

# 論文 繰返し荷重を受ける高性能軽量コンクリートはりの曲げ耐力

舟橋政司\*1・原 夏生\*2・横田 弘\*3・二羽淳一郎\*4

**要旨：**独立空隙型低吸水性の高性能軽量骨材を用いて、高性能軽量 RC はり試験体の曲げ単調載荷および正負交番載荷試験を実施した。その結果、高性能軽量 RC はりの曲げ耐力は普通コンクリートと同様の手法で算定でき、コンクリートが負担するせん断耐力の低減を考慮すれば、せん断余裕度とじん性率はほぼ直線関係で表されることがわかった。また、付着割裂ひび割れが発生しないマッシブな高性能軽量コンクリート中に埋め込んだ鉄筋の付着応力—すべり関係は、普通コンクリートの場合と同等であることが明らかとなった。

**キーワード：**高性能軽量コンクリート, RC はり, 曲げ耐力, 正負交番載荷, 鉄筋引抜き試験

## 1. はじめに

近年開発された独立空隙型低吸水性の高性能軽量骨材<sup>1)</sup>は、従来の人工軽量骨材に比べて高強度で吸水率が著しく改善されている。そのため、これを用いた高性能軽量コンクリートは同一単位容積質量の従来型人工軽量骨材コンクリートよりも高強度が得られ、凍結融解抵抗性などの耐久性を著しく向上させることができる。しかしながら、軽量コンクリートの引張強度、せん断強度は、同じ圧縮強度を有する普通コンクリートに比べて低下することが知られている。筆者らは、高性能軽量コンクリートを用いて、せん断補強鉄筋を持たない RC はりの曲げせん断試験を実施し、斜めひび割れ耐力はコンクリートの単位容積質量による低減係数を用いて評価するのが妥当との結果を得ている<sup>2) 3)</sup>。

本研究では、高性能軽量コンクリートを、繰返し曲げ荷重を受ける部材に適用した場合の基礎データを得ることを目的とし、RC はりの正負交番載荷試験を実施し、曲げ耐力や変形性能について検討した。また、繰返し荷重として地震力を想定した場合、耐力や躯体の変形性能とともに基礎や接合部からの鉄筋の拔出し量の検

討が重要となる。そこで、基礎からの鉄筋の拔出し量を評価する手法のひとつとして、マッシブなコンクリート中に埋め込まれた鉄筋の引抜き試験を実施した。

## 2. 試験概要

### 2.1 試験方法

#### (1) RC はりの曲げ載荷試験

本試験は、高性能軽量コンクリート 2 配合、普通コンクリート 1 配合の 3 種類のコンクリートにより、RC はりを各 3 体の合計 9 体（試験体名：MXi）製作した。各配合の RC はりから、単調載荷 1 体（MX1）、正負交番載荷 2 体を実施した。正負交番載荷のうち 1 体（MX2）は、スパン中央の変位が、鉄筋初降伏荷重時のたわみ量  $\delta_y$  の整数倍（ $1\delta_y, 2\delta_y, \dots, n\delta_y$ ）に達した後に除荷する正負各 1 回ずつの載荷を、最大荷重が初降伏荷重を下回るまで載荷する方法で行った。また、残りの 1 体（MX3）は各変位での載荷・除荷を 3 回ずつ繰返す方法で、同様に最大荷重が初降伏荷重を下回るまで行った。

いずれの RC はりも支点間距離 2000mm、せん断スパン 750mm となるように 2 点載荷した。

\*1 前田建設工業（株）技術研究所 技術開発（土木）グループ 工修（正会員）

\*2 前田建設工業（株）技術研究所 技術開発（土木）グループ 工博（正会員）

\*3 独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤・構造部 構造強度研究室長 工博（正会員）

\*4 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 教授 工博（正会員）

## (2) 引抜き試験

試験体は直径 600mm のコンクリートの円筒中心に鉄筋を埋め込み、試験体上部のセンターホールジャッキにより鉄筋を引き抜くものとした。試験体寸法は、縦ひび割れが生じないように、コンクリートの応力が小さくかつ均等になるよう十分大きなものとした。なお、試験方法および試験体の形状・寸法は、島ら<sup>4)</sup>の研究を参考にして決定した。試験方法を図-1に示す。

