

論文 アラミドロープを用いたRC橋脚の鉄筋段落し部のじん性補強に関する検討

三田村 浩*1・本間 淳史*2・下村 匠*3・丸山 久一*4

要旨: 近年我が国では、「緊急輸送道路の橋梁耐震補強3箇年プログラム」に基づき、多数の既設橋梁に対して耐震補強工事が実施されており、今後もこれらの補強工事は増加するものと予想される。こうした中、特に積雪寒冷地域においては、冬季の積雪・低温環境および施工期間が短いといった補強工事に配慮した新たな補強工法の開発が必要である。本研究は、新しい耐震補強工法の一手法としてアラミドロープの巻付け補強に着目し、鉄筋段落し部を有するRC橋脚柱に対して、水平方向の正負交番載荷試験を実施した。その結果、アラミドロープ巻付け補強工法は、RC橋脚柱の変形性能およびじん性率の向上に効果的であることが確認された。

キーワード: 耐震補強, アラミドロープ, 正負交番載荷試験, 変形性能, じん性率

1. はじめに

我が国では、平成7年度の兵庫県南部地震以降、緊急輸送道路における橋梁の耐震補強が進められており、現在、国と都道府県が策定した「緊急輸送道路の橋梁耐震補強3箇年プログラム」に基づき、既設橋梁の耐震補強工事が実施されている。このプログラムによる耐震補強工事は、本年度を最終年として完了する予定であるが、このプログラムはあくまで暫定的対応に過ぎず、緊急輸送道路以外の未対策橋梁への対応および恒久的対策を含めた耐震補強工法など、今後も多くの既設橋梁の耐震補強工事の実施が想定される。

特に積雪寒冷地域においては、冬季の低温環境や施工期間が短いといった耐震補強工事の施工部分に不利な条件を有するため、多数の橋梁の耐震補強工事を効率的かつ経済的に実施するためには、既往の耐震補強工法だけでなく、これらの条件に適応した新たな耐震補強工法を検討し、採用していくことも必要である。本報告では、積雪寒冷地域での経済性と施工性に配慮した耐震補強工法としてアラミドロープ巻付け補強の各ケースにおける実験およびその結果について報告するものである。

2. アラミドロープ巻付け補強

表-1に代表的耐震補強工法と本研究で対象とするアラミドロープ巻付け補強の特徴を整理した。

RC巻立て、鋼板巻立ておよび連続繊維シート巻立て工法は、コンクリート、モルタルおよび樹脂を用いて既設部との接合を図る工法である。これらの工法を積雪寒冷地域で実施する場合、長期間に渡って低温環境下での施工を余儀なくされるため、工事の施工に伴う除排雪や

防寒養生が必要となる。また、河川橋などの施工には工期的な制約があり、冬期施工が困難な場合もあるため、より施工効率の高い工法が求められる。

このように、既往の耐震補強工法のみを対象として、積雪寒冷地域で工事を実施する場合には、不経済で施工性が低下するなどリスクが大きい。

表-1 耐震補強工法の特徴

補強工法	補強効果	経済性	施工性		
			スペース	期間	防寒養生
RC巻立て工法	曲げせん断じん性	経済的	広い	長い	必要
鋼板巻立て工法	曲げせん断じん性	比較的経済的	中位	中位	必要
連続繊維シート巻立て工法	せん断じん性	比較的経済的	狭い	短い	必要
アラミドロープ巻付け	せん断じん性	経済的	狭い	短い	不要

以上の背景を踏まえて、著者らは最近研究¹⁾²⁾が進められているアラミドロープ巻付け補強に着目した³⁾。アラミドロープ巻付け補強は、アラミドの連続繊維で構成されたロープを既設部材に巻付け、ロープの拘束効果によりコンクリートの剥離を防止することで耐震性の向上を図る方法である。ロープの張力により既設部材に密着した状態を維持できるため、樹脂の含浸を伴わずに耐震補強を行うことができ、防寒養生も必要としない。また、人力による巻付け程度の張力で施工可能であるため、施工効率が高い方法である。施工性、工期短縮、経済性に利点があり、積雪寒冷地域における耐震補強工法として

