

論文 アルカリ骨材反応により劣化したディープビームのせん断耐力に関する実験的研究

黒川 浩嗣^{*1}・谷村 幸裕^{*2}・岡本 大^{*3}・仁平 達也^{*1}

要旨：本研究では、促進養生によりアルカリ骨材反応の劣化を進展させた比較的大型のディープビーム試験体を製作し、アルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化やせん断補強鉄筋の曲げ加工部の破断がせん断耐力におよぼす影響について検討するとともに、劣化を生じた部材に対する鋼板接着補強の効果についても検討を行った。その結果、本実験の劣化程度の場合、せん断耐力に与える影響は小さいが、より脆性的な破壊を生じること、今回の補強方法では、接着した鋼板により受持たれるせん断耐力とディープビームのせん断耐力は単純に重ね合わせができないことが明らかになった。

キーワード：アルカリ骨材反応，鉄筋破断，ディープビーム，せん断耐力，鋼板接着補強

1. はじめに

近年、RC 構造物において、アルカリ骨材反応が原因と考えられる鉄筋の破断が生じている。鉄筋の破断は、T 型 RC 橋脚の梁軸方向鉄筋の圧接部近傍、軸方向鉄筋の曲げ下げ加工部、あるいはせん断補強鉄筋の曲げ加工部において報告されている¹⁾。

本研究では、アルカリ骨材反応によるコンクリート自体の劣化、およびせん断補強鉄筋曲げ加工部の破断が RC 部材のせん断耐力におよぼす影響について検討した。また、アルカリ骨材反応による変状を生じた RC 部材に対して、鋼板接着補強を実施した場合のせん断補強効果についても検討した。

従来の研究では、アルカリ骨材反応によるコンクリートの弾性係数の低下を気泡混入コンクリートなどの使用により模擬し、検討を行った例²⁾があるが、実際にアルカリ骨材反応により劣化させた大型 RC 部材に対する載荷試験は少ない。そこで、本検討では、促進養生によりアルカリ骨材反応の劣化を進展させた比較的大型の試験体を製作し、静的載荷試験によってせん断耐力を評価した。

2. 試験体概要

2.1 試験体の諸元

本検討では、鉄道の T 型橋脚の片持ち梁部分（コーベル）を検討対象とし、試験体はせん断スパン比 1.5 のディープビームとした。表 1 に試験体一覧を、図 1 に試験体配筋図を示す。

本検討では、図 1 に示すように、せん断補強鉄筋を配置した試験体と配置しない試験体を製作した。試験体 No.3 に配置したせん断補強鉄筋は、図 2 (a) に示すように健全なものとした。No.4, No.6 に配置したせん断補強鉄筋は、図 2 (b) に示すように曲げ加工部で人工的に破断させたものとし、せん断補強鉄筋の破断部分は、図 1 に示すように引張縁側に位置するようにした。

表 1 試験体一覧

No.	劣化 程度	断面 寸法 (mm)	せん断 スパン a(mm)	有効 高さ d(mm)	せん断 補強 鉄筋	鋼板 補強
1	健全	b _w ×h 300 × 450	600	400	無し	無補強
2	劣化				無し	
3					健全	
4					破断	
5					無し	補強
6					破断	

*1 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 工修 (正会員)

*2 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 研究室長 博(工) (正会員)

*3 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 耐震構造 主任研究員 工修 (正会員)

表－２ コンクリートの配合

試験体	粗骨材の 最大寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	添加アルカリ%		単位量 (kg/m ³)					
				NaOH	KOH	C	W	細骨材 砕砂	細骨材 砂	粗骨材 非反応性	粗骨材 反応性
健全	20	55.1	46.5	0	0	350	193	405	398	955	0
劣化	20	55.1	46.5	1.08	1.48	350	193	405	398	362	556