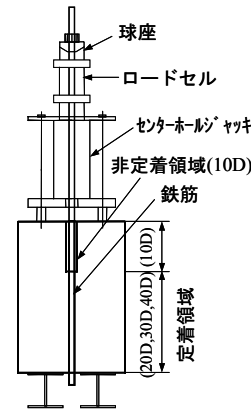


図-1 鉄筋の引抜き試験方法

## 2.2 試験体の概要

### (1) 正負交番載荷用RCはり

RC はりの形状・寸法および配筋を図-2に示す。RC はりの寸法は、250×250×3300mm であり、せん断破壊が先行しないように、せん断補強鉄筋を配している。試験体名 (MX<sub>i</sub>) の *X* は、用いたコンクリート配合を表し、粗骨材の全量に高性能軽量骨材 SLA0.85 を用いた配合 (L)、粗骨材として SLA0.85 と碎石を混合した配合 (B)、および碎石を全量使用した配合 (N) の3種類である。また、試験体名の *i* (1, 2 および 3) は、2.1(1)に示す載荷条件を表す。

### (2) 引抜き試験用試験体

引抜き試験用試験体 (試験体名: Ty-*z*D) は、高性能軽量コンクリートの単位容積質量と定着長をパラメータとした6体であり、比較のために普通コンクリートによる既存のデータ<sup>5)</sup> (試験体名: T2.3-40D, 単位容積質量: 2300kg/m<sup>3</sup>) を参照した。試験体名の *y* はコンクリートの単位容積質量 (kg/l) を、*z* は鉄筋の定着長が鉄筋径 (D) の何倍であるかを示す。

表-1 使用材料

材料	種類	記号	仕様
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度: 3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	高性能軽量骨材	SLA	(引抜き) 絶乾密度: 0.92g/cm <sup>3</sup> , 24h 吸水率 6.20%
	硬質バーライト	KP-1	(引抜き) 絶乾密度: 1.20g/cm <sup>3</sup> , 24h 吸水率 9.0%
	山砂	S1	表乾密度: 2.58g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 1.92%, F.M.: 2.52
	陸砂	S2	表乾密度: 2.60g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 2.54%, F.M.: 2.95
	砕砂	S3	表乾密度: 2.64g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 1.66%, F.M.: 2.74
粗骨材	高性能軽量骨材	SLA0.85	(曲げ) 絶乾密度: 0.85g/cm <sup>3</sup> , 24h 吸水率 3.30%
		SLA1.2	(引抜き) 絶乾密度: 0.88g/cm <sup>3</sup> , 24h 吸水率 3.60%
	碎石	G1	表乾密度: 2.70g/cm <sup>3</sup> , 粗骨材最大寸法 20mm, 吸水率: 0.38%, F.M.: 6.60
		G2	表乾密度: 2.66g/cm <sup>3</sup> , 粗骨材最大寸法 20mm, 吸水率: 0.902%, F.M.: 6.66
混和剤	高性能 AE 減水剤	SP	特殊分離低減型減水成分配合ポリカルボン酸塩系
	AE 減水剤	AD	リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体

表-2 鉄筋の力学特性

試験名	試験体	鉄筋径	規格	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
曲げ試験	MX <sub>i</sub>	D19	SD345	370	598	174
		D10		363	520	195
引抜き試験	Ty- <i>z</i> D	D22	SD345	398	554	181
	T2.3-40D	D29	USD685	708	872	196