*1 (独)土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム 主任研究員 博(工) (正会員)

*2 (株)高速道路総合技術研究所 橋梁研究室 室長 博(工) (正会員)

*3 長岡技術科学大学 工学部環境建設系 准教授 博(工) (正会員)

*4 長岡技術科学大学 理事・副学長 ph.D. (正会員)

の適応性を有している。

アラミドロープの製品を写真-1に示す。アラミドロープは、実用化が進んでいる連続繊維シートや連続繊維棒材に変わる新しい形態の補強材として開発された材料である。また、エポキシ樹脂などを使用しない繊維単体からなる新素材で、可搬性や作業性に優れるという利点がある。本材料はRC構造物の耐震補強に使用された実績はなく、巻付けによる耐震補強としての効果は研究段階である。



写真-1 アラミドロープ

3. 実験概要

3.1 試験体

実験は、鉄筋段落しを有する既設RC橋脚に対して、アラミドロープ巻付け補強を用いた場合の耐震補強の効果を確認することとした。試験体は、軸方向鉄筋の段落しを有する一般的なRC橋脚を想定し、実験装置の関係から実構造の1/4の規模とした。柱高は2.0m、断面は0.6×0.6mの正方形とし、基部より0.75mの高さに軸方向鉄筋の段落しを設けた。図-1に試験体の形状寸法と配筋を示す。コンクリートの圧縮強度は $f_c=24\text{Mpa}$ 、鉄筋はSD345材を用い、軸方向鉄筋はD19、帯鉄筋はD10である。柱基部における引張主鉄筋比は $P_t=0.70\%$ 、横拘束筋の体積比は $\rho_s=0.22\%$ で、鉄筋段落し部のせん断補強効果を検証するため、段落し部で曲げ破壊からせん断破壊移行型の破壊形態を示すように配筋した。

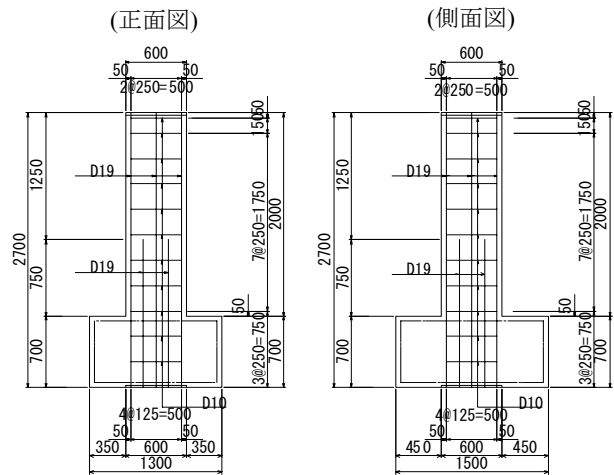


図-1 試験体の形状寸法および配筋

3.2 実験ケース

実験は、表-2に示すように、アラミドロープ補強の効果を確認するため、ケース1を補強無しの基本試験体とし、ケース2~6をアラミドロープ補強で実施した。また、アラミドシート補強と対比するために、ケース7としてアラミドシート巻立て補強を実施した。

表-2 実験ケース

実験ケース	補強方法	巻付け		補助工法
		間隔 (mm)	断面積 (mm ²)	
1	補強無し	—	—	—
2	アラミドロープ巻付け	25	11.5	全体を樹脂含浸
3		25	11.5	—
4		12.5	11.5	—
5		50	11.5	—
6		25	11.5	コーナー部に等辺山形鋼
7	アラミドシート巻立て	—	—	—

図-2に試験体補強の概要を示す。ケース2~6のアラミドロープ補強範囲は柱基部より1.6mの高さまでとし、ロープの巻付け間隔を25mm、12.5mm、50mmとした。

