

論文 移動荷重を受ける超高強度繊維補強コンクリートはり部材の力学特性に関する実験研究

水口 和彦^{*1}・木田 哲量^{*2}・阿部 忠^{*3}・田中 敏嗣^{*4}

要旨：近年，構造用材料の中で高強度セメント系マトリックスを高強度鋼繊維で補強した超高強度繊維補強コンクリート（RPC）が注目されている。本研究では，RPC の力学特性を明確にするために，RPC からなる高さの異なる 3 種類のはり部材に (1) 静荷重曲げ実験，(2) 移動荷重実験を行い，その耐力および破壊メカニズムに関する検討を行った。また，終局状態時の曲げモーメントを算出し比較検討した。

キーワード：RPC，移動荷重，破壊メカニズム，耐力，曲げモーメント

1. はじめに

近年，鉄筋コンクリート部材は，長大スパン橋や高層建築物の建設のために高強度化が求められており，圧縮強度 100 N/mm^2 を越える超高強度コンクリートが実構造物に採用されている¹⁾。しかし，コンクリートの特性として，高強度になるほど脆性的な破壊が生じるという問題²⁾があり，その対応策のひとつとして，高強度セメント系マトリックスを高強度鋼繊維で補強した反応性粉体コンクリート（以下 RPC と称す）が注目されている。RPC は粗骨材を使用せず，セメント，珪石質微粉末，細骨材および鋼繊維を使用した複合材料であり，粉体の最密充填による低水結合材比および高温養生によって 200 N/mm^2 までの圧縮強度を可能とした新材料である。

本研究は，RPC を床版，主桁などの橋梁部材に使用する場合を想定し，連続的に移動する荷重が作用した場合の RPC の力学特性を明確にするために，高さの異なる 3 種類のはり部材に対し，(1) 静荷重曲げ実験，(2) 移動荷重実験を行い，その耐力および破壊メカニズムから RPC の力学特性を検討するとともに，移動荷重が及

ぼす影響を検討したものである。

2. 供試体作製

2.1 使用材料

RPC 供試体は，ポルトランドセメント，シリカフュームおよび珪砂粉末などの粉体をプレミックス配合したもの(太平洋セメント(株)製，ダクトアルプレミックス DP-200)に，減水剤，水および超高強度鋼繊維 ($\phi 0.2 \text{ mm}$ ，長さ $L=15 \text{ mm}$)を練り混ぜた混練物で作製した長方形はり(無筋)である。ここで，今回の実験に用いた供試体の配合を表-1に示す。

2.2 RPC の特徴³⁾

RPC は，水を水和反応限界に留めることが可能であり，最密充填の概念により粒度調節がなされている。そのため，鋼繊維を混合する前後で流動性が変化することなく自己充填機能を有している。また，減水剤を多量に使用している

表-1 RPC の配合表(kg/m^3)

水	高強度鋼繊維	減水剤	ダクトアルプレミックス
180	157	26	2254

表-2 RPC の強度特性(N/mm^2)

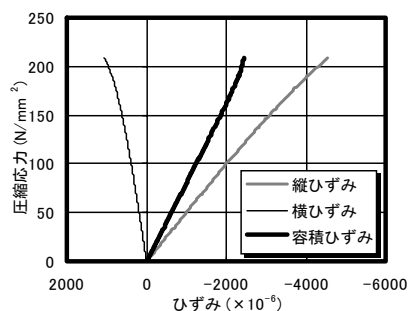
曲げ引張強度	圧縮強度	引張強度	ひび割れ発生強度
25.5	216.3	11.8	7.3

*1 日本大学 生産工学部土木工学科研究員 博士(工学) (正会員)

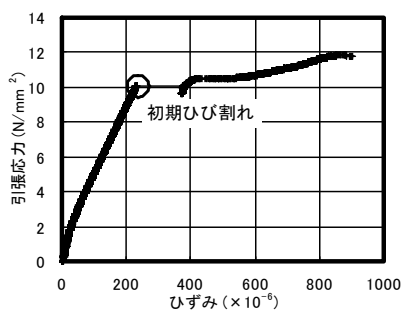
*2 日本大学 生産工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

*3 日本大学 生産工学部土木工学科教授 博士(工学) (正会員)