*X*: L, B, N; *i*: 1, 2, 3; *y*: 1.2, 1.5; *z*: 20, 30, 40

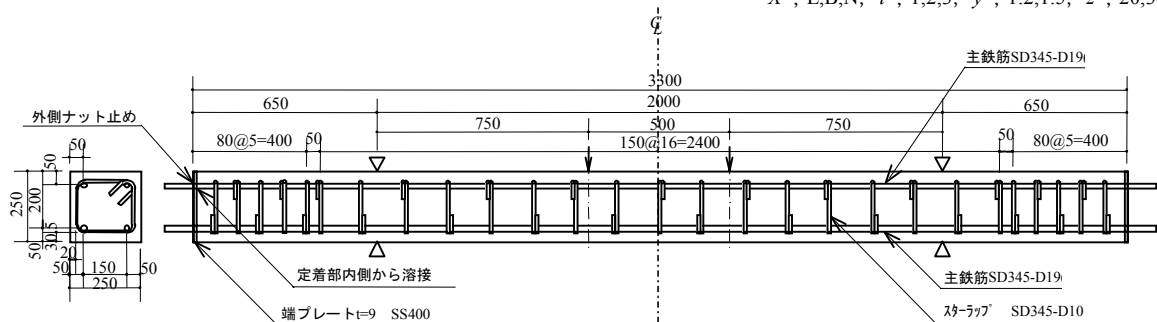


図-2 RCはりの形状・寸法および配筋 (正負交番載荷)

表－3 コンクリートの示方配合

試験名	配合名	W/C (%)	s/a (%)	目標 単位 容積 質量 <sup>*1)</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )										混和剤		フレッシュ時の品質試験結果				
					水 W	セメント C	石灰 石微 粉末 LS	細骨材 S					粗骨材 G								
								SLA 1.2 <sup>*3)</sup>	KP- 1 <sup>*2)</sup>	山砂 S1	陸砂 S2	砕砂 S3	SLA 0.85 <sup>*3)</sup>	碎石 G1	碎石 G2	高性能 AE 減水剤	AE 減水 剤	スランプ /スランプ フロー (mm)	空気量 (圧力 法) (%)	コンクリート 温度 (℃)	
曲げ 試験	L	45.0	54.2	1727	170	378	—	—	—	916	—	—	—	255	—	—	3.97	—	380×380	6.7	12.0
	B	—	—	1836	170	378	—	—	—	916	—	—	—	204	162	—	3.97	—	400×380	5.1	16.0
	N	57.5	47.1	2299	166	289	—	—	—	—	431	431	—	—	—	982	—	2.89	140	3.8	14.5
引抜き 試験	T1.2	37.5	51.2	1219	165	440	—	165	176	—	—	—	—	273	—	—	3.30	—	375×360	3.6 <sup>*4)</sup>	33.5
	T1.5	40.0	51.9	1533	165	413	68	154	—	—	370	—	363	—	—	—	3.70	—	430×415	5.4 <sup>*4)</sup>	27.5

\*1) 配合T1.2およびT1.5は、SLA1.2および0.85の24時間吸水分を加えた値。 \*2) 硬質パーライト \*3) 絶乾状態の質量 \*4) 質量法

## 2.3 使用材料および示方配合

表－1に、試験体製作に用いたコンクリートの使用材料、表－2に使用鉄筋の力学特性、表－3にコンクリートの示方配合およびフレッシュ時のコンクリートの品質試験結果を示す。

リートが圧壊して終局に至った。一方、正負交番載荷試験体では、等曲げ区間で主鉄筋が降伏した後に、せん断スパンでのせん断破壊により終局に至っており、破壊性状に相違が認められた。また、高性能軽量コンクリートのひび割れ

## 3. 試験結果および考察

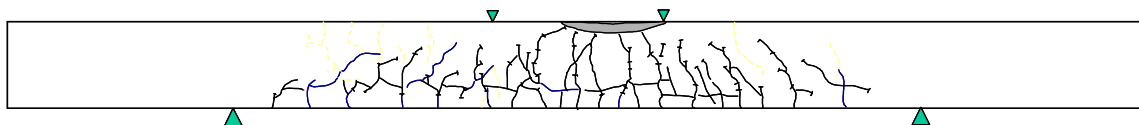
### 3.1 RCはりの曲げ載荷試験

載荷試験当日、テストピースにより確認した各試験体コンクリートの圧縮強度、引張強度および単位容積質量を表－4に示す。

図－3～6に単調載荷と正負交番載荷（各変位3回繰返し）のML試験体とMN試験体の終局時のひび割れ状況を示す。単調載荷試験体の破壊は、引張側主鉄筋が降伏後、圧縮縁のコンク