また、鋼板接着補強は、せん断補強鉄筋を配置しない試験体（No.5）と、破断させたせん断補強鉄筋を配置した試験体（No.6）について実施した。

2.2 使用材料

試験体に用いたコンクリートの配合を表－２に示す。コンクリートの配合は、単位セメント量、水セメント比および細骨材率を固定し、空気量 $4\pm 1\%$ を目標とした。また、アルカリは等価 Na_2O 量がセメント量の 2% となるように、 NaOH 、 KOH を添加アルカリとして練混ぜ水に混入した。反応性骨材は骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（化学法）による測定の結果、溶解シリカ量 732mmol/l 、アルカリ濃度減少量 172mmol/l で、無害でないと判定された安山岩を用いた。反応性骨材と非反応性骨材の比率は、ペシマムを考慮して決定した。

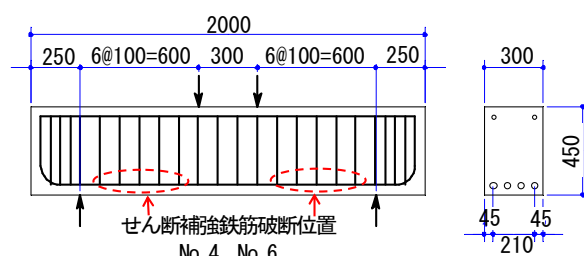
載荷試験時におけるコンクリートの材料試験結果を表－３に示す。材料試験値は、同条件で養生した円柱供試体のものである。なお、No.2 から No.6 の試験値は、全体の載荷試験期間の直前と直後に試験を実施し、その結果を平均したものである。

また、表－４に、試験体に用いた鉄筋の材料試験結果を示す。

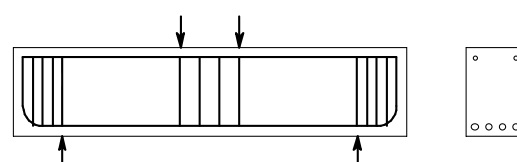
2.3 養生方法

試験体はコンクリート打設後の 1 年間は屋外で暴露を行った。しかし、屋外暴露ではアルカリ骨材反応がほとんど進展しなかったため、その後の約 18 ヶ月は、PC 工場の蒸気養生施設を利用して写真－１に示すように高温多湿の促進養生を行った。

促進養生は、養生シートで試験体を覆い、温度約 50°C の水蒸気を夕方から翌朝まで噴出させた。水蒸気は試験体中央の下側に設置された配

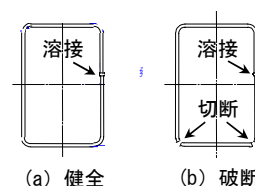


(a) せん断補強鉄筋有り



(b) せん断補強鉄筋無し

図－１ 試験体配筋図 (単位 mm)



(a) 健全 (b) 破断

図－２ せん断補強鉄筋

表－３ コンクリートの強度試験

	圧縮強度 N/mm ²	静弾性係数 kN/mm ²	引張強度 N/mm ²
No.1 (健全)	48.3	34.0	4.0
No.2-No.6 (アル骨)	40.5	26.3	3.2

表－４ 鉄筋の材料特性

鉄筋の種類	規格	静弾性係数 kN/mm ²	降伏強度 (N/mm ²)
軸方向引張鉄筋	SD490-D29	201	524
軸方向圧縮鉄筋	SD490-D16	191	548
せん断補強鉄筋	SD345-D10	196	404



写真－１ 促進養生状況（シートを外した状態）

管から下向きに噴出させ、水蒸気が試験体に直接かからないようにした。なお、PC 工場の作業サイクルに合わせたため、昼間は養生シートで覆った状態のまま存置し、蒸気は噴出していない状態とした。

2.4 補強方法

本検討では、せん断補強を目的に鋼板接着による補強を行った。これまでに、アルカリ骨材反応により劣化した部材に対し、鋼板接着による補強に関する研究は行われている²⁾が、本検討で対象とした T 型橋脚の片持ち梁部は支承等が存在するため柱部材のように巻き立て補強が困難であること、また梁の両側面と下面の 3 面補強の場合、梁下部と鋼板の間に水分が溜まる恐れがあることから、梁の両側面に鋼板接着を行う 2 面補強とした。

