち、本実験では累積吸収エネルギー～変位関係の変曲点が現れる時点を終局限界と定義した。これは、① 引張鋼材の破断点か ② $(C = T)_{\max}$ となる時点（以下、モルタル圧壊）のいずれかに相当する。また、今回新たに PRC はりの特徴としての ③ 引張鉄筋の破断点も終局限界に加えた。

3・2 付着方式（ボンド・不完全ボンド、アンボンド）の比較

3・2・1 静的載荷時の場合 Fig. 6 (a) に PC はりの静的載荷時の荷重～変位関係を示す。最大耐力では、不完全ボンドのものが他のものより 8% 程度大きくなっているが、これはモルタル強度のばらつきによるものと考えられる。このような違いがあるものの概して、終局限界点の変位（以下、終局変位）で比較すると、アンボンドの C タイプの終局変位は、ボンドの A タイプの約 1.6 倍、不完全ボンドの B タイプの約 1.5 倍増大していることがわかる。また、A タイプ、B タイプはそれぞれ終局変位で耐力が急落する完全弾塑性型の荷重～変位曲線であるが、C タイプでは荷重が一時的に低下した後でも一定の耐力を維持しており、A, B タイプに比し変形性能が大きいことがわかる。ここで、B タイプ（不完全ボンド PC はり）の終局変位が A タイプ（ボンド PC はり）とあまり差がなかったが、その理由は、B タイプにおいて当初、設計時にグラウト強度を 20N/mm^2 としていたが、実験時の平均グラウト強度が 39.4N/mm^2 となっていたため、A タイプのモルタル圧縮強度 45N/mm^2 とほ

んど変わらなくなり、付着強度に大きな差が生じなかったためと考えられる。

次に、Fig. 6 (b) に PRC はりの静的載荷時の荷重～変位関係を示す。PRC はりの最大耐力も付着方式に拘わらずほぼ一定で、終局変位を比較すると、F タイプ（アンボンド PRC はり）は D タイプ（ボンド PRC はり）に比較して約 1.8 倍増大していることがわかる。また荷重～変位曲線の形状を比較すると、D タイプ（ボンド PRC はり）および E タイプ（不完全ボンド PRC はり）は完全弾塑性型の弾塑性挙動を示して PC 鋼材の破断で終局限界となったのに対し、F タイプ（アンボンド PRC はり）は最大荷重以降荷重が漸減しはじめる軟化型の弾塑性挙動を示して PC 鋼材の破断で終局限界となったのに対し、F タイプ（アンボンド PRC はり）は最大荷重以降荷重が漸減しはじめる軟化型の弾塑性挙動を示し、最終的に鉄筋の破断によって終局限界を迎えている。なお、アンボンド PC はりおよびアンボンド PRC はりとも一般に言われるほど耐力は低下していない。剛性については、アンボンド PRC はりがボンド PRC はりに比べて若干小さい。

3・2・2 高速載荷時の場合 Fig. 7 (a) に PC はりの高速載荷時の荷重～変位関係を示す。この場合も最大耐力はほぼ一定であり、終局変位を比較すると C タイプ（アンボンド PC はり）の終局変位は A タイプ（ボンド PC はり）、B タイプ（不完全ボンド PC はり）よりも約 2.6 倍大きくなっている。また、荷重～変位曲線の形状は C タイプが最大荷重以降で一時的に荷重が低下するものの、全体としては A, B, C タイプともほぼ完全弾塑

Fig. 8. Load-displacement relation (comparison between PC beam and PRC beam).

性型の荷重～変位関係となっている。また、Aタイプ（ボンドPCはり）とBタイプ（不完全ボンドPCはり）で終局変位に大きな違いが現れていないが、これは静的載荷と同様、Aタイプのモルタル強度とBタイプのグラウトの強度に違いが生じなかったためと考えられる。