表－4 コンクリートの硬化物性

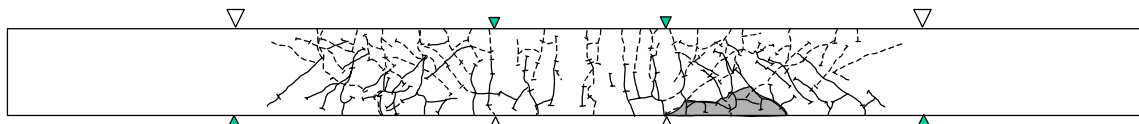
試験体	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	単位容積質 量(kg/m <sup>3</sup> )
ML1	31.7	2.09	1798
ML2	31.7	2.09	1798
ML3	38.8	2.07	1732
MB1	34.1	2.03	1829
MB2	34.9	2.33	1856
MB3	35.7	2.17	1835
MN1	39.1	3.09	2328
MN2	41.6	3.11	2323
MN3	42.7	3.18	2327



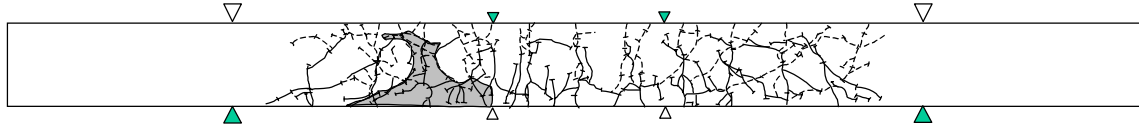
図－3 ML1のひび割れ状況



図－4 MN1のひび割れ状況



図－5 ML3のひび割れ状況



図－6 MN3のひび割れ状況

(破線は負側載荷時に発生したひび割れ)

表－5 曲げ耐力計算値と試験結果およびせん断余裕度

試験体名	計算値 <sup>*1)</sup>		試験結果			せん断耐力(計算値)				曲げ耐力時のせん断力(計算値) $V_m$ (kN)	せん断余裕度 ( $V_c' + V_s$ )/ $V_m$
	降伏時荷重 $P_{y, cal}$ (kN)	最大荷重 $P_{u, cal}$ (kN)	降伏時荷重 $P_{y, exp}$ (kN)	最大荷重 $P_{u, exp}$ (kN)	じん性率 <sup>*2)</sup>	コンクリート負担分 $V_c$ (kN)	せん断耐力低減係数 $\eta_s = (\rho / 2300)^{3/2}$	コンクリート負担分(低減係数考慮) $V_c' = \eta_s \cdot V_c$ (kN)	せん断補強筋負担分 $V_s$ (kN)		
ML1	98.3	105	98	123	—	55.6	0.691	38.5	60.0	52.3	1.88
ML2	98.3	105	89	118	7	55.6	0.691	38.5	60.0	52.3	1.88
ML3	99.8	108	92	115	6	59.5	0.653	38.9	60.0	54.1	1.83
MB1	98.9	106	99	119	—	57.0	0.709	40.4	60.0	53.0	1.90
MB2	99.0	106	86	115	7	57.4	0.725	41.6	60.0	53.2	1.91
MB3	99.2	107	94	121	6	57.9	0.713	41.2	60.0	53.4	1.90
MN1	99.9	108	103	144	—	59.7	1.00	59.7	60.0	54.2	2.21
MN2	100.3	110	103	125	11	60.9	1.00	60.9	60.0	54.8	2.21
MN3	100.5	110	99	119	8	61.4	1.00	61.4	60.0	55.1	2.21

\*1) 計算値は平面保持を仮定し、土木学会標準示方書に基づいている。

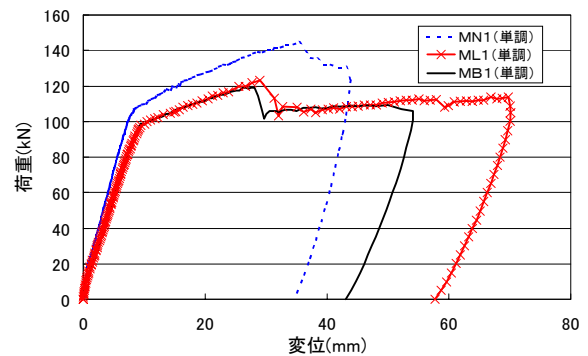
\*2) 荷重が降伏荷重を下回らない最大の変位(終局変位)を降伏変位( $\delta_y$ )で除した値。

