

反応性粉体コンクリートを用いたはり部材の耐力および破壊メカニズムに関する実験的研究

日大生産工（院）○畑 秀彦
日大生産工 澤野利章

日大生産工 木田哲量
日大生産工 水口和彦

日大生産工 阿部 忠
太平洋セメント(株) 田中敏嗣

1. はじめに

近年、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、高強度化を図ることが求められており、圧縮強度 100N/mm^2 を越える高強度コンクリートが実構造物に採用されている。一方、コンクリート材料の特性として、高強度になるほど脆性的な破壊を生じる問題があり、その対応策として、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(Reactive Powder Concrete : 以下 RPC と称す)が注目されている。

そこで本研究では、RPC の力学特性を明確にすることを目的として、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、移動荷重が RPC の力学特性に及ぼす影響について考察する。

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 FM)に、減水剤、水および高強度鋼繊維($\phi 0.2\text{mm}$ 、長さ $L=15\text{mm}$)を練り混ぜた長方形はり(無筋)とする。その配合を Table 1 に示す。

2. 2 RPC の強度特性

2 次養生後の $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 供試体を用いた曲げ試験(JIS R 5201)、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 供試体を用いた圧縮試験

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)

曲げ強度	圧縮強度	引張強度	ひび割れ発生強度
25.5	216.3	13.1	7.3

験(JIS A 1108)および割裂引張強度試験(JIS A 1113)の結果を Table 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 Fig.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 Fig.2、曲げ試験による曲げ応力と引張ひずみの関係を Fig.3 に示す。

Fig.1 より、RPC は、縦・横ひずみがそれぞれ普通コンクリートに比べ約 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¹⁾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)により算出した弾性係数は、 51.2kN/mm^2 である。

次に Fig.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

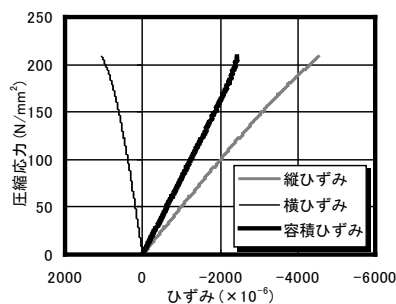


図-1 圧縮応力-ひずみ曲線

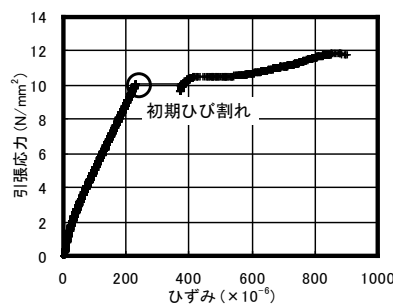


図-2 引張応力-ひずみ曲線

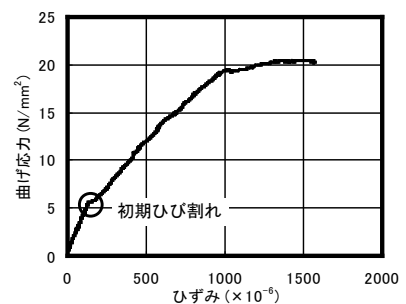
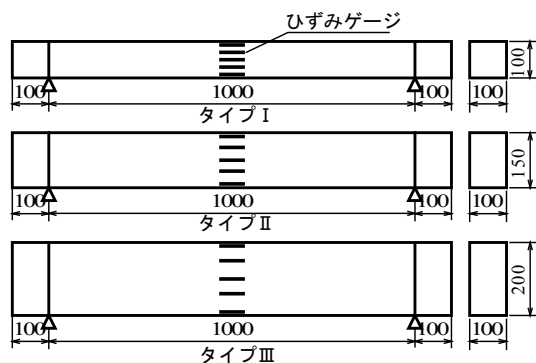


図-3 曲げ応力-ひずみ曲線

Experimental Study on Load Carrying Capacity and Failure Mechanism of Beam of Reactive Powder Concrete

by Hidehiko HATA, Tetsukazu KIDA, Tadashi ABE, Toshiaki SAWANO,
Kazuhiko MINAKUCHI and Satoshi TANAKA



図－４ 供試体寸法

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。Table 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²⁾、ひび割れ発生時のひずみ値は約 244μ であった。

次に Fig.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、たわみ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³⁾、荷重に抵抗しているものと考えられる。以上の結果から、RPC は高圧縮強度、高じん性を有する構造材料であることがわかる。

2. 3 供試体寸法

供試体寸法は、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 とした。ここで、供試体の寸法を Fig.4 に示す。

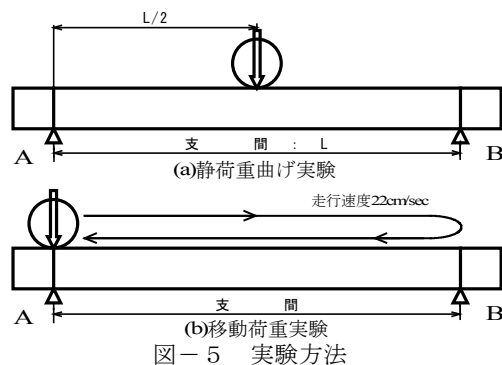
3. 実験装置の概要

3. 1 静荷重曲げ実験(M)

