

論文

[1159] 著しいAAR損傷を生じたRCはりの挙動

小柳 洽*¹ 六郷恵哲*² 内田裕市*³ 長瀬道雄*⁴

1. はじめに

AAR損傷を生じた鉄筋コンクリート部材の力学特性については、損傷した構造物の安全性評価の必要上従来から種々の検討がなされてきているが、はり部材の載荷試験結果では、AARに伴う膨張を鉄筋が拘束するために生ずるケミカルプレストレスによってかえって剛性が増加し、その結果はりの破壊形式がせん断から曲げに移行することもあり、AAR損傷を受けても終局耐力が必ずしも低下せず、かえって増大することも報告されている[1]。一方、この損傷によってはりの降伏耐力が低下することもあることが報告されており[2]、その理由として膨張拘束による鉄筋の存在応力の影響や、AARによるコンクリートの強度低下の影響なども考えられてきた。

ここで、AARによるひび割れ幅が0.6~0.7mmにおよぶ著しい損傷を受けた鉄筋比の異なるRCモデルはりの静的載荷試験より、そのひび割れ・降伏・終局耐力や変形特性を求める機会を得たので、AARによる著しい損傷を受けたRCはりの力学特性についての考察を試みた。

2. 実験概要

2.1 実験計画

本研究で対象としたはり供試体は、寸法10×18×170cmの単鉄筋はりであり、鉄筋比をS・Lの2レベルとし、アルカリ添加の有無によりAARによる損傷の有る場合(Aシリーズ)と無い場合(Nシリーズ)とを組み合わせて合計4種類のはり供試体を作成した。これらを、それぞれAS, NS, AL, NLはりとする。

2.2 使用材料および配合等

セメントは普通ポルトランドセメント($R_2O=0.61\%$)、細骨材は長良川産川砂(比重:2.60、F.M.:2.85)、粗骨材は非反応性のものには長良川産砂利(比重:2.61、M.S.:25mm)を、また反応性骨材には古銅輝石安山岩(比重:2.59、M.S.:25mm、 $Sc=180$ 、 $Rc=124$ mmol/l)を使用した。

コンクリートの配合は、単位水量および単位セメント量を各々176および352kg/m³、単位細骨材量768kg/m³、細骨材率0.45であり、反応性骨材を用いる場合はその粗骨材全量に対する割合を60%とした。なお、アルカリ添加材としては、反応性が高くかつコンクリートの性状の変化が少ないものとして Na_2SO_3 を使用し[3]、等価 Na_2O 量がセメント量の3%とした。

鉄筋はD10(f_y および f_u :38.8および54.6kg/mm²)ならびにD13(f_y および f_u :37.9および56.7kg/mm²)を使用した。

2.3 供試体作成等

はり供試体は公称径D10あるいはD13の鉄筋2本を主鉄筋として用い、純かぶりを20mmとした。

*1 岐阜大学教授 工学部土木工学科、工博(正会員)

*2 岐阜大学助教授 工学部土木工学科、工博(正会員)

*3 岐阜大学助手 工学部土木工学科、工修(正会員)

*4 岐阜大学学生 工学部土木工学科

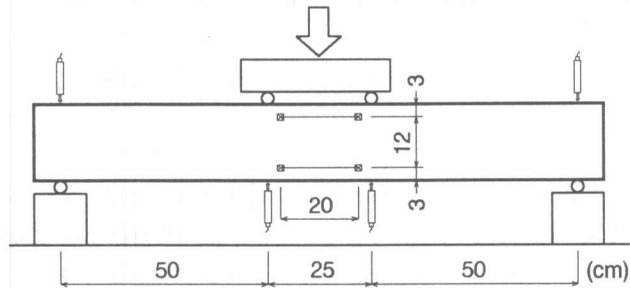


図-1 荷重および計測状況

鉄筋比はS、Lそれぞれ0.92%および1.66%である。せん断補強筋は配置していない。

フレッシュコンクリートのスランプおよび空気量は、N、Aいずれも約10cmおよび4%であった。

はり供試体は、脱型後約4週間恒温室内（温度20℃）で湿布養生を行った。その後Aシリーズのはりは、AAR反応の促進のため室温を40℃とし約4カ月の散水養生を行った後、20℃の恒温室内に置いた。Nシリーズのはりは、4週間の湿布養生ののち実験室内の気中に置いた。