図-3 に補強試験体を示す。鋼板は 3.2mm 厚の SS400 材とした。補強鋼板をアンカーにより固定し、鋼板とコンクリート側面の接着にはエポキシ樹脂を注入することとした。なお、鋼板を固定するアンカーは、施工性を考慮して、貫通ボルトではなく途中定着アンカーとし、埋め込み深さは $10\phi = 130\text{mm}$ とした。表-5 に鋼材の材料特性を示す。

3. 試験体の載荷前ひび割れ状況

試験体の載荷および補強前に、各試験体側面のひび割れ観察およびひび割れ幅の測定を行った。その一例として、図-4、図-5 にそれぞれせん断補強鉄筋の無い No.2 とせん断補強鉄筋を配置した No.3 の試験体側面のひび割れ図を示す。図-4、図-5 のひび割れは、確認できた全てのひび割れを示している。また、表-6 に各試験体の最大ひび割れ幅およびひび割れ密度を示す。

図-4、図-5 に示すように、せん断補強鉄筋を配置した No.3 は、せん断補強鉄筋の無い No.2 に比べて 0.1mm より小さい微細なひび割れが多く観測された。これは、せん断補強鉄筋によりひび割れが分散されたことによるものと考え

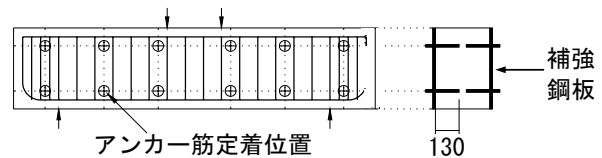


図-3 鋼板接着試験体

表-5 鋼材の材料特性

種類	規格	引張降伏強度 f_{sy} (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
補強鋼板	SS400-t=3.2	360	211
種類	規格	降伏強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
アンカー	SD345-D13	399	199

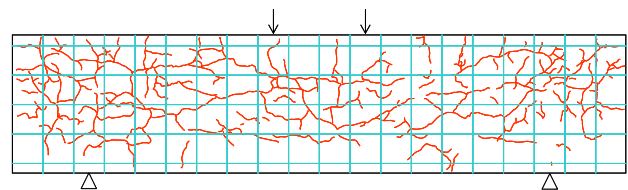


図-4 No.2 試験体ひび割れ図

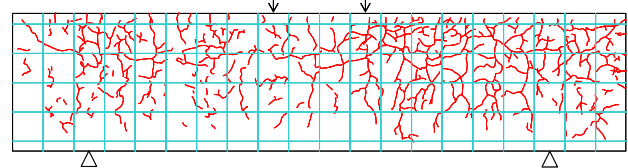


図-5 No.3 試験体ひび割れ図

表-6 最大ひび割れ幅とひび割れ密度

試験体	せん断補強鉄筋	最大ひび割れ幅 (mm)	ひび割れ密度 (本/m)
No.1	無し	健全コンクリート	
No.2	無し	0.65	3.26
No.3	健全	0.20	1.52
No.4	破断	0.40	2.83
No.5	無し	0.45	4.02
No.6	破断	0.40	3.91

えられる。

表-6 に示すように最大ひび割れ幅については、せん断補強鉄筋の無い試験体の方が大きい傾向を示している。なお、最大ひび割れ幅は、各試験体の上縁付近で観察された。これは、引張鉄筋が配置されている下縁側に比べて圧縮鉄筋が配置されている上縁側の方が軸方向鉄筋量が小さいこと、養生期間中、試験体上面に蒸気により発生した水が溜まりやすく、上面のほうが湿潤状態となり易かったことが要因と思われる。

表-6 に示すひび割れ密度は、試験体側面に

100mm 間隔のメッシュを描き、メッシュと交差する 0.1mm 以上のひび割れの数にメッシュの延長で割った値 (本/m) として求めた。健全なせん断補強鉄筋を配置した No.3 のひび割れ密度は他の試験体よりも小さい傾向を示した。また、最大ひび割れ幅も最も小さく、ひび割れの進展がせん断補強鉄筋により抑えられていると考えられる。