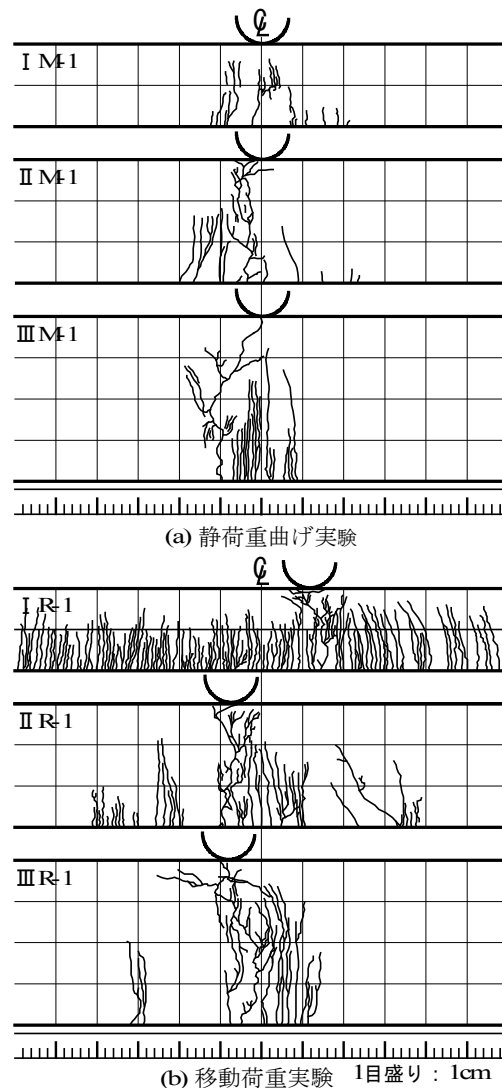
Fig.5(a)に示すように、静荷重曲げ実験は、最大応力が生じる支間中央に車輪を静止した状態で、鉛直方向に荷重を供試体が破壊するまで 5.0kN ずつ増減させることとし、一回目は 0.0kN から最大荷重 5.0kN、二回目は 0.0kN から最大荷重 10.0kN のように破壊に至るまで荷重増加と載荷を繰り返す。

3. 2 移動荷重実験(R)

Fig.5(b)に示すように、移動荷重実験は、左支点に輪荷重を静止した状態で載せ、載荷後に走行を開始させて右支点を折り返し、左支点に戻るまでを一往復とした実験である。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。



図－５ 実験方法



図－６ ひび割れ図

4. 破壊メカニズム

本実験における破壊時の支間中央付近 60cm のひび割れ状況の一例を Fig.6 に示す。Fig.6(a)に示すように、静荷重曲げ実験の場合、タイプ I・II・III とともに荷重載荷位置付近に集中的にひび割れが生じ、最終的に曲げ破壊に至った。なお、各タイプともにプレーンコンクリートに比して多数のひび割れが生じている。これは、鋼繊維の架橋効果によりひび割れが抑制され、応力が広範囲に

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	30.3	27.7	1.10(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)	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)	曲げ
III R-2	66.1			

伝達されたため生じたものと考えられる。また、タイプⅢには、複数の微小ひび割れ(以下マルチプルクラックと称す)が確認された。

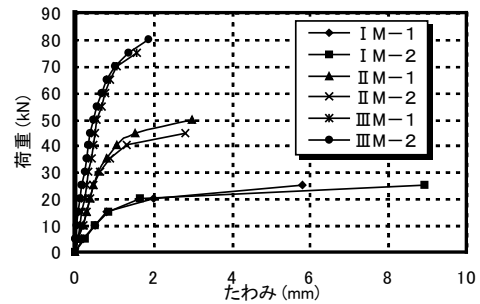
Fig.6(b)に示すように、移動荷重実験では、タイプⅠ・Ⅱ・Ⅲともに支間中央付近にマルチプルクラックが生じて最終的に曲げ破壊に至った。また、断面高さが小さいほどひび割れの分散効果が顕著にみられる。これは、断面の縮小に伴う剛性の低下により、曲率が増加したためであると考えられる。

次に、静荷重曲げ実験と移動荷重実験のひび割れ形状を比較すると、静荷重に比して移動荷重の場合が、マルチプルクラックが多く生じていることがわかる。このことから、RPCは移動荷重のように連続的な荷重に対しても、優れた性能を有すると考えられる。

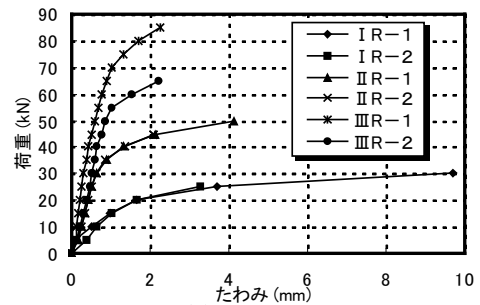
5. 耐力および破壊モード

本実験における耐力および破壊モードを Table 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ではそれぞれ 27.7kN、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、曲げ耐力において 10%程度の耐力差が生じることなどの報告がなされていることから、これらの影響が考えられるので、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



