

論文 移動荷重を受ける反応性粉体コンクリートの力学性状に関する実験研究

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

要旨：近年，構造物の大型化・高耐力化に対応するために使用材料の高強度化・高じん性化が求められている。本研究では，圧縮強度 200N/mm^2 を有する繊維補強セメント系材料である RPC (Reactive Powder Concrete：反応性粉体コンクリート)を用いて作製した高さの異なる3種類のはり部材に，①静荷重曲げ実験，②静荷重せん断実験，③移動荷重実験を行い，移動荷重が及ぼす影響を破壊形状および耐力から検討し，有用な知見を得た。

キーワード：反応性粉体コンクリート，移動荷重，破壊メカニズム，耐力，寸法効果

1. はじめに

近年，鉄筋コンクリート部材は，長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 100N/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きている。しかし，コンクリートの特性には，高強度になるほど脆性的な破壊が生じるという問題¹⁾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により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 200N/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静荷重せん断実験，③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

表-1 RPCの配合表 (単位: kg/m^3)

水	高強度鋼繊維	減水剤	プレミックス粉体
180	157	26	2254

表-2 RPCの材料強度特性

圧縮強度 N/mm^2	曲げ強度 N/mm^2	フロー値
215.5	33.0	276×261

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，シリカフェ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，ダクタールFM)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，配

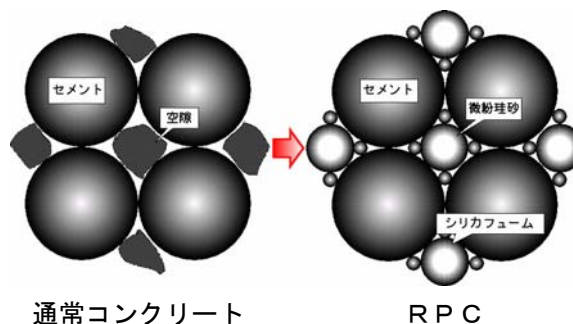


図-1 RPCの最密充填のイメージ

*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 工学博士 (正会員)

*3 日本大学 生産工学部土木工学科助教授 (正会員)

*4 太平洋セメント株式会社 中央研究所第1研究部主任研究員 博士(工学) (正会員)

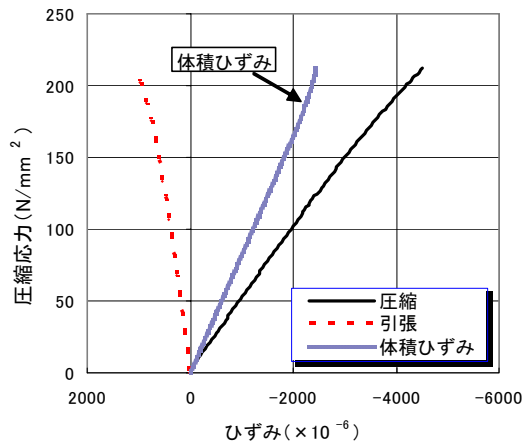


図-2 応力ひずみ関係

合を表-1に示す。

2.2 RPCの特徴²⁾

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(図-1)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することなく曲げ抵抗が増大する³⁾。

2.3 RPCの強度特性

練り上がり直後のフロー値および蒸気養生後の4×4×16cm供試体を用いた曲げ試験(JISR5201)、φ5×10cm供試体を用いた圧縮試験の結果を表-2に、圧縮試験より得た応力ひずみの関係を図-2に示す。なお、図-2に示した値は、供試体3本の圧縮試験を行い、その結果を平均したものである。

図-2より、RPCはヤング係数が高く、ひずみの増加量に関しては、一般に普通コンクリートの場合、終局圧縮ひずみは 2100×10^{-6} 程度⁴⁾とされているが、それに比して約2倍程度の大