Fig. 7 (b) に PRC はりの高速載荷時の荷重～変位関係を示す。終局変位を比較すると、Fタイプ（アンボンド PRC はり）が D タイプ（ボンド PRC はり）、E タイプ（不完全ボンド PRC はり）に比べて約 1.8 倍大きいことがわかる。また、荷重～変位曲線の形状は、D、E、F タイプのいずれも完全弾塑性型の荷重～変位関係を示し、PC 鋼材の破断により終局限界点で一度急激に荷重が低下した後再び一定の耐力を維持して、最終的に鉄筋の破断により一挙に荷重が低下する箇所が現れる。このような荷重～変位関係となる理由は、PRC はりに使用した PC 鋼より線と引張鉄筋の破断伸びの違いによるものと考えられる。すなわち、本実験の PRC はり断面は Fig. 3 に示すように上段に PC 鋼より線を 2 本配置しているため、ボンド・不完全ボンド PRC はり（D、E タイプの場合）では、破断伸びの小さな PC 鋼より線が先に破断して荷重が低下したのに対し、アンボンド PRC はり（F タイプ）では PC 鋼材のひずみはより全体で平均化されるため、引張鉄筋の方が先に破断するためと思われる。ちなみに、静的載荷同様、アンボンド PC はりおよび PRC はりとも耐力は低下してしていない。しかし、ボンド・不完全ボンドの結果と比較し、アンボンドの場合剛性がほんのわずかに小さくなることわかる。

3・3 PC はりと PRC はりとの比較

ここでは、鉄筋鋼材係数 q_{sp} を PC はり ($q_{sp} = 0.259$) および PRC はり ($q_{sp} = 0.249$) とほぼ一定とし、静的曲げ

耐力もほぼ一定としたうえで、両者の変形性能について載荷方法および付着方式ごとに比較検討する。Fig. 8 (a), (b) は、それぞれ静的載荷時と高速載荷時におけるボンド、不完全ボンド、アンボンドタイプの PC はりと PRC はりの荷重～変位関係を比較したものである。Fig. 8 (A-1), (A-2) よりボンド PRC はりはボンド PC はりよりも静的・高速とも約 30% 終局変位が増大しており、PRC 化の効果が現れていることがわかる。この理由は、ボンドタイプの PRC はり断面の場合、下段に配筋した D13 の異形鉄筋（破断伸び 26.5%）が、PC はり断面の下段に配筋した $\phi 9.3\text{mm}$ の PC 鋼より線（破断伸び 7.5%）よりも破断しにくく、大きな変形に耐えることができるためと考えられる。次に、Fig. 8 (C-2) より、高速載荷時のアンボンドタイプの PC はり（C タイプ）と PRC（F タイプ）の終局変位はほとんど差がないことが認められる。この終局限界点は、C タイプ（PC はり）では PC 鋼材の破断、F タイプ（PRC はり）では引張鉄筋の破断と異なっている。すなわち、PC はりにおいて PC 鋼材のアンボンド化により PC 鋼材の破断ひずみ（7.5%）を見かけ上鉄筋の破断ひずみ（26.5%）とほぼ等しくするほど増大させる効果があったことを意味している。以上より、静的および高速載荷時とも曲げ耐力が一定となるような配筋では、PC 部材の PRC 化をはかることによりボンドタイプの場合はじん性向上に効果が認められたが、アンボンド部材では、PRC 化の効果は高速載荷時においてあまり顕著でない結果となった。しかし、これについては将来さらに詳細な検討が必要である。

3・4 静的載荷と高速載荷との比較

Fig. 9 に静的と高速載荷時の荷重～変位関係の比較を示す。一般に、高速載荷時の最大耐力は約 5～10% 程度

Fig. 9. Load-displacement relation (comparison between static and high speed loadings).

type	static loading	high speed loading
A Bond PC beam	①separation of mortar ②fracture of PC tendon (ultimate limit)	①separation of mortar ②fracture of PC tendon (ultimate limit)
B Imperfect bond PC beam	①separation of mortar ②fracture of PC tendon (ultimate limit)	①separation of mortar ②fracture of PC tendon (ultimate limit)
C Unbond PC beam	①mortar crushing (ultimate limit) ②fracture of PC tendon (final stage)	①separation of mortar ②fracture of PC tendon (ultimate limit)
D Bond PRC beam	①separation of mortar ②fracture of PC tendon (ultimate limit) ③fracture of rebar (final stage)	①separation of mortar ②fracture of PC tendon (ultimate limit) ③fracture of rebar (final stage)
E Imperfect bond PRC beam	①separation of mortar ②fracture of PC tendon (ultimate limit) ③fracture of rebar (final stage)	①separation of mortar ②fracture of PC tendon (ultimate limit) ③fracture of rebar (final stage)
F Unbond PRC beam	①separation of mortar ②fracture of rebar (ultimate limit) ③fracture of PC tendon (final stage)	①separation of mortar ②fracture of rebar (ultimate limit) ③fracture of PC tendon (final stage)

Fig. 10. Failure mode.