4. 載荷試験および考察

4.1 載荷方法

本試験では、試験体の中央 2 点を載荷点とした静的単調載荷を行った。測定項目は、ひび割れ性状、載荷荷重、軸方向鉄筋およびせん断補強鉄筋のひずみ、変位とした。

4.2 破壊状況

写真－2 から 6 に試験終了時における破壊状況を示す。また、図－6 にせん断補強鉄筋の無い試験体のせん断力変位関係、図－7 にせん断補強鉄筋を配置した試験体のせん断力と鉛直変位の関係を示す。ここで、せん断力は載荷荷重を 1/2 したものを示している。いずれの試験体も最大荷重に至るまで軸方向引張鉄筋の降伏は確認されていない。

コンクリートが健全な No.1 は、写真－2 に示すように斜めひび割れの進展に伴い圧縮縁コンクリートの圧壊が生じ、せん断圧縮破壊に至り、ゆるやかに荷重低下した。

アルカリ骨材反応により劣化した No.2 は、写真－3 に示すようにアルカリ骨材反応によって生じたひび割れを結ぶ形で斜めひび割れが進行し、このひび割れが圧縮縁に貫通し、荷重低下が急激に生じた。斜めひび割れに沿った部分のかぶりコンクリートは、荷重の低下と同時にはく落した。また、圧縮縁コンクリートの圧壊する範囲が No.1 に比べて小さく、せん断ひび割れ面におけるずれが No.1 よりも大きかった。

せん断補強鉄筋が健全な No.3 は、写真－4 に示すように、No.2 と同様に斜めひび割れが圧縮縁に貫通することで、No.1 に比べ脆性的に破壊



写真－2 No.1 試験体破壊状況



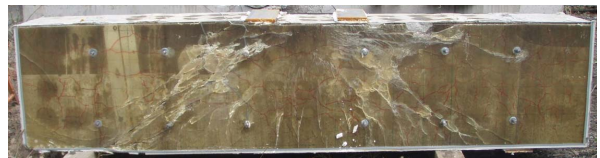
写真－3 No.2 試験体破壊状況



写真－4 No.3 試験体破壊状況



写真－5 No.4 試験体破壊状況



写真－6 鋼板撤去後の No.5 試験体

した。

せん断補強鉄筋の曲げ加工部が破断した No.4 試験体は、写真－5 に示すように、せん断補強鉄筋の無い No.2 と同様に脆性的な破壊状況となった。

以上のように、アルカリ骨材反応により劣化した試験体は、コンクリートが健全な場合と比較して破壊が脆性的になる傾向を示した。また、せん断補強鉄筋が破断している試験体は、せん断補強鉄筋が無い試験体と同様な破壊状況となる傾向を示した。

写真－6 に鋼板接着補強した No.5 について、試験終了時に鋼板を外し、エポキシ樹脂の上から確認できる斜めひび割れ状況を示す。鋼板接

着により補強した試験体では、圧縮縁における鋼板とエポキシ樹脂のはく離に伴い荷重の低下が生じ、一旦荷重が増加した後に他の試験体と同様せん断破壊した。

4.3 せん断耐力におよぼす影響

アルカリ骨材反応による劣化がせん断耐力におよぼす影響を検討するため、図－6および図－7にせん断耐力の計算値 V_d を示した。ここで V_d は、せん断補強鉄筋の効果を考慮したディープビームのせん断耐力を算出する式(1)^{3) 4)}を用いて計算した。なお、コンクリートの圧縮強度には表－3の値を用いた。

$$V_d = \frac{0.24 \cdot k \cdot f_c^{2/3} \cdot (1 + \sqrt{100p_c}) \cdot (1 + 3.33r/d)}{1 + (a/d)^2} \quad (1)$$