2.4 荷重および計測方法

はり供試体は、材令約2年で荷重試験を行った。荷重は、スパン125 cm（せん断スパン50cm、モーメントスパン25cm）の対称2点荷重とし、Aはり各2本、Nはり各1本の曲げ荷重試験をアムスラー型試験機（容量40tonf）によって行った。

計測は、荷重計による荷重重と、ひずみゲージ型変位計（容量25mm、精度1/500mm）による荷重点ならびに支点の変位と、高感度変位計（容量10mm、精度1/1000mm）によるモーメントスパン内のはり側面の上下縁からそれぞれ3 cmの位置の軸方向変形（検長20cm）について行った。荷重試験と計測の状況を図-1に示す。

はり試験と同時に、供試体と同時に作成し各々のはりと同様の養生を行った強度試験用供試体によって、静弾性係数および圧縮強度（ $\phi 10 \times 20$ cm）、動弾性係数および曲げ強度（ $10 \times 10 \times 40$ cm）ならびに割裂引張強度（ $\phi 15 \times 15$ cm）を求めた。

3. 実験結果

3.1 AARによるひび割れ状況

Aシリーズのはり供試体は、高温散水養生時に多数のひび割れを生じた。荷重試験直前のひび割れ状況は図-2に示すように、主としてはり上部（鉄筋の存在しない部分）に多く存在し、はり中心部ではり軸方向、また上縁部ではり軸直角方向のものが多く、ひび割れ幅は0.6~0.7 mmに達するものも見られた。さらに、S、L共にほぼ12~14mmの反りを生じていた。鉄筋量の差（S、L）によるひび割れ状況ならびに反りの違いは明確ではない。

3.2 はり供試体の試験結果

鉄筋比の小さいSシリーズでは、はりはいずれもモーメント破壊を生じた。一方、鉄筋比の大きなLシリーズでは、AARを生じていないNはりではせん断破壊を、またAARを生じたAはりでは曲げ破壊を生じた。

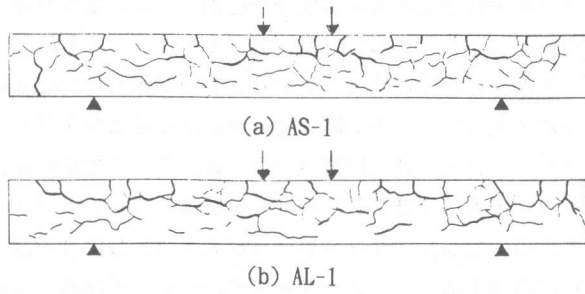


図-2 はり供試体のひび割れ状況

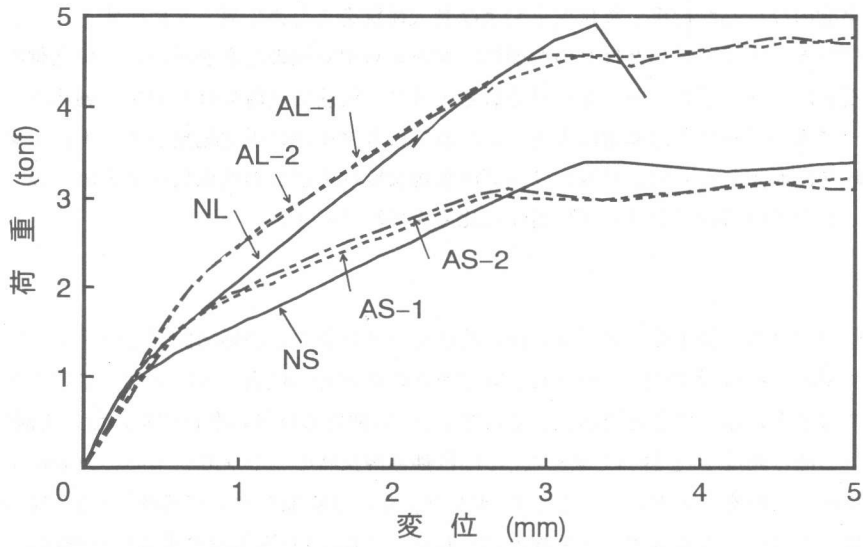


図-3 はりの荷重-変位曲線 (初期部分)