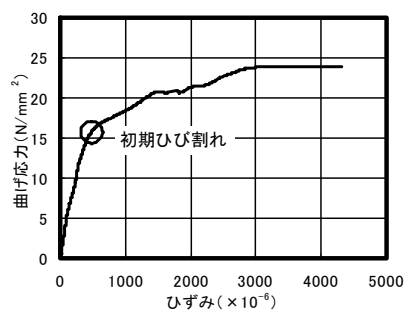
*4 太平洋セメント株式会社 中央研究所ダクトアル技術開発リーダー 博士(工学) (正会員)



図－１ 圧縮応力-ひずみ



図－２ 引張応力-ひずみ



図－３ 曲げ応力-ひずみ

ため、凝結時間が 18～20 時間と長く、打設後は、常温で 48 時間養生(1 次養生)、その後 48 時間 90 度の蒸気養生(2 次養生)を行う。

2 次養生後は、初期ひび割れが生じた後も鋼繊維の架橋効果によりひび割れが抑制され、曲げ抵抗が増大し、最大応力到達後にも延性的な曲げ特性を示す。また、付着強度が高く、鋼繊維の弾性率が高いため、初期ひび割れ後に応力の一時低下や変位の急激な増加は見られず、曲げ抵抗が増大する⁴⁾。

2.3 RPCの強度特性

2 次養生後の 100×100×400mm 供試体を用いた曲げ試験(JIS R 5201)、φ100×200mm 供試体を用いた圧縮試験(JIS A 1108)および割裂引張強度試験(JIS A 1113)の結果を表－2に示す。また、圧縮試験による圧縮応力とひずみの関係を図－1、割裂引張強度試験による引張応力と引張ひずみの関係を図－2、曲げ試験による曲げ応力と支間中央の下面ひずみの関係を図－3に示す。

図－1より、RPCのひずみ増加をみると、一般の普通コンクリートの場合の終局圧縮ひずみは 2100×10^{-6} 程度⁵⁾とされているが、それに比べると約2倍程度と大きな変形を示しており、変形能に優れていることがわかる。また、体積ひずみが終局時まで線形的な挙動を示していることから、普通コンクリートに見られる臨界点⁶⁾は存在しないことがわかる。これは、RPCに粗骨材が混入されていないため、ボンドクラック(粗骨材とモルタル部分の境界に生ずるクラック)が生じないためであると考えられる。なお、割線静弾性係数(JIS A 1149)から算出した弾性



図－４ 走行振動試験装置

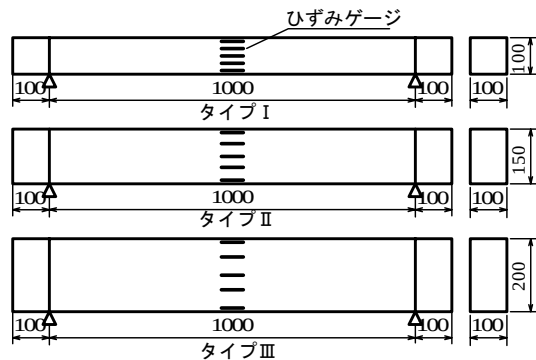
係数は、 51.2 kN/mm^2 である。

図－2より、RPCの引張応力-ひずみ関係は初期段階においては、線形弾性の仮定が成り立つが、荷重が大きくなると、急激にひずみが増加していることがわかる。表－2に示した値は、線形弾性の仮定が成り立たなくなる際の応力をひび割れ発生強度、ひび割れ発生後の最大応力を引張強度と定めたものであり、ひび割れ発生時のひずみ値は約 244×10^{-6} であった。

図－3より、RPCは初期ひび割れ発生後にも、曲げ応力が増大していることがわかる。これは、金属材料が降伏後に示すひずみ挙動に類似しており、鋼繊維の架橋効果により、ひび割れが抑制されて耐力が保持されたことが考えられる。また、初期ひび割れ発生後、曲げ応力の急激な低下が見られないことから、鋼繊維の付着強度および弾性率が高く⁷⁾、外力に抵抗しているものと考えられる。以上の結果から、RPCは高強度、高じん性を有する構造材料であることがわかる。