$$k = 1 + 7.4 \sqrt[3]{100p_w} \cdot (a/d - 0.75) / f_c^{2/3}$$

f_c : コンクリートの圧縮強度

p_c : せん断引張鋼材比, r : 支圧板の長さ

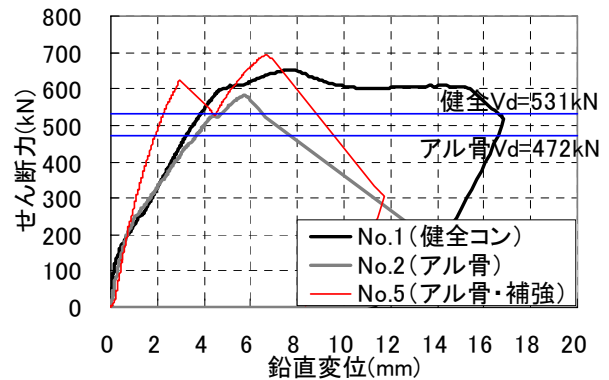
p_w : せん断補強鉄筋比

コンクリートの劣化の有無、せん断補強鉄筋の破断の有無に関わらず、最大せん断力は、いずれも式(1)により算出したせん断耐力を上回る実験結果となった。

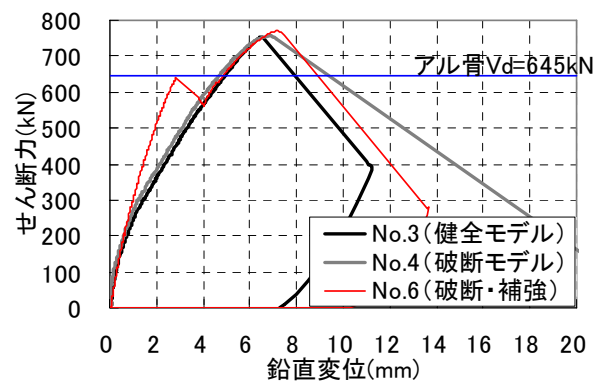
図－6に示すせん断補強鉄筋がない試験体について、コンクリートが健全な No.1 とアルカリ骨材反応により劣化した No.2 を比較すると、最大せん断力およびせん断耐力に差が生じているが、これはコンクリートの圧縮強度の差によるものと考えられ、本実験程度の劣化であれば、アルカリ骨材反応の影響によるせん断耐力の低下は見られないと考えられる。また、せん断補強鉄筋の破断の影響に関して図－7に示す No.3 と No.4 を比較すると、同様に、せん断補強鉄筋の破断がせん断耐力におよぼすの影響は見られなかった。

4.4 鋼板接着補強の効果

図－6, 7に示すように、鋼板接着により補強した No.5, No.6 試験体は、ともにせん断力 630kN 付近まで補強していない試験体より剛性が大きくなった。しかし、いずれの試験体も、



図－6 せん断力変位関係(せん断補強鉄筋無し)



図－7 せん断力変位関係(せん断補強鉄筋有り)

表－7 鋼板補強試験体のせん断耐力

せん断補強鉄筋	実験値		計算値		
	補強無し	補強有り	V_d 式(1)	V_s 式(2)	$V_d + V_s$
無し	【No2】 583kN	【No5】 679kN	472kN	598kN	1070kN
破断	【No4】 756kN	【No6】 770kN	645kN	598kN	1243kN

【 】: 試験体 No.

630kN 付近で鋼板とエポキシ樹脂のはく離が生じると同時に一旦荷重低下を生じ、補強していない試験体の変位とほぼ同じとなった。

また、表－7に鋼板接着により補強された試験体のせん断耐力について示す。せん断耐力は式(1)で求めた値に、式(2)により求めた鋼板により受けもたれるせん断耐力 V_s ⁵⁾を加えた。

$$V_s = f_{vy} \cdot z_w \cdot t_w \quad (2)$$

z_w : 腹部高さ (=h) h : 断面の高さ,

t_w : 腹部厚さ (=2t) t : 鋼板厚さ

f_{vy} : 補強鋼板のせん断降伏強度(= $f_{sy} / \sqrt{3}$)