の発生状況は、普通コンクリートと同様かそれ以上に分散して発生することが確認された。

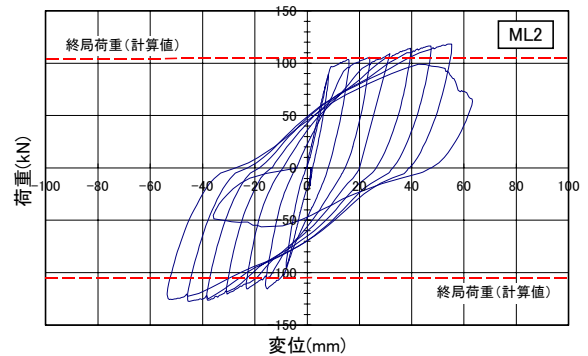
表－5に各 RC はりの曲げ耐力の計算値と試験結果を示す。また、同表に主鉄筋の降伏荷重を維持した最大変位を降伏変位( $\delta_y$ )で除したじん性率とせん断余裕度を示す。

図－7に各配合の曲げ単調載荷試験時の荷重－変位曲線を示す。高性能軽量コンクリート(ML1,MB1)は単位容積質量( $\rho$ )の値により、低減係数 $\eta_{EM} = (\rho / 2300)^{3/2}$ を乗じただけ、普通コンクリートよりもヤング係数が小さくなる<sup>2)</sup>。また、試験時の圧縮強度がMN1より若干小さかったため、剛性および耐力がやや小さくなったものと考えられる。一方、L配合およびN配合の正負交番載荷の荷重－変位履歴に関して、各変位1回ずつ載荷したものを図－8および9に、各変位3回ずつ繰返し載荷したものを図－10および11に示す。各試験体は、せん断スパンに発生したひび割れにより、コンクリートが塊状に剥落して著しい耐力低下が生じた。

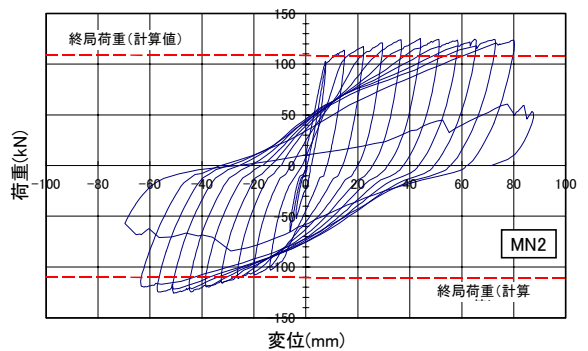
表－5に示すように、L配合、B配合およびN配合のいずれの配合でも、単調載荷、正負交番載荷に関わらず、最大荷重の試験結果は計算値を上回っている。また、じん性率は、MN試験体で8～11であるのに対して、ML試験体、MB試験体ともに、6～7となっており、普通コンクリートに比べて幾分低下した。



図－7 荷重－変位関係(MX1 試験体)



図－8 荷重－変位関係(ML2 試験体)



図－9 荷重－変位関係(MN2 試験体)

正負交番載荷試験体は、いずれも曲げ降伏後にせん断スパンで破壊をしたことから、せん断余裕度とじん性率の関係を図-12に示す。

ここで、各試験体のせん断耐力は土木学会コンクリート標準示方書（RC示方書）基式<sup>6)</sup>で評価した。著者らは、軽量コンクリート部材のせん断耐力に対して、RC示方書基式に単位容積質量( $\rho$ )に依存する低減係数 $\eta_s=(\rho/2300)^{3/2}$ を乗じることを提案している<sup>2)3)</sup>。図中の軽量コンクリート試験体に関する●\*, ○\*は、RC示方書基式によるせん断余裕度であり、●, ○は著者らの提案に基づくせん断余裕度である。軽量コンクリート部材において、 $V_c$ が低下することを考慮したせん断余裕度とじん性率の関係は、ほぼ直線関係で表されることがわかった。