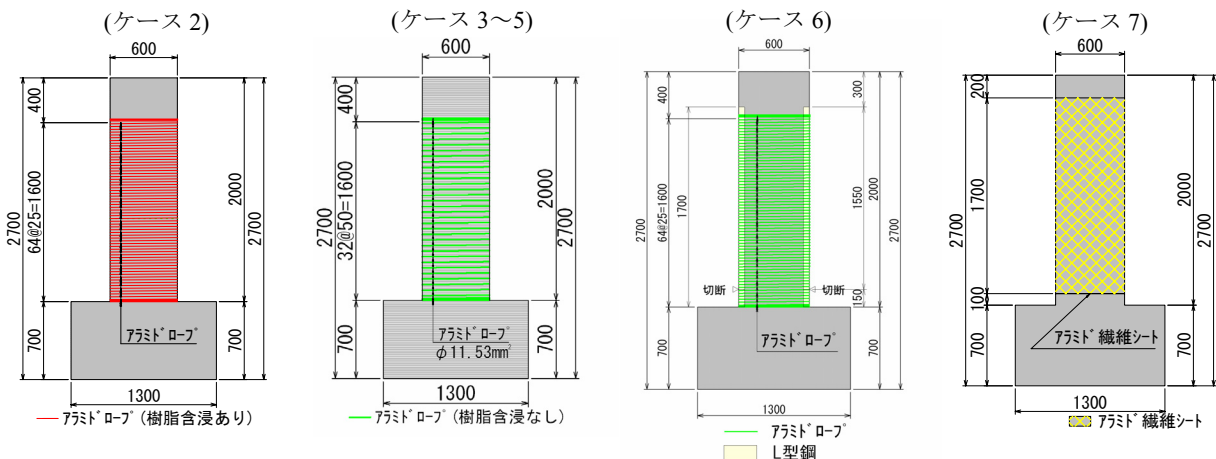


図-2 試験体補強概要図

樹脂含浸の有無による違いを確認するため、ケース 2 はロープ全体を樹脂含浸し、ケース 3～6 は樹脂含浸無しとし、端部処理は、アラミドロープを柱で結び固定した。また、ケース 6 は、ひび割れへのロープ食込み防止対策として 4 隅のコーナー部に鉛直方向に等辺山形鋼を設置した。ケース 7 は補強範囲を柱基部より 1.7m の高さに、アラミド繊維シート (AK-40・1 方向) を縦 1 層、(AK-10・2 方向) を横 1 層で巻立てた。

アラミドロープ及びアラミド繊維シートの材料諸元を表-3、表-4 に示す。なお、表-3 中の引張強度はアラミド繊維素材物性値であり、破断強度はロープとした場合の値である。鉄筋の材料諸元は、降伏点 388～413N/mm² 程度、引張強さは 559～615 N/mm² 程度である。

3.3 繰り返し載荷実験

実験は、図-3 に示す載荷装置を用いて、上部工死荷重を想定した鉛直荷重 120kN (333kN/m²) の軸力を一定に保持した状態で、水平方向の正負交番載荷試験を行った。交番載荷は、基部および段落とし部のいずれかの軸方向鉄筋ひずみが降伏ひずみに達した時点の載荷点変位を降伏変位 δ_y 、荷重を降伏荷重 P_y とし、 $2\delta_y$ 、 $3\delta_y$ ……と変位振幅を漸増させて繰り返し載荷した。載荷回数は、各変位振幅ごとに 3 回とし、載荷荷重が降伏荷重を下回った時点で載荷終了とした。

4. 実験結果

4.1 終局変位

各ケースの終局変位 (δ_u) の降伏変位 (δ_y) に対する正負載荷試験の平均値を変位じん性率として、表-5 に示す。無補強のケース 1 では、 $5.4\delta_y$ で終局変位に達しているのに対し、アラミドロープ補強のケース 2～5 およびコーナー部に鋼材を設置したケース 6 では $6.6\sim 8.0\delta_y$ まで増加しており、アラミドロープ補強により、RC 柱の変形性能が向上したと判断される。一方、アラミドシートの変位じん性率は $4.7\delta_y$ であり、アラミドロープに比較して変形性能の向上度は低い結果となった。