静的に比べ増大しており, これは, いわゆるひずみ速度効果に起因するものと思われる. 一方, 静的と高速載荷時の終局変位を比較してみると, 高速載荷時に C タイプ (アンボンド PC はり) を除き一般に小さくなる傾向にある. この理由はコンクリート材料が高速に変形する場合, 例えば $\dot{\epsilon} = 10^0$ では約 5 割程度強度が増加するのに対して, PC 鋼材では 1 割程度しか増加しない. よって, 静的載荷時に比して中立軸の位置は圧縮縁側に移動することになり, PC 鋼材の引張ひずみは静的に比して大きくなることが考えられる. この効果によって, 高速載荷時の PC 鋼材の破断変位が小さくなったものと考えられる. 以上のことから, 高速載荷時の最大耐力は静的に比べわずかに増加し, 高速載荷時の終局変位は一般に減少する傾向にあると考えられる.

3・5 破壊形態の比較

Fig. 10 にすべての供試体の破壊形態をまとめて示した. 静的載荷時の破壊形態では, A タイプ, B タイプとも終局限界は PC 鋼材の破断によるもので, C タイプはモルタルの圧壊によるものであった. またひび割れ発生状況を見ると, アンボンドの C タイプの方が A, B タイプよりもひび割れ本数が少ないことが注目される. これは, C タイプの場合 PC 鋼材とモルタル間に付着がないため, 一個所にひび割れが生じるとその部分が大きく進展し, 他にひび割れが分散しないためと考えられる. さらに, 静的と高速載荷時とで比較すると, 高速載荷時にわずかなではあるがひび割れ分布が狭くなり, ひび割れ本数も静的よりも減少していることが認められる. この原因は, 高速載荷時に PC 鋼材とモルタル間の付着力が静的に比較して増大するため PC 鋼材がすべりにくくなり, ひび割れが分散しにくくなるものと考えられる.

一方, PRC はりの破壊形態を見ると, D (ボンド PRC), E (不完全ボンド PRC) タイプは PC 鋼材の破断によって終局限界となっているが, アンボンドの F タイプは引張鉄筋の破断によって終局限界となっている点が異なる. これは, D および E タイプが PC 鋼材および引張鉄筋のいずれも付着があることから, 破断伸びの小さな PC 鋼材が先に破断したのに対し, F タイプは PC 鋼材がアンボンド化されていることから, PC 鋼材のひずみが平均化されることによりひずみの増加が遅くなり, 付着のある引張鉄筋のひずみが載荷点部で増大し先に破断するためと考えられる.

しかし, 最終状況では D および E タイプでは下段の鉄筋も破断し, F タイプでは上段のアンボンド化された PC 鋼材も破断している. また, D, E タイプのひび割れ発生状況を比較すると, 大きな違いは見られないことから, 下段に配筋した引張鉄筋の付着の影響によりひび割れを分散させる効果が十分あったものと考えられる.

ここで, アンボンドの C および F タイプは最終破壊状態において PC 鋼材が破断した際, はり両端の定着部が飛散した. この飛散防止のため Fig. 2 のように鋼材先端にラバーを接着させた楯となる鋼板治具をはり両端に設置している. ただし, 定着部での PC 鋼材の破断や定着

Fig. 11. Strain distribution of PC tendon under high speed loading.

(experiment : $\triangle$ 5ms, $\square$ 10ms, $\circ$ 15ms, $\diamond$ 20ms, analysis¹⁰⁾ : —)

具の破損等は生じていない.