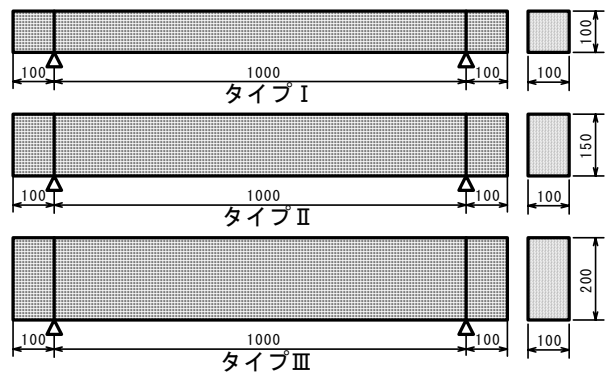


図-3 供試体形状



図-4 走行疲労試験装置

きな変形を示している。また、体積ひずみ変形は、終局に至るまで常に圧縮域にあり、原体積より縮小の一途をたどっていることがわかる。したがって、普通コンクリートのように臨界点⁵⁾(圧縮変形から膨張方向へ転ずる特異点)は発生せず、全体としての挙動は単味のモルタルのような応力ひずみ曲線上に線形的挙動を生起させる。このことは、粗骨材粒子の界面における付着破壊が生じないことに起因したものであると考えられる。

2.4 供試体寸法

本実験の供試体の寸法は、支間長100cm、幅10cmとし、高さはタイプIの場合10cm、タイプIIの場合15cm、タイプIIIの場合20cmとし、高さの異なる3種類のはり部材とした。なお、供試体の形状を図-3に示す。

3. 実験概要

3.1 走行疲労試験装置⁶⁾

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、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-5 (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) 静荷重せん断実験 (S)

静荷重せん断実験は、図-5 (b) に示すようにせん断破壊が生じる載荷位置は、一般的な RC はりでは、せん断スパン比 a/d (a : 支点 A から荷重載荷位置までの距離, d : 有効高さ) が 3.0 以下の場合とされていることから⁷⁾、本実験の載荷はタイプ II, III ではせん断スパン比 1.0 の位置に車輪を載荷させることとした。また、タイプ I の場合は、供試体高さなどを考慮し、せん断スパン比 2.5 とした。なお、荷重載荷方法は静荷重曲げ実験と同様とする。

(3) 移動荷重実験 (R)

移動荷重実験は、図-5 (c) 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-6 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走行荷重実験ではひび割れ損傷の著しい支間中

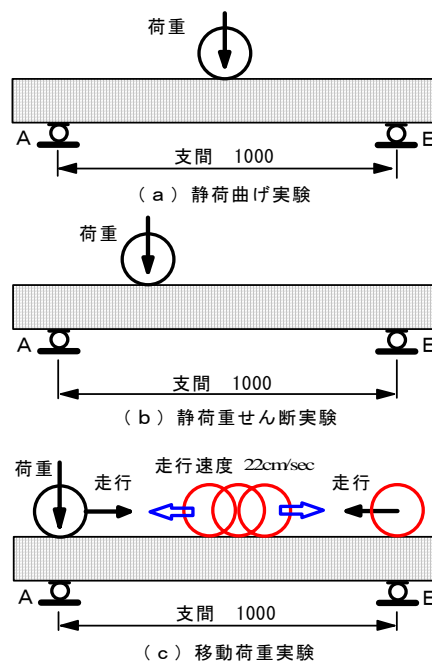


図-5 実験方法

央 60cm 付近、せん断実験においては支点から 55cm 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い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り曲げひび割れが抑制されて応力が広範囲に伝達されたためであると考えられる。

静荷重せん断実験の場合は、タイプ I・II・III ともに荷重載荷位置直下にひび割れが集中的に発生しており、最終的には曲げ破壊に至った。また、静荷重曲げ試験と比較すると、より多くの微小ひび割れがみられ、架橋効果が顕著になっている。これは、曲げとせん断の複合応力状態に起因したものと考えられ、載荷条件により曲げ応力がせん断応力よりも大きくなったためと考えられる。

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の分散が生じていることである。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、曲げ剛性が小さく