4.2 ひび割れおよび破壊状況

写真-2、写真-3、図-4 にケース 1 およびケース 3 の試験体のひびわれ状況を示す。

無補強のケース 1 では、 $1\delta_y$ 載荷時に段落し部に複数の水平方向ひび割れが発生し、 $2\delta_y$ 載荷以降では段落し部に損傷が集中し、 $3\delta_y$ から斜めひび割れの進展が顕著に現れた。 $4\delta_y$ でかぶりコンクリートが剥落し、 $6\delta_y$ で降伏後の段落とし部の曲げ破壊によって終了した。

アラミドロープ補強ではケース 2～5 のいずれの場合もケース 1 と同様な破壊モードで、 $1\delta_y$ 載荷時に段落し部に複数の水平方向ひび割れが発生し、 $2\delta_y$ 載荷以降では段落し部に損傷が集中し、 $3\delta_y$ から斜めひび割れが進展

表-3 アラミドロープ材料諸元

断面積 (mm ²)	11.53
引張強度 (N/mm ²)	1810
弾性係数 (N/mm ²)	66715
破断荷重 (kN)	28.45

表-4 アラミドシート材料諸元

種類	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	アラミドシート厚 (mm)
AK-40	2880	130000	0.193
AK-10/10	2630	133000	0.048

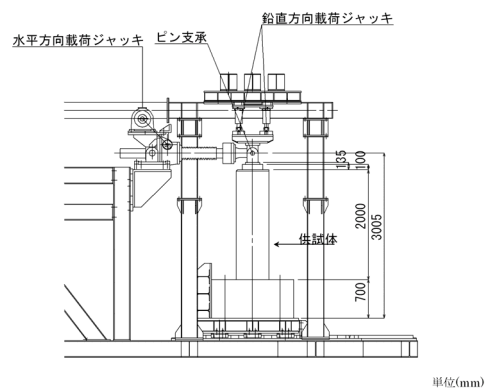
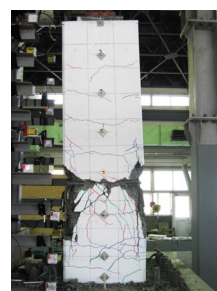


図-3 実験装置の概要図

表-5 変位じん性率

実験ケース	1	2	3	4	5	6	7
変位じん性率 (δ_u/δ_y)	5.4	6.9	6.6	8.0	8.0	7.9	4.7

(ケース 1)



(ケース 3)



写真-2 ひびわれ状況写真



写真-3 詳細ひびわれ状況(ケース 3)

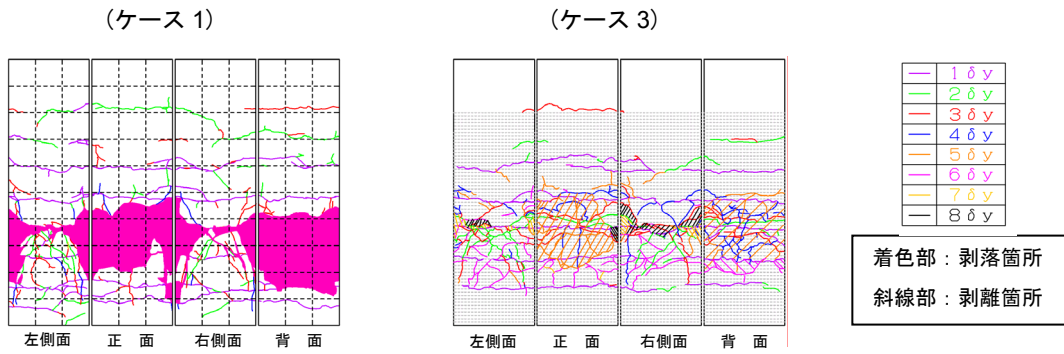


図-4 ひび割れ状況図

した。5 δ_y でかぶりコンクリートの膨らみと剥離が現れ、除々に耐力が低下した後8 δ_y 載荷時で降伏耐力以下となった。柱基部における損傷はほとんど見られなかった。