3・6 PC 鋼棒のひずみ分布の比較

アンボンド PC と PRC はりの終局変位が増大する原因を調べるため, ここでは PC 鋼棒 ($\phi 9.0\text{mm}$) にひずみゲージを Fig. 3 のように 4 ヶ所貼付してはり軸方向のひずみ分布を計測した. 一例として, Fig. 11 (a), (b), (c) にボンド PRC はり (D タイプ), 不完全ボンド PRC はり (E タイプ) とアンボンド PRC はり (F タイプ) の高速載荷時の PC 鋼棒のひずみ分布を示す. Fig. 11 (a), (b) の D タイプおよび E タイプのひずみは, 載荷点中央部のみ急激に増加し, 載荷点直下から離れた位置のひずみはほとんど増加していない. 一方, Fig. 11 (c) の F タイプのひずみは, はり全体にわたりほぼ均等にひずみが増加している. このことから, ボンドおよび不完全ボンド状態のはりは, 載荷点直下でのひずみが早期に破断ひずみに到達するので終局変位が小さくなり, 一方のアンボンド状態のはりは, PC 鋼棒に生じるひずみがはり全体に平均化されて破断ひずみに到達する時間が遅れ, それが原因で終局変位が大きくなることがわかる.

4 結 論

本研究は, 付着方式を変えた PC および PRC はりに対するそれぞれの静的および高速載荷実験を行い, それらの終局限界特性について調べたものである.

Table III. Characteristic of bond and unbond PC PRC beams.

Type	Characteristic (①flexural resistance, ②toughness, ③crack distribution, ④stress variation of edge anchor)			
Bond PC beam	①ordinary,	②ordinary,	③ordinary,	④negligible
Unbond PC beam	①ordinary,	②good,	③concentration,	④caution
Bond PRC beam	①ordinary,	②ordinary,	③good,	④negligible
Unbond PRC beam	①ordinary,	②good,	③good,	④caution

(1) 静的および高速載荷のいずれにおいても、アンボンドの PC および PRC はりが最も終局変位が大きくなることが認められた。

(2) PC はりと PRC はりの終局限界を比較すると、ボンド、不完全ボンドタイプでは PRC はりのじん性が優れていることが確認されたが、アンボンドタイプではあまり差がないことが認められた。

(3) 高速載荷時の最大耐力はひずみ速度の影響により静的に比べわずかに増加するが、高速載荷時の終局変位は一般に小さくなることが認められた。

(4) 静的と高速載荷時の終局限界時の破壊形態を比較した結果、PC はりでは、静的の C タイプ（アンボンド）のモルタル圧壊を除き、すべて PC 鋼材の破断によって終局限界になったのに対し、PRC はりでは、ボンド・不完全ボンドの場合 PC 鋼材の破断、アンボンドの場合鉄筋の破断と異なった終局限界を示した。

(5) ボンド状態での PC 鋼材のひずみ分布は局所的であるのに対し、アンボンド状態のひずみ分布は平均化されていることが認められ、アンボンドの場合の終局変位が大きくなる原因を究明することができた。しかし、アンボンド化の場合、PC 鋼材が破断し、定着部の飛散という危険な状態が生ずる可能性があるため、実用化にあたっては定着部に飛散防止用のゴムの着用などの工夫が必要である。

以上よりボンドおよびアンボンド PC、PRC はりの特性をまとめると Table III のようになる。

本研究を行うにあたり、実験供試体を提供して頂いた日本サミコンの小林一隆氏をはじめ、研究所の皆様から感謝申し上げる。また、実験では西松建設の原田耕司氏、防衛大学校研究科学生 黒木勇人氏、長屋秀和氏のご援助をいただいた。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 鈴木計夫, 藤岡正見, セメント技術年報, **31**, 447 (1977).
- 2) 日本建築学会, “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”, p.132 (1986).
- 3) 園林栄喜, 小林一隆, 香月 智, 石川信隆, 構造工学論文集, **42A**, 1235 (1996).
- 4) 園林栄喜, 園田佳巨, 小林一隆, 石川信隆, 佐藤弘史, 土木学会第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム論文集, p.315 (1996).
- 5) 土木学会, “構造物の衝撃挙動と設計法”, p.35 (1993).
- 6) S. K. Ghosh and M. Z. Cohn, IABSE Publications, **34**, 1 (1974).
- 7) 岡本 伸, プレストレストコンクリート, **21**, 4 (1979).
- 8) 本岡順二郎, 末次宏光, 浜原正行, プレストレストコンクリート, **25**, 4 (1983).
- 9) 鈴木計夫, 中塚 佑, 井上和政, 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**, 193 (1988).
- 10) 園林栄喜, 香月 智, 石川信隆, 太田俊昭, 構造工学論文集, **45A** (1999).