### 3.2 引抜き試験

引抜き試験に用いたコンクリートの硬化物性は表-6に示すとおりである。

島らは、式(1)に示すように、普通コンクリートに埋め込まれた十分長い定着長を有する鉄筋の付着応力 $\tau$ は、鉄筋径で無次元化されたすべりの関数で表すことができ、コンクリート強度 $f'_c$ の影響は圧縮強度の2/3乗に比例する形で考慮できるとしている。ここでは、計算値として式(1)を用いて算出することとした。

$$\tau = 0.9 f'_c{}^{2/3} (1 - \exp(-40s^{0.6})) \quad (1)$$

ここで、 $s=S/D$ 、 $S$ はすべり量、 $D$ は鉄筋径。

図-13は、縦軸を $\tau/f'_c{}^{2/3}$ 、横軸を $S/D$ と無次元化して、定着長 $40D$ の各試験体の弾性域での付着応力とすべり量の関係を示す。すべり量 $S$ は、鉄筋のひずみ $\varepsilon$ を、定着区間下端から上端まで積分して求めた。なお、変位計により定着区間下端でのすべりがないことを確認した。すべり量の試験結果は、計算値よりもやや大きかったが、付着応力が増加するとともに試験結果と計算値が接近する傾向が見られ、鉄筋降伏直前で両者はほぼ一致していた。また、比較のために示した普通コンクリートの試験結果<sup>5)</sup>に

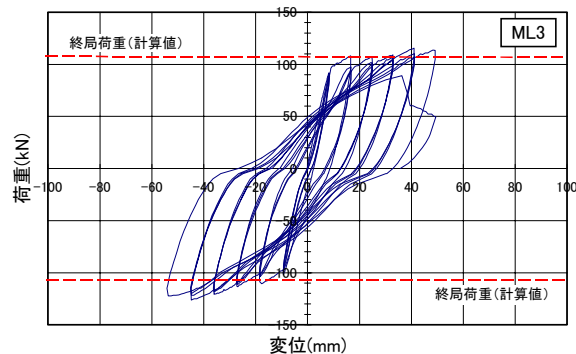


図-10 荷重-変位関係(ML3 試験体)

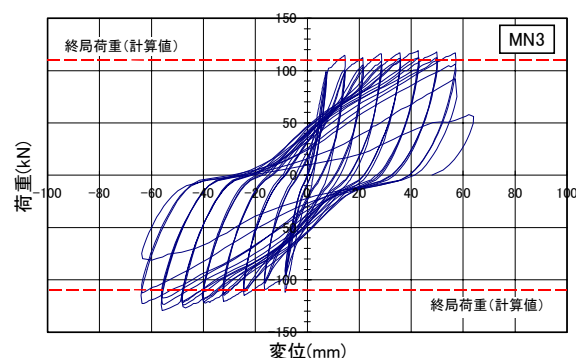


図-11 荷重-変位関係(MN3 試験体)

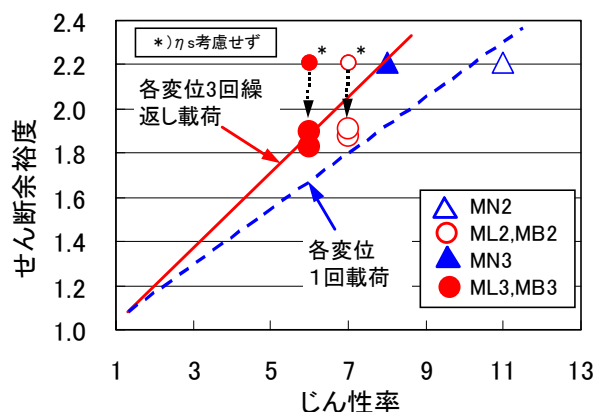


図-12 せん断余裕度とじん性率の関係

表-6 コンクリートの硬化物性

試験体	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
T1.2	32.4	1.86	13.6
T1.5	45.3	2.03	17.8
T2.3	32.8	3.08	26.3