なお、ケース1に対して、ケース2~5ではひび割れたコンクリート片がアラミドロープに拘束されることで剥落が生じなかった。このことは、ケース1の終局変位6 δ_y が8 δ_y に向上したひとつの要因であると考えられる。

また、全体に樹脂を含浸したケース2は、樹脂無しのケース3~5と同様な状況であった。ケース3~5は、アラミドロープの巻付間隔をパラメータとし、25mm, 12.5mm, 50mmに変化させた実験である。巻付間隔が広がるに伴い、かぶりコンクリートの膨らみ量は大きくなったが、最大50mm間隔でも、コンクリート片が剥落することは無かった。ケース7は基部の降伏後、基部耐力に達し、曲げ補強シートが剥離したと考えられる。

4.3 降伏時の荷重および変位

図-5~図-8に代表的ケースの荷重-変位履歴曲線を、表-6に各ケースの降伏時の荷重、変位および降伏剛性を示す。

降伏荷重 P_y 、降伏変位 δ_{py} および降伏剛性 P_y/δ_{py} は、部材の弾性領域における性能を表す指標である。ケース1を基準に考えた場合、ケース3~5の降伏荷重は概ね同等であり、アラミドロープ補強による増加は見られなかった。これに対し、ケース2、ケース6では、やや増加傾向があり、ケース7では1.2倍の荷重増加が発生している。

この理由として、ケース2では柱部全面に対する樹脂の含浸、ケース6ではコーナー部の鋼材の剛性、ケース7では一般的なアラミド繊維シートによる補強効果の影響を受けたことが考えられる。

一方、降伏変位は降伏荷重と同様に、ケース3~5は概ね同等で、ケース2、ケース6、ケース7でやや増加している。これは、降伏荷重が増加したため、それに伴って降伏変位も増加したのと考えられる。

降伏剛性については、多少バラツキはあるものの、同程度の結果であった。アラミドロープ補強、アラミド繊維シート補強とも弾性領域における部材剛性の向上に

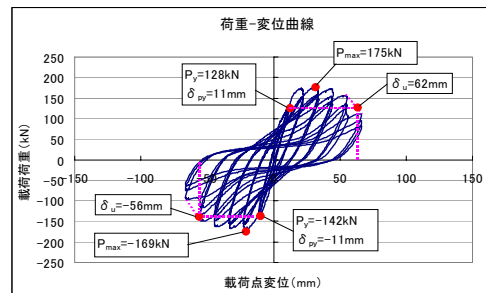


図-5 荷重-変位曲線(ケース 1)

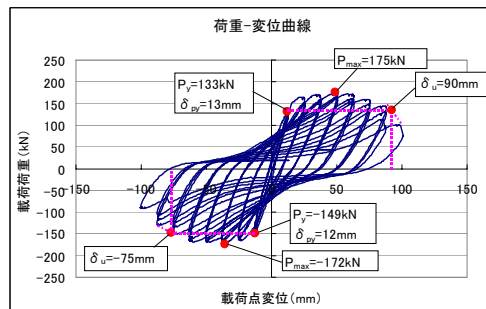


図-6 荷重-変位曲線(ケース 3)

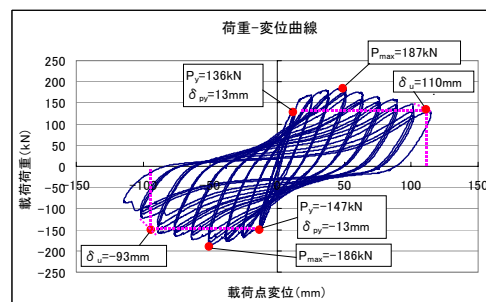


図-7 荷重-変位曲線(ケース 6)