せん断補強鉄筋の無い No.2 試験体と補強した No.5 の実験値を比較すると、表－7に示すよう

に約 16%せん断耐力が増加しており、鋼板補強による効果が見られた。しかし、式 (2) による効果を加えた計算値に対しては、実験値が大きく下回っている。今回の補強方法では、補強鋼板のせん断降伏強度を基にした計算値は、鋼板補強の効果として単純に重ね合わせができない結果となった。

破断したせん断補強鉄筋を配置した No.4 と補強した No.6 を比較すると、表 7 に示すように補強無しと補強有りとは大きな差は見られず、補強効果が認められなかった。

図 8 に、図 9 の位置で計測した No.3, 4 および 6 のせん断力とせん断補強鉄筋のひずみの関係の一例を示す。図 8 に示すように、No.3, No.4 は斜めひび割れ発生時であるせん断力約 300kN からせん断補強鉄筋のひずみが徐々に増加している。これに対して鋼板接着補強した No.6 は、せん断力約 630kN でエポキシ樹脂のはく離が生じるまではせん断補強鉄筋のひずみが最大 300 μ 程度であり、鋼板がせん断補強鉄筋に生じるひずみを抑えていることが確認される。しかし、鋼板のはく離が生じた瞬間にせん断補強鉄筋のひずみが急増し、無補強の試験体と同様な挙動を示したと考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 本実験程度の劣化やせん断補強鉄筋の曲げ加工部の破断であれば、健全な試験体と同程度のせん断耐力を有するが、破壊性状はより脆性的となった。
- (2) 鋼板 2 面接着により補強した場合、鋼板のはく離が生じるまでは荷重を分担して受け持つ効果がある。しかし、今回の補強方法では、鋼板はく離後の最終のせん断耐力について、接着した鋼板により受持たれるせん断耐力とディープビームのせん断耐力は単純に重ね合わせができなかった。

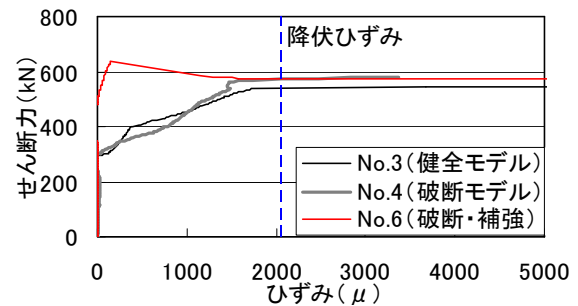


図 8 せん断補強鉄筋ひずみ

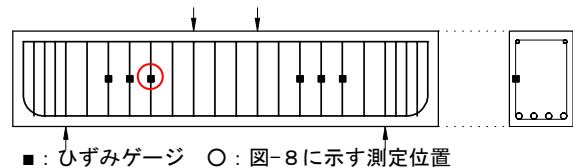


図 9 せん断補強鉄筋ひずみゲージ位置

- (3) 今後、さらに劣化が進展した試験体に対する部材耐力の検討やより効果的な補強方法の検討を行う必要があると考える。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー124 アルカリ骨材反応対策委員会報告書，丸善，2005.8
- 2) 佐野祐一，瀬戸馨，板垣正義，宮川豊章：ASRにより損傷したRC梁の耐力評価と補強設計に関する一考察，アップグレードシンポジウム論文報告集，第2巻，2002.
- 3) 二羽淳一郎：FEM 解析に基づくディープビームのせん断耐荷力算定式，第2回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，日本コンクリート工学協会，JCI-C5，pp.119-128，1983.10
- 4) 谷村幸裕，佐藤勉，渡邊忠朋，松岡茂：スターラップを有するディープビームのせん断耐力に関する研究，土木学会論文集，No.760/V-63，pp.29-44，2004.5
- 5) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼とコンクリートの複合構造物 SI 単位版，丸善，2002.12