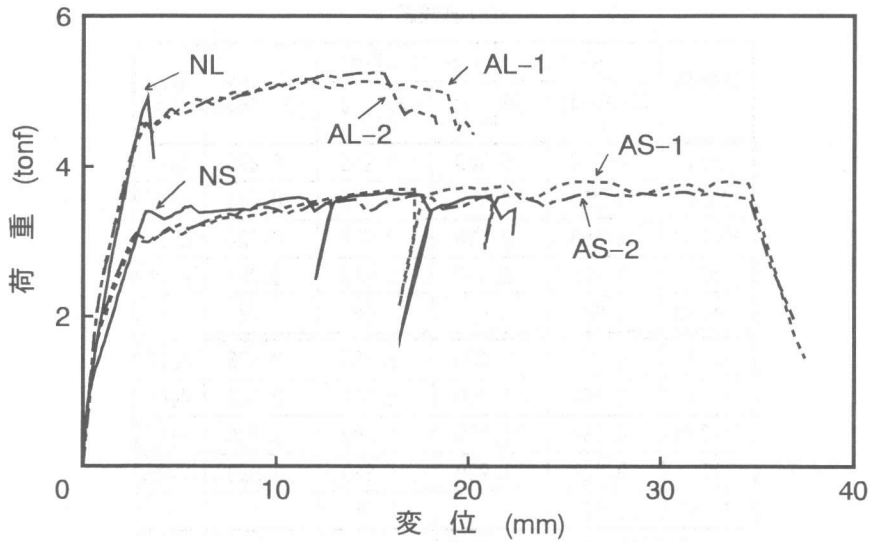


図-4 はりの荷重-変位曲線 (全体)

はり供試体の荷重-変位関係の測定結果の初期部分を図-3に、また全体を図-4に示す。Aシリーズの2本のはりの曲線は良く一致している。図-3より、S、LはりともにAシリーズのほうがNシリーズに比して初期の剛性が大きく、また、初ひび割れに対応するところの曲線の勾配の急変する荷重も60%以上大きい。一方、図-4より、曲げ破壊を生じたSはりでは、Aシリーズのはりの降伏点はNシリーズより10%程度低い、Aシリーズでは降伏後変形の増大につれて耐力が増加し、終局耐力は両者はほぼ等しくむしろ僅かながらAシリーズのほうが大である。また、耐力の低下する点迄の変位もAシリーズのほうが大きい。Lはりでは、Nシリーズがせん断破壊であり直接の対比は困難であるが、AシリーズではSはりと同様に降伏後の変形にともなう耐力の増加が顕著である。また、Nシリーズがせん断破壊を生じたため、終局耐力は6%、また終局耐力時の変形ははるかにNシリーズより大きくなった。

はりの実測のひび割れ荷重、降伏荷重および最大荷重をまとめて表-1に示す。

高感度変位計によって求めたはりの側面のひずみから中立軸の高さを求めた。中立軸の高さの推移の状況を図-5に示す。図-5に見られるように、鉄筋降伏時のはりの中立軸比は、Nシリーズに比べてAシリーズでは非常に大きい。なお、はり降伏時の中立軸比を表-1に示す。

はり試験時に測定したAおよびNシリーズの各種強度ならびに弾性係数をまとめて表-2に示す。また、AシリーズのNシリーズに対する比率を同時に示す。

4. 考察

はりの曲げひび割れ発生モーメント、降伏曲げモーメントおよび終局曲げモーメントの算定値（それぞれ M_{ct} 、 M_{yt} および M_{ut} ）を求め、実測値との対比と共に表-3に示す。なお、Aシリーズについては2本のはりの平均で示す。ここで、 M_{ct} は通常のはりの曲げ解析において縁応力をコンクリートの曲げ強度 f_b とにおいて求めた。 M_{yt} は鉄筋降伏時のコンクリートの応力分布を線形弾性として求めたものを M_{yt1} とした。ここで、ヤング係数比は鉄筋のヤング係数（ $2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ ）に対するコンクリートの実測ヤング係数の比とした。また、はり降伏時の実測中立軸比をもとに、