2.4 供試体寸法

本実験の供試体の寸法は、支間長 1000mm、幅 100mm とし、高さはタイプ I の場合 100mm、



図－５ 供試体寸法

タイプⅡの場合 150mm, タイプⅢの場合 200mm とし、高さの異なる 3 種類のはり部材とした。ここで、供試体の形状を図－５に示す。

3. 実験概要

3.1 走行振動試験装置⁸⁾

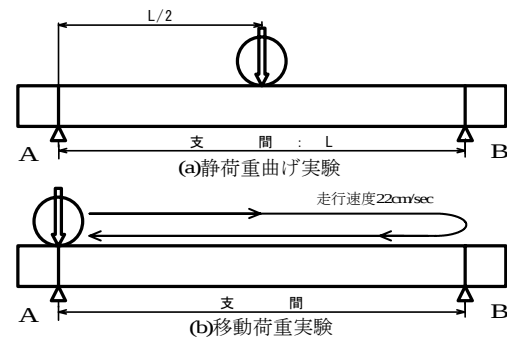
本実験に用いた走行振動試験装置は、鋼製反力フレーム（400kN）のほりに、鋼製の車輪を取り付けた油圧式の振動疲労試験機を固定し、供試体を設置した台車をモーターとクランクアームにより水平方向へ往復運動させて荷重の走行状態を再現するものである。すなわち、この試験装置は、(1)鉛直方向の荷重載荷装置、(2)供試体を設置する台車、(3)台車を水平方向へ往復運動させる装置、より構成されている。走行振動試験装置を図－４に示す。

(1) 静荷重曲げ実験 (M)

静荷重曲げ実験は、図－６ (a) に示すように最大応力が生じる支間中央に車輪を静止した状態で載荷する実験である。荷重は供試体が破壊するまで 5.0kN ずつ増加させることとし、第一回目は 0.0kN から最大荷重 5.0kN, 二回目は 0.0kN から最大荷重 10.0kN のように破壊に至るまで繰り返し載荷を行う。

(2) 移動荷重実験 (R)

移動荷重実験は、図－６ (b) に示すように、支点 A に輪荷重を静止した状態で載荷させた後に走行を開始させて支点 B を折り返し、支点 A に戻るまでを一往復とする走行載荷である。走行速度は 22cm/sec とし、一往復ごとに荷重を 5.0kN ずつ増加し、供試体が破壊するまで走行



図－６ 実験方法

と荷重増加を繰り返す実験である。

4. 破壊メカニズム

本実験における供試体破壊時のひび割れ状況の一例を図－７に示す。なお、微細なひび割れが多く生じたことから、静荷重曲げ実験および移動荷重実験では、ひび割れ損傷の著しい支間中央 60cm 付近までを表示することとする。

静荷重曲げ実験の場合は、タイプⅠ・Ⅱ・Ⅲともに荷重の増加に伴って載荷位置直下においても比較的分散してひび割れが生じ、最終的に曲げ破壊に至った。これは、鋼繊維の架橋効果によって曲げひび割れが抑制されたために応力が広範囲に分散されたためであると考えられる。

次に、移動荷重実験の場合は、荷重走行中に支間中央付近に多数の微小ひび割れが生じ、最終的に曲げ破壊に至った。特に顕著な特徴としては、断面高さが小さいほど広範囲にひび割れが分散していることである。これは、供試体高さに起因したものと考えられ、供試体高さが低いほど移動荷重に対し、曲げ剛性が小さいためにたわみやすく、かつ、架橋効果が発揮されてひび割れ箇所における分散効果が顕著に現れたためと考えられる。

また、静荷重曲げ載荷時と移動荷重載荷時とのひび割れ状況を比較すると、移動荷重が作用した場合の方が、微小ひび割れがより多く生じており、RPC の特徴である鋼繊維による架橋効果が十分に発揮されていることがわかる。このような観点からみても、RPC は移動荷重など連続的に荷重が作用する部材には優れた構造材料

であると考えられる。

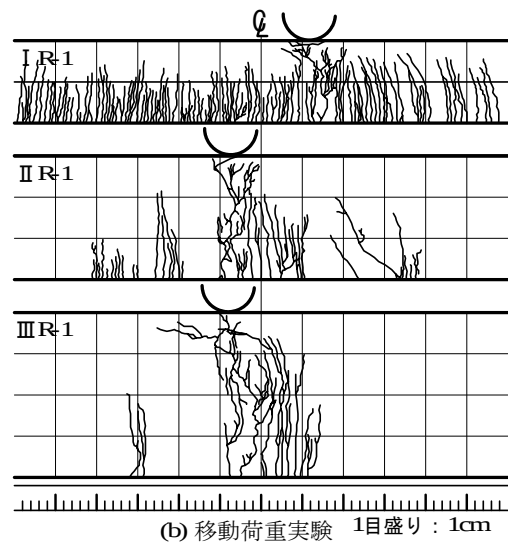
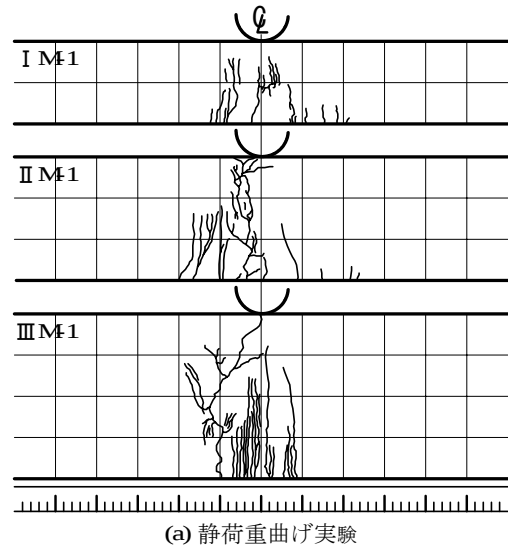
5. 供試体耐力