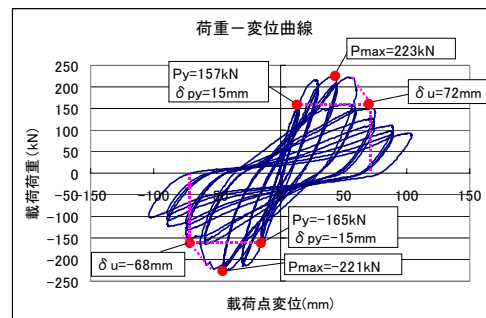


図-8 荷重-変位曲線(ケース 7)

表-6 降伏荷重, 降伏変位および降伏剛性

実験ケース	正負	降伏荷重 P_y (k N)	ケース1に 対する比率	降伏変位 δ_{py} (mm)	ケース1に 対する比率	降伏剛性 K_{py} (k N/mm)	ケース1に 対する比率
1	+	128 (144)	—	11	—	12	—
	-	-142 (144)	—	-11	—	13	—
2	+	132 (145)	1.03	13	1.18	10	0.83
	-	-157 (145)	1.11	-12	1.09	13	1.00
3	+	133 (145)	1.04	13	1.18	10	0.83
	-	-149 (145)	1.05	-12	1.09	12	0.92
4	+	124 (149)	0.97	10	0.91	12	1.00
	-	-130 (149)	0.92	-11	1.00	12	0.92
5	+	124 (149)	0.97	10	0.91	12	1.00
	-	-119 (149)	0.84	-10	0.91	12	0.92
6	+	136 (149)	1.06	13	1.18	10	0.83
	-	-147 (149)	1.04	-13	1.18	11	0.85
7	+	157 (179)	1.23	15	1.36	10	0.83
	-	-165 (179)	1.16	-15	1.36	11	0.85

注. ()内は, 降伏荷重の計算値. ただし, ケース1~6は段落し部, ケース7は基部の値を示す。

は効果が少ない結果であった。

4.4 最大耐力

各ケースの最大耐力を表-7に示す。

ケース2~5の最大耐力は, ケース1とほぼ同様の結果であった。ケース6は1.1倍程度, ケース7は1.3倍程度に増加した。これらの結果より, アラミドロープのみの補強では, 最大耐力の向上効果は得られないものと考えられる。これに対して, ケース6では最大耐力がわずかに増加している。これは, コーナー部に設置した鋼材により, ロープの食込みが防止されたことおよび鋼材の剛性が曲げ補強効果を誘発した影響によるものと考えられる。また, ケース7のアラミド繊維シート補強の比率が高いのは, 基部10cmを除いた全面積にシートと柱の樹脂含浸による接着効果が発揮され, 基降落伏後の柱中央部の曲げ変形に対し, シートの引張強度が作用して, 曲げ補強効果の役割を果たした事によるものと考えられる。

4.5 変形性能

各ケースの変形性能を比較するため, 終局変位の降伏変位に対する比で表されるじん性を表-8に示す。

ケース1と比較して, ケース2およびケース3が1.2倍, ケース4およびケース5が1.5倍, ケース6が1.6倍程度のじん性率となっており, アラミドロープ補強は各ケースとも増加する結果となった。また, ケース7のアラミド繊維シート補強については0.9倍であり, じん性率の増加は見られなかった。ケース2~6でじん性率が増加しており, アラミドロープ補強工法においても, 変形性能は向上することが確認された。また, ケース2とケース3の結果から, 樹脂含浸の有無によって変形性能の向上度には差が現れていない。これは, 繊維シートと違ってロープ形状であることから樹脂の含浸面積がほとんど無いことに起因しているものと考えられる。