表-1 はり試験結果

試験体	曲げモーメント (tonf・m)			降伏時 中立軸比	破壊 形式
	ひびわれ M_c	降 伏 M_y	終 局 M_u		
AS-1	0.360	0.763	0.950	0.496	曲げ
AS-2	0.375	0.778	0.915	0.511	曲げ
AS平均	0.368	0.770	0.933	0.524	曲げ
NS	0.218	0.850	0.913	0.294	曲げ
AS/NS	1.69	0.91	1.02	1.78	—
AL-1	0.475	1.150	1.280	0.608	曲げ
AL-2	0.500	1.150	1.310	0.513	曲げ
AL平均	0.488	1.150	1.300	0.566	曲げ
NL	0.234	[1.230]	1.230	[0.350]	せん断
AL/NL	1.62	—	1.06	—	—

[]鉄筋降伏以前にせん断破壊した。

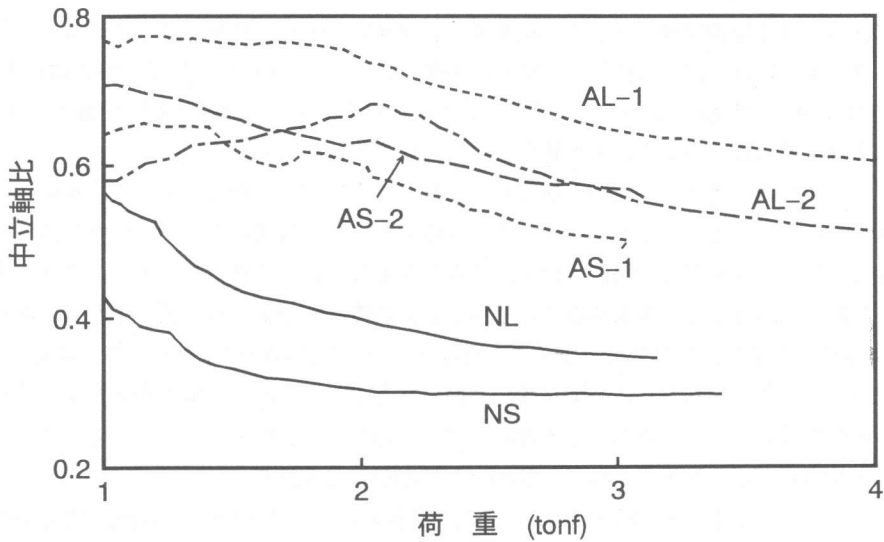


図-5 はりの中立軸の変化

コンクリートの応力分布を同じく線形弾性として求めたものを M_{yt2} とした。 M_{ut} は、コンクリートの応力ブロックを長方形とする簡易式から求めており、鉄筋の降伏点強度から求めた。

Aシリーズのはりの M_c の実測値は、いずれも算定値の2~3倍である。これは、AARによるひび割れの影響が強度試験用供試体に対してはマイナスとなって算定値が低下しているのに対し、RCはり供試体ではAARによる膨張を鉄筋が拘束しケミカルプレストレスを生じることによってひび割れ荷重が増大するというプラスの効果を持つためにその差が大きくなっている。このため、AARはりのひび割れ曲げモーメントを強度供試体の試験結果と結びつけて考えることはできない。Nシリーズでは、縁応力を f_b とした算定値より低い実測値を得ているが、この理由として乾燥収縮の影響が考えられる。

SはりではAシリーズの M_y の実測値は、コンクリートの E_c を考慮して求めた算定値に近く、実測中立軸比から求めた算定値より約10%大きい。一方、

表-2 コンクリートの諸性質

シリーズ	強度 (kgf/cm ²)			弾性係数 (10 ⁵ kgf/cm ²)	
	圧縮	曲げ	引張	静	動
A	411	32.4	27.6	1.82	2.86
N	414	64.2	30.7	2.54	2.13
比 (A/N)	0.99	0.50	0.90	0.72	0.77

表-3 はり試験結果の検討 (tonf・m)