(a)静荷重曲げ実験



(b)移動荷重実験

図－7 荷重とたわみの関係

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⁴⁾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有効な構造材料であることを示している。

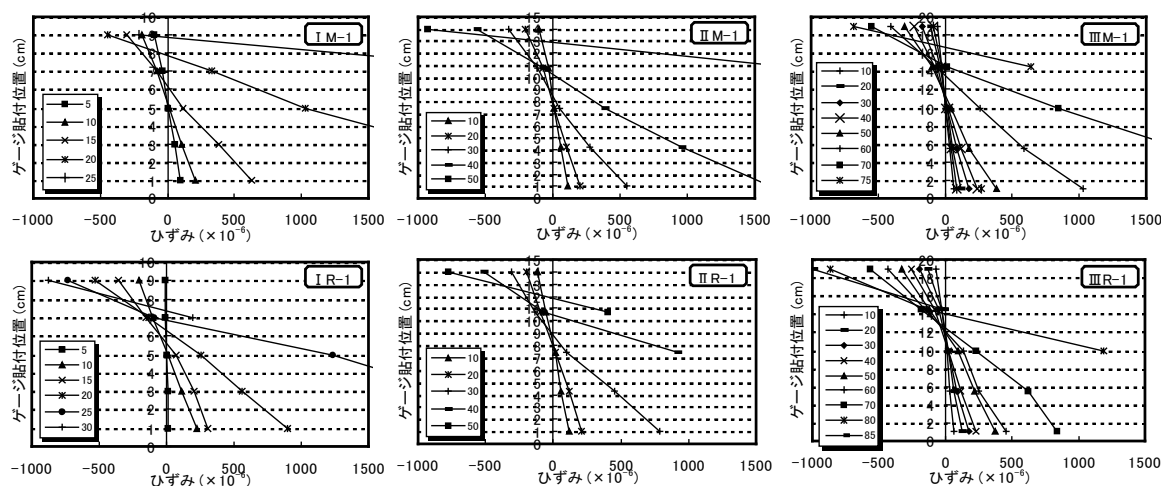
6. 荷重とたわみの関係

本実験における支間中央の荷重とたわみの関係を Fig.7 に示す。Fig.7 より、全ての供試体において、初期ひび割れ発生後も荷重の増加に対して、たわみには線形的な増加がみられる。これは、鋼繊維の架橋効果により、ひび割れ発生後においても耐力を維持したためであると考えられる。

静荷重曲げ実験の場合、最大荷重時のたわみの平均値は、タイプⅠ・Ⅱ・Ⅲでそれぞれ 7.24mm、2.92mm、1.72mm である。同様に、移動荷重実験の場合、タイプⅠ・Ⅱ・Ⅲではそれぞれ 6.49mm、3.11mm、1.89mm である。静荷重の場合と移動荷重の場合の最大たわみを比較(R/M)すると、タイプⅠ・Ⅱ・Ⅲでそれぞれ 0.90、1.07、1.10 となっている。

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 Fig.8 に示す。Fig.8 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、中立軸が断面中間部から上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



図－8 ひずみ分布図

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、ひずみ分布直線を延長し、引張縁ひずみを推定すると 227~297 μ 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% 程度中立軸は上昇する結果となった。

8. 断面曲げ解析

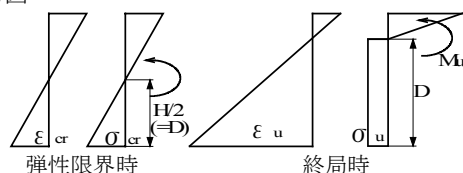
前章の結果より、終局時における RPC はりのひずみ分布は、圧縮域ではほぼ直線を示し、引張域では下面に大きなひずみの増加がみられたことから、終局時における圧縮側の応力分布を常に直線形、引張側を完全剛塑性モデル(Fig.9)と仮定し、以下の式により抵抗曲げモーメントを算出する。なお、完全剛塑性モデルの引張応力は割裂引張強度試験によるものとし、中立軸位置は前章により求めることとした。

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

ここで、 σ_u ：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 Table 4 に示す。Table 4 より、実験値と理論値を比較すると概ね一致する結果を示したが、各実験ともに断面高が大きくなるにつれてモーメント値に差が生じる結果となった。これは、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



図－9 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	5896	1.06
II M	11925	13266	0.90
III M	19375	23583	0.82
I R	6925	5322	1.30
II R	11850	11974	0.99
III R	18850	21288	0.89

- ①RPC は高圧縮強度および高じん性を有している。
- ②RPC 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。
- ④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ことを示した。

参考文献

- 1)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
- 2)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，pp.11-15
- 3)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
- 4)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