なるためにたわみやすく、かつ、架橋効果が発揮されひび割れて分散効果が顕著に現れたためと考えられる。

また、静荷重曲げ載荷と移動荷重載荷とのひび割れを比較すると、移動荷重が作用した場合の方が微小の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。これは一般的に、RC はり部材のひび割れ状況における主筋に丸鋼と異形棒鋼を使用した場合に生じるひび割れ形状の差、すなわち、異形棒鋼におけるひび割れ分散性と類似した性状を示しており、耐久性上有利であるといえる。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

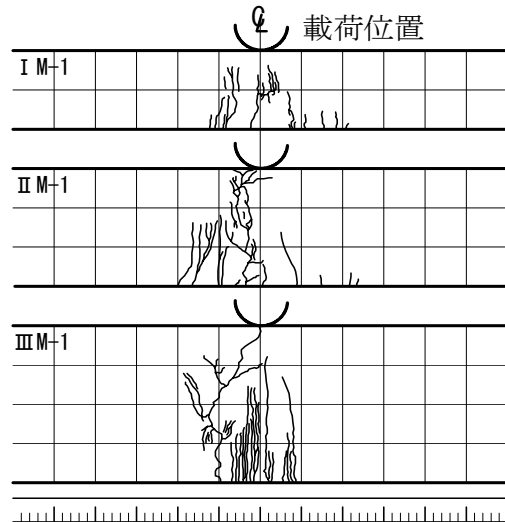
本実験における実験耐力および破壊モードを表-3に示す。

静荷重曲げ実験の場合、タイプ I の最大耐力の平均値は 25.1kN となり、タイプ II と比較 (II M/ I M) すると 1.90 倍となった。同様にタイプ III と比較すると 3.09 倍となり、断面の高さが増すにつれて耐力の増加がみられる。

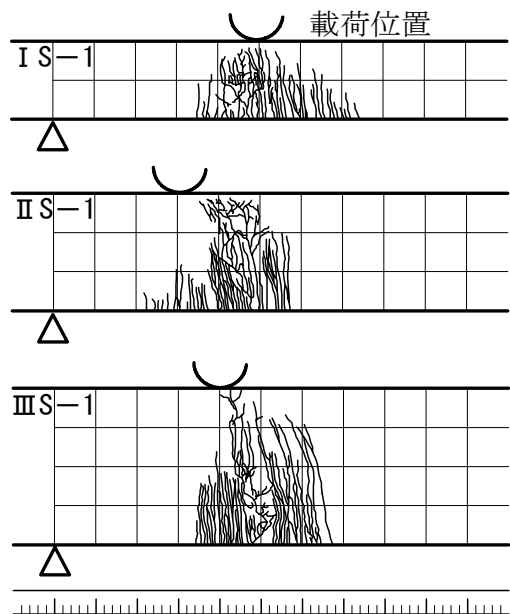
静荷重せん断実験では、最大耐力の平均はタ

表-3 供試体耐力および破壊モード

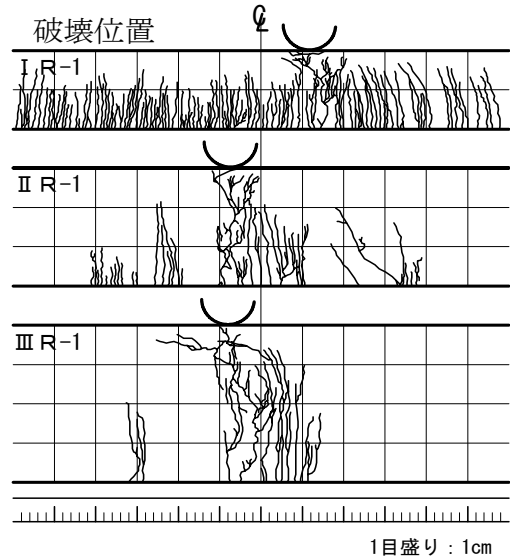
供試体	最大耐力 (kN)	平均耐力 (kN)	破壊モード
I-M-1	25.2	25.1	曲げ
I-M-2	25.0		
I-S-1	35.4	30.1	曲げ
I-S-2	24.8		
I-R-1	30.3	27.7	曲げ
I-R-2	25.1		
II-M-1	49.5	47.7	曲げ
II-M-2	45.8		
II-S-1	70.0	69.9	曲げ
II-S-2	69.8		
II-R-1	50.0	47.4	曲げ
II-R-2	44.8		
III-M-1	80.2	77.5	曲げ
III-M-2	74.8		
III-S-1	134.7	122.3	曲げ
III-S-2	110.0		
III-R-1	84.6	72.1	曲げ
III-R-2	59.6 ^{*1}		