モーメント		シリーズ	AS	NS	AL	NL
ひび割れ	Mc		0.368	0.218	0.488	0.243
	Mct		0.175	0.347	0.175	0.347
	Mc/Mct		2.10	0.63	2.79	0.70
降伏	My		0.770	0.850	1.150	[1.23]
	Myt ₁		0.753	0.766	1.240	1.270
	Myt ₂		0.694	0.758	1.210	1.320
	My/Myt ₁		1.02	1.11	0.93	-
終局	My/Myt ₂		1.11	1.12	0.95	-
	Mu		0.933	0.913	1.30	[1.23]
	Mut		0.814	0.814	1.41	1.41
	Mu/Mut		1.15	1.12	0.92	[0.87]

[]鉄筋降伏以前にせん断破壊した。

Nはりでは両者の算定値はほぼ等しく、実測値が約10%大である。鉄筋比が低く、はり供試体の寸法が小さい場合には、はりの降伏点が見かけ上昇すること[4]を考慮すれば、中立軸比をもとにした M_y の算定値が実測値と良く一致していると考えられる。また、Lはりでは実測値が算定値をやや下回るが、中立軸比をもとにした算定値のほうが実測値に近い。

ここで、AARの影響によって中立軸比が大となる理由について考える。はり圧縮側に過大なひび割れを生じたはりは、ケミカルプレストレスの存在によってRCからPCの特性に移行するものと考えられる。すなわち、鉄筋に引張力が作用することにより反力としてコンクリートに軸圧縮力が作用し、結果として有効断面積が増加し、鉄筋降伏時の中立軸位置が下がり、鉄筋降伏時の M_y が通常のNはりに比べて低下することとなる。ヤング係数の低下はもちろん関係する。なお、従来から行われているはりの載荷試験において、必ずしもAAR損傷を受けたはりの降伏荷重が対応する非損傷(N)はりのものと変わっていない理由は、従って、必ずしも今回の試験のように中立軸比の大きな低下を生じていなかったことが考えられる。

圧縮側コンクリートの E_c の低下は、はり寸法に依存することが考えられるため、強度試験用供試体によって求めた E_c と一致するかどうかは定かではない。

AARの影響を受けたはりは、鉄筋が降伏した後荷重増加がみられるが、これは鉄筋の降伏がひび割れ箇所に集中するため中立軸が上昇し、抵抗曲げモーメントが増大するためと解釈され、曲げ破壊の場合には、最終的に両シリーズの終局強度に差が無くなるものと考えられる。

終局耐力は、鉄筋比の小さいSはりでは鉄筋の加工硬化によって、鉄筋の降伏点から求めた算定値より実測値のほうが大きい、Lはりではやや小さくなった。

5. おわりに

ひび割れ幅が0.6~0.7mmにおよぶ著しいAAR損傷を受けた、鉄筋比の異なる単鉄筋RCはりの載荷試験を行った。本論文の主な結論は以下のとおりである。

- (1) AAR損傷が著しい場合には、損傷の無いはりに比べてはり降伏時の中立軸比が大きくなる。その結果内力のモーメントの腕長が小さくなるため、降伏曲げモーメントが低下する。
- (2) 中立軸比の増加は、コンクリートの見かけのヤング係数の低下ばかりでなく、鉄筋のAARによる膨張拘束で生ずるケミカルプレストレスの存在による。
- (3) 鉄筋降伏後はひび割れ部分に降伏が集中するため腕長が増加し、曲げ破壊時の終局耐力は損傷と関係しない。

参考文献

- [1]例えば、小柳 洽・六郷恵哲・石田裕哉：アルカリ骨材反応によるひび割れとRC部材の性状、セメント技術年報、39巻、pp.352-355、1985
- [2]例えば、Susumu Inoue・Manabu Fujii・Kazuo Kobayashi・Kin-ichi Nakano：Structural Behaviors of Reinforced Concrete Beams Affected by Alkali-Silica Reaction, Proc. 8th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction, pp.727-732, 1989
- [3]山本智志・松本省吾・小柳 洽：アルカリ種別とコンクリートの諸物性について、土木学会第45回年次講演会講演概要集、V-244、pp.514-515、1990
- [4]小柳 洽・六郷恵哲・岩瀬裕之：コンクリート中の鉄筋の応力ひずみ関係と曲げを受けるRCはりの挙動、土木学会論文集、No.384/V-7, pp.83-92, 1987