比べて、同一付着強度に対するすべり量が若干小さかった。以上の結果より、割裂ひび割れが生じないマッシュな高性能軽量コンクリートに

定着された鉄筋の弾性範囲での付着特性には、普通コンクリートを対象とした式(1)が適用できるものと考えられる。

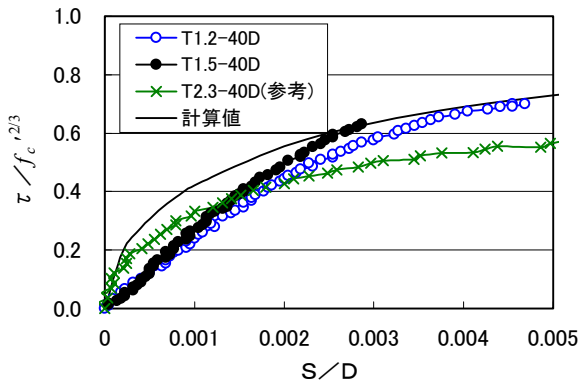


図-13 付着応力とすべり関係

## 5. まとめ

高性能軽量コンクリートを用いた RC はりの曲げ載荷試験、およびマッシブなコンクリートに埋め込んだ鉄筋の引抜き試験を行った。その結果、以下のような結論が得られた。

- (1) 高性能軽量コンクリートを用いた RC はりの単調曲げ載荷試験を行った結果、いずれの配合でも普通コンクリートと同様に、試験結果の最大荷重は計算値を若干上回った。
- (2) 正負交番載荷試験体は、載荷の繰返し回数やコンクリート配合の違いに関わらず、最大荷重が計算値を上回っており、高性能軽量コンクリートにも普通コンクリートを対象とした従来の曲げ耐力算定法が適用可能である。
- (3) 高性能軽量コンクリートのひび割れ分散性は、普通コンクリートと同等かあるいはそれ以上である。
- (4) 高性能軽量コンクリートを繰返し曲げ荷重を受ける部材に適用した場合、コンクリート負担分のせん断耐力の低減係数( $\eta_s$ )を考慮することで、せん断余裕度とじん性率が直線関係で表されることがわかった。したがって、著者らが提案するせん断耐力算定法により、所要のせん断余裕度を確保することで、必要な変形性能（じん性）を得ることができる。

- (5) マッシブな高性能軽量コンクリート中に埋め込まれた鉄筋の付着応力-すべり関係は、普通コンクリートと同等であった。すなわち、地震時における基礎や接合部からの鉄筋の抜け出し量は、普通コンクリートと同様に評価できることが判明した。

## 謝辞

本研究を実施するにあたり、前港湾技術研究所の山田昌郎氏、太平洋セメント(株)の岡本享久博士、榎木隆氏、石田聡氏、前田建設工業(株)の横沢和夫博士に多大なるご協力を頂きました。ここに、深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 岡本享久, 石川雄康, 榎木隆, 笹嶋昌男: 高性能軽量コンクリート, コンクリート工学, Vol.37, No.4, pp.12-18, 1999年4月
- 2) 舟橋政司, 原夏生, 横田弘, 二羽淳一郎: 高性能軽量コンクリートを用いたRC梁のせん断耐力, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.919-924, 2001年
- 3) Yokota, H., et al.: Shear Resisting Behavior of Super Lightweight Concrete Beams Without Web Reinforcement, Report of the Port and Airport Research Institute, Vol.40, No.3, pp.17-35, September 2001
- 4) 島弘, 周礼良, 岡村甫: マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, 第378号/V-6, pp.165-174, 1987年2月
- 5) 山本晴人, 伊藤始, 三島徹也, 島弘: 高強度材料を用いたRC部材の鉄筋付着特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.1249-1254, 2000年
- 6) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫: せん断補強鉄筋を用いないRC梁のせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, 第372号/V-5, pp.167-176, 1986.8