(a) 静荷重曲げ実験



(b) 静荷重せん断実験



(c) 移動荷重実験

図-6 ひび割れ状況

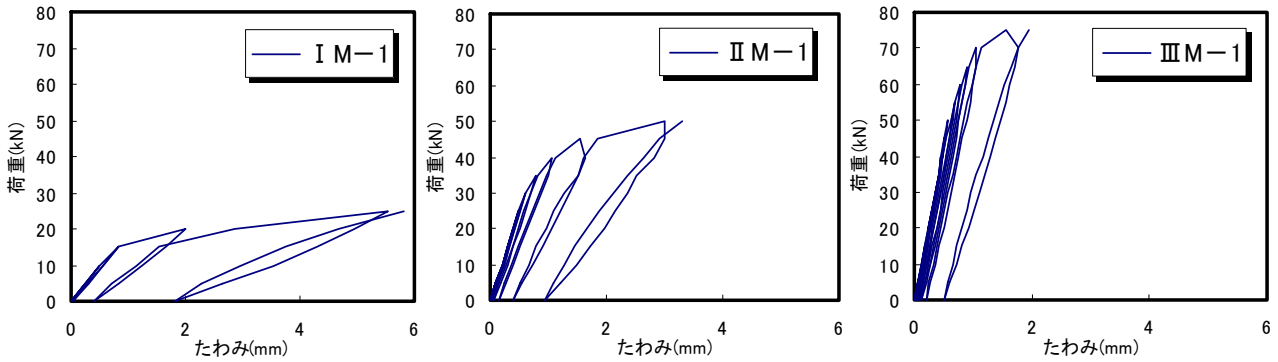


図-7 荷重-残留たわみ関係

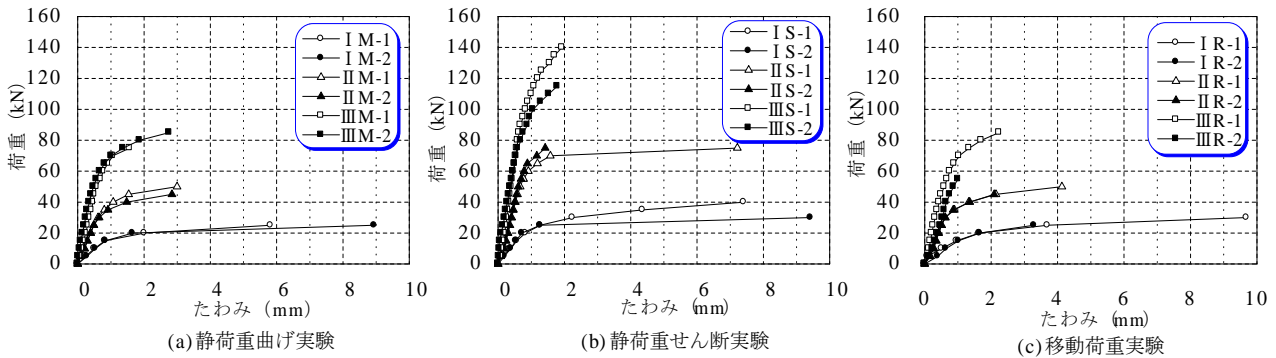


図-8 荷重-たわみ関係

タイプ I, II, III でそれぞれ 30.1kN, 69.9kN, 122.3kN となり静荷重曲げ実験同様に耐力の増加がみられる。

移動荷重実験の場合、タイプ I の最大耐力の平均値は 27.7kN となり、タイプ II と比較 (II R / I R) すると 1.71 倍となった。同様にタイプ III と比較すると 2.60 倍となった。なお、タイプ III の耐力が著しく小さい結果となった(*1)が、これは供試体の部分的な弱部の影響と推察される。