本実験における耐力および破壊モードを表－3に示す。静荷重曲げ実験の場合，最大耐力の平均値はタイプⅠ・Ⅱ・Ⅲで，それぞれ 25.1kN，47.7kN，77.5kN となった。同様に移動荷重実験の場合，タイプⅠ・Ⅱ・Ⅲで，それぞれ 25.2kN，47.4kN，75.4kN となっており，各実験ともにはりの断面高さが増すにつれて耐力の増加がみられる。なお，移動荷重実験のタイプⅢの耐力にばらつきが生じた要因には，供試体走行面の不陸により衝撃力が作用したことや，超高強度繊維補強コンクリートの場合，その材料強度特性として，曲げ強度などで 10%程度の強度差が生じることなどの報告がなされていることから³⁾，これらの影響が考えられるので，今後も継続実験を行って検討することにする。

次に，移動荷重実験では，全供試体ともに曲げ破壊に至ったことから，静荷重曲げ実験の場合と耐力を比較すると，各タイプともに比較的近似した値を示しており，移動荷重が作用することによる耐力の低下はみられなかった。このことは，既往の鉄筋コンクリートの場合の研究によると，移動荷重が作用することにより約 10%程度耐力が低下することが報告⁹⁾されていることから，RPC が移動荷重のように連続的な荷重に対しても有効な構造材料であることを示している。

表－3 耐力および破壊モード

供試体	最大耐力 (kN)		耐力比	破壊モード
	実験値	平均値		
Ⅰ M-1	25.2	25.1	—	曲げ
Ⅰ M-2	25.0			
Ⅰ R-1	25.3	25.2	1.01(Ⅰ R/Ⅰ M)	曲げ
Ⅰ R-2	25.1			
Ⅱ M-1	49.5	47.7	1.90(Ⅱ M/Ⅰ M)	曲げ
Ⅱ M-2	45.8			
Ⅱ R-1	50.0	47.4	0.99(Ⅱ R/Ⅱ M) 1.88(Ⅱ R/Ⅰ R)	曲げ
Ⅱ R-2	44.8			
Ⅲ M-1	74.8	77.5	3.09(Ⅲ M/Ⅰ M)	曲げ
Ⅲ M-2	80.2			
Ⅲ R-1	84.6	75.4	0.97(Ⅲ R/Ⅲ M) 2.99(Ⅲ R/Ⅰ R)	曲げ
Ⅲ R-2	66.1			



図－7 ひび割れ図

6. 荷重とたわみ関係

図－8は，支間中央における荷重とたわみの関係である。図－8(a)，(b)より，全ての供試体において初期ひび割れ後にも荷重増加に伴うたわみの増加が見られた。

次に，静荷重曲げ実験(図－8(a))の最大荷重時のたわみの平均値は，タイプⅠ 2.46mm，タイプⅡ 2.19mm，タイプⅢ 1.72mm であり，支間長との比は，それぞれ 1/410，1/460，1/580 である。また，移動荷重実験(図－8(b))における最大荷重時のたわみの平均値は，タイプⅠ 3.45mm，タイプⅡ 3.11mm，タイプⅢ 1.62mm であり，支間長との比は，それぞれ 1/290，1/320，1/620 である。以上の結果より，RPC も普通コンクリートと同様に，断面高が大きくなるにつれて剛性が向上していることがわかる。