次に、移動荷重が作用した場合は、タイプ I・II・III ともに曲げ破壊となったことから静荷重に対する最大耐力と比較すると、タイプ I の場合 (I R / I M = 27.7 / 25.1) 1.10, タイプ II の場合 (II R / II M = 47.4 / 47.7) 0.99, タイプ III の場合 (III R / III M = 84.6 / 77.5) 1.09 となり、各供試体ともに比較的近似した値となっていることから移動荷重が作用することによる耐力の低下は、本実験の範囲内においては確認されなかった。

6. 曲げ実験における荷重と残留たわみ関係

図-7 は、静荷重曲げ実験における各供試体 (タイプ I, II, III) の支間中央の荷重と残留たわ

みの関係の一例である。図-7 より、残留たわみは、有効高さの増大とともに下縁応力レベルが小さくなることから、残留たわみも小さくなっていることがわかる。特に、タイプ III の場合は、破壊直前まで残留値の増加はほとんど見られず、残留値 0.5mm 程度生じた後に破壊に至っている。これは、幅方向に比し、高さが 2 倍となっていることから、終局段階まで荷重-変形関係が線形的な挙動であることを意味している。

7. 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。なお、せん断実験に関しても比較しやすいように支間中央のたわみ値を使用することとする。図-8 (a) (b) (c) より、全ての供試体において初期ひび割れ後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 7.24mm, 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 1/140, 1/460, 1/580 である。また、移動荷重実験 (図-8 (c)) による最大荷重

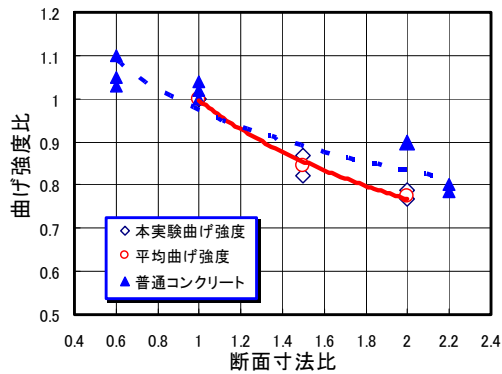


図-9 断面寸法比と曲げ強度比の関係

時のたわみの平均値は、タイプ I 6.49mm、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 1/150, 1/320, 1/620 である。以上の結果より、各実験において、断面高が大きくなるにつれて剛性が低下している。

8. 有効高さと曲げ応力の関係

静荷重曲げ実験における断面寸法比(=高さ/幅)と曲げ強度比(□100×100 の曲げ強度を基準)との関係を図-9 に示す。なお、普通コンクリートの場合と比較検討するために Wright の実験結果⁸⁾を併記した。

同図より、有効高さが増加するにつれて曲げ強度比は減少している。これは、断面の寸法効果に支配されたものと考えられる。次に、普通コンクリートと比較すると、RPC も普通コンクリートと同様な寸法効果の影響による減少傾向を示しており、比較的近似した結果となっている。なお、寸法効果による強度比に関しては、今回の実験では供試体数が少ないことから今後更なる検討を予定している。

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各供試体におけるひび割れ形状は、複数の微小ひび割れが生じている。これは、鋼繊維の架橋効果により曲げひび割れが抑制され、応力が広範囲に伝達されたためと考えられ、

RPC の特徴的なひび割れ形状を示した。

- 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の分散が生じる結果となった。
- ④RPC の断面寸法比と曲げ強度比との関係から、断面寸法比の増加につれて曲げ強度比は減少傾向にある。よって、RPC はりも普通コンクリートの場合とほぼ同様の減少傾向を示し、寸法効果の影響を受けることがわかった。

謝 辞

本研究を行うにあたり、ご討議を頂いた日大研究所加藤清志教授、また、実験に協力いただいた日大大学院の畑秀彦院生に対し、付記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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，pp.31-39，1968
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 丹羽淳一郎ほか：せん断補強筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，第 372 号 V-5，1986.8，pp.167-176
- 8) 伊藤茂富：コンクリート工学，森北出版，1972