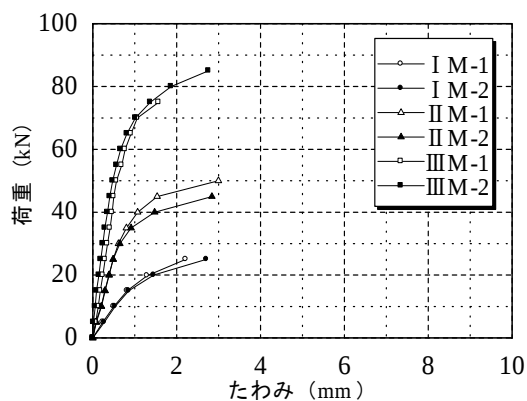
7. 断面のひずみ分布および中立軸

供試体中央側面に貼付したひずみゲージで計測したひずみ分布を図-9に示す。図-9より、各供試体ともに荷重の増加に伴ってひずみが増大し、中立軸が断面中央部から上方部へ移動していることがわかる。これは、RPCの圧縮強度が引張強度に比べ非常に大きいことを示唆している。そのため、圧縮域においては最大荷重時まで線形的な応力分布を示しているが、引張域においては荷重の増加にともない急激なひずみの増加が下面にみられる。静荷重曲げ実験のひずみ分布が直線形を示さなくなる弾性限界強度において、ひずみ分布線を延長し、引張縁ひずみを推定すると $227 \sim 297 \times 10^{-6}$ である。これは割裂引張強度試験における初期ひび割れ発生ひずみと同等である。

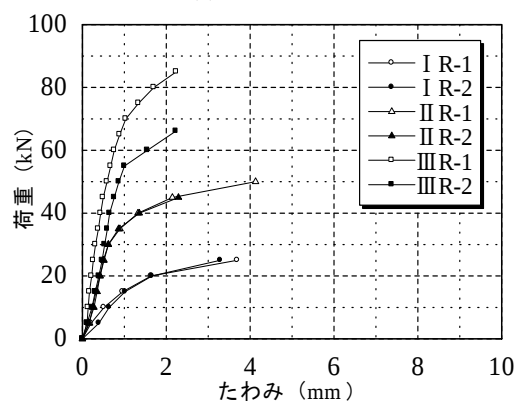
一方、最大荷重時の中立軸と断面高の比は、静荷重の場合で、タイプⅠ・Ⅱ・Ⅲそれぞれで0.89, 0.85, 0.84であり、平均すると0.86である。同様に移動荷重実験の場合の比は、それぞれ0.70, 0.80, 0.75であり、平均すると0.75である。また、静荷重の場合と移動荷重の場合の中立軸位置を比較すると、静荷重のほうが平均11%程度圧縮側に上昇する結果となった。

8. 断面曲げ解析

前章の結果より、終局時におけるRPCはりの



(a) 静荷重曲げ実験



(b) 移動荷重実験

図-8 荷重とたわみの関係

ひずみ分布は、圧縮域ではほぼ直線分布をなし、引張域では下面に大きなひずみの増加がみられたことから、終局時における圧縮側の応力分布を常に直線形、引張側を完全剛塑性モデル(図-10)と仮定し、以下の式により抵抗曲げモーメントを算出する。なお、完全剛塑性モデルの引張応力は割裂引張強度試験によるものとし、中立

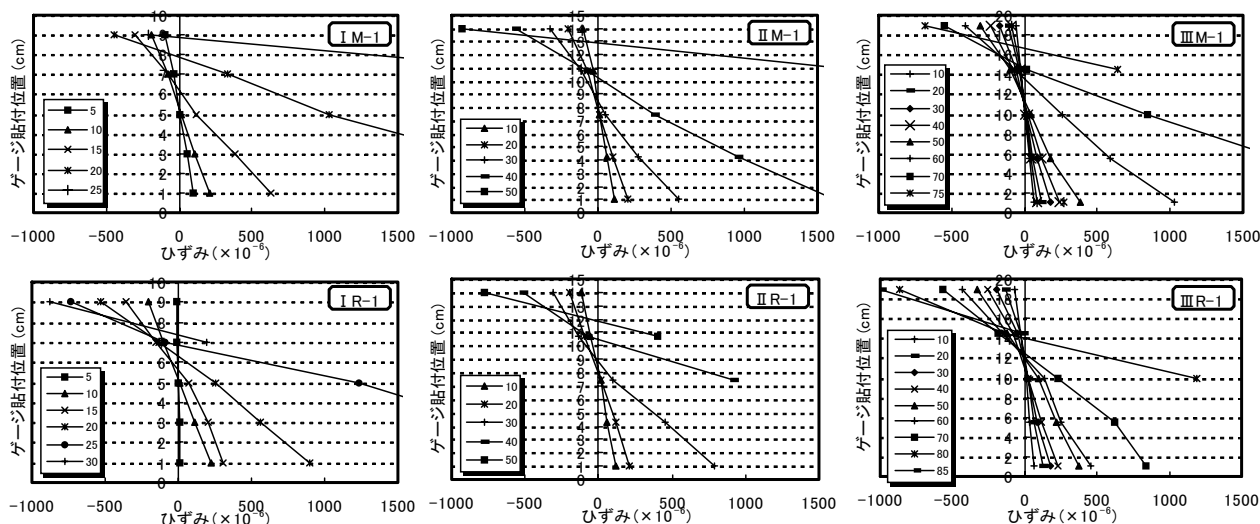


図-9 ひずみ分布図

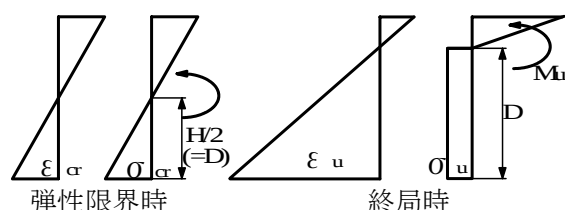


図-10 ひずみ分布と応力分布

表-4 最大曲げモーメント

供試体	最大曲げモーメント		モーメント比 M/Mu
	実験値:M (N・m)	理論値:Mu (N・m)	
I M	6275	5311	1.18
II M	11925	11949	1.00
III M	19375	21243	0.91
I R	6300	4794	1.31
II R	11850	10786	1.10
III R	18850	19175	0.98

軸位置は前章より求めた値を用いることとする。

$$Mu = f_t \cdot D \left(\frac{2}{3} - \frac{D}{6} \right) B \cdot H^2 \quad (1)$$

ここで、 f_t : 引張強度、 D : 中立軸と断面高の比、 H : はり高さ、 B : はり幅

終局時における曲げモーメントの実験値と理論値の関係を表-4に示す。表-4より、実験値と理論値を比較すると、各供試体ともに概ね一致する結果を示したが、各供試体ともに断面高が大きくなるに伴って理論値が実験値を上回る傾向にある。これは、解析における引張強度の取扱いおよび断面寸法効果による影響と考えられるが、この解明に関しては今後更なる検討を行いたいと考える。

9. まとめ

- (1)圧縮試験の応力-ひずみ関係から、RPC はヤング係数が高くなるにも関わらず、圧縮・引張の変形能力が大きく、普通コンクリートに比して約2倍程度の変形量を示す。
- (2)RPCは初期ひび割れ発生後も耐力の増加がみられ、微小ひび割れが生じた後に曲げ破壊に至った。これは、繊維の架橋効果が顕著に現れることを示唆している。
- (3)移動荷重実験では、断面高さの小さい供試体ほど支間全体の広範囲にわたってひび割れが分散する結果となった。

(4)本実験の範囲内においては、移動荷重の場合と静荷重の場合の耐力および最大荷重時たわみに大きな差異はみられなかった。

(5)最大荷重時の中立軸と断面高の比は、静荷重の場合 0.86、移動荷重の場合 0.75 となり、完全剛塑性モデルにより、最大曲げモーメントを算出できる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、実験に協力いただいた日本大学大学院生産工学研究科の畑秀彦院生に対し、ここに付記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 武者浩透ほか：無機系複合材料(RPC)を用いた酒田みらい橋の設計と施工，橋梁と基礎，Vol.36，No.11，2002.11，pp.5-6
- 2) 結城和宏ほか：高強度鋼繊維コンクリートの破壊靱性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.17，No.1，2002，pp.445-451
- 3) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)，丸善(株)，2004.9
- 4) 社団法人日本コンクリート工学協会：高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う，高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書，2002.1，pp.4-49
- 5) 畑野正：コンクリートの如き脆性体のひずみに立脚した破壊論，土木学会論文報告集，第 153 号，1968，pp.31-39
- 6) 加藤清志：プレーンコンクリートの微小ひびわれと物性評価，土木学会論文報告集，第 208 号，1972.12，pp.121-136
- 7) 真島光保ほか：繊維補強セメント／コンクリート複合材料，技報堂出版株式会社，1994.5，pp.23-32
- 8) 阿部忠ほか：走行振動試験装置の性能検証に関わる RC はりの走行実験研究，日本大学生産工学部研究報告 A，第 34 号第 2 巻，2001.12，pp.1-10
- 9) 阿部忠ほか：走行荷重が作用する RC はりの曲げ耐力と動的影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集 Vol.22 No.3，2000，pp.763-768