表-7 最大耐力

実験ケース	正負	最大耐力 P_{max} (k N)	ケース1に 対する比率
1	+	175 (161)	—
	-	-169 (161)	—
2	+	179 (161)	1.02
	-	-179 (161)	1.06
3	+	175 (161)	1.00
	-	-172 (161)	1.02
4	+	184 (165)	1.05
	-	-185 (165)	1.09
5	+	186 (165)	1.06
	-	-185 (165)	1.09
6	+	187 (165)	1.07
	-	-186 (165)	1.10
7	+	223 (210)	1.27
	-	-221 (210)	1.31

注. ()内は, 最大耐力の計算値. ただし, ケース1~6は段落し部, ケース7は基部の値を示す。

表-8 じん性率

実験ケース	正負	変位(mm)		じん性率 δ_u/δ_{py}	ケース1に 対する比率
		δ_{py}	δ_u		
1	+	11	62	5.6	—
	-	-11	-56	5.1	—
2	+	13	90	6.9	1.23
	-	-12	-82	6.8	1.33
3	+	13	90	6.9	1.23
	-	-12	-75	6.3	1.24
4	+	10	83	8.3	1.48
	-	-11	-85	7.7	1.51
5	+	10	82	8.2	1.46
	-	-10	-78	7.8	1.53
6	+	13	110	8.5	1.67
	-	-13	-93	7.2	1.41
7	+	15	72	4.8	0.86
	-	-15	-68	4.5	0.88

ケース3～5では、アラミドロープの巻付け間隔を変化させているが、巻付け間隔とじん性率との相関は得られていない。ケース3の1.2倍に対して、巻付け間隔が狭いケース4、および広いケース5は、いずれも1.5倍程度となっている。これは、ケース3とケース4、5の実験実施年度によるコンクリートの材料強度がそれぞれ25.2N/mm²と31.2N/mm²で若干異なったため、このような結果になったものと推定される。これらのことから、本実験で設定した範囲においては、アラミドロープ巻付間隔の変形性能への影響度は小さいものと考えられる。

また、コーナー部に鋼材を設置したケース6は、他のアラミドロープ補強よりもじん性率が増加しており、鋼材による補強効果の影響が現れた結果となった。

4.6 エネルギー吸収量

各ケースの履歴吸収エネルギーの累積値を図-9に示す。また、正負交番載荷試験結果の $6\delta_y$ における累積エネルギー吸収量を表-9に示す。

$6\delta_y$ までの累積吸収エネルギー量に着目した場合、ケース1に対して、ケース2～7はそれぞれ、1.7倍、1.5倍、1.3倍、1.2倍、1.6倍、1.6倍の結果となった。

ケース2～6の結果より、アラミドロープによって補強した場合、エネルギー吸収量は増加する。ケース2、3がケース4、5に比べてエネルギー吸収量が大きいのは、実施年度の材料強度の差によるものと考えられる。ケース2と3の開差は、ケース2がロープ部全面に樹脂含浸を行っているためである。ケース4と5ではケース4のエネルギー吸収量がわずかに多いが、これはアラミドロープ巻付け間隔の狭い方が、広い方よりエネルギー吸収量が多くなることを示す結果である。また、ケース6が4より大きいため、コーナー部の鋼材設置にエネルギー吸収効果があったものと判断される。ケース7のアラミドシート補強についても、変形性能の向上は確認されなかったが、エネルギー吸収量は1.6倍まで増加する結果となった。

5. まとめ

本研究では、段落し部を有する既設RC橋脚に対するアラミドロープ巻付けによる耐震補強の効果を確認することを目的に、矩形柱状のRC試験体に関して水平方向に正負交番載荷実験を行った。実験結果より得られた知見を整理すると、以下のとおりである。

(1)アラミドロープ巻付け補強により、RC柱の変形性能およびエネルギー吸収量が向上する。ただし、降伏剛性や最大曲げ耐力の増加は見られない。

(2)アラミドロープ巻付け補強において、樹脂を全面に含浸した場合と含浸しない場合では、変形性能の向上効果に差は見受けられないが、エネルギー吸収量は樹脂を含浸した場合がやや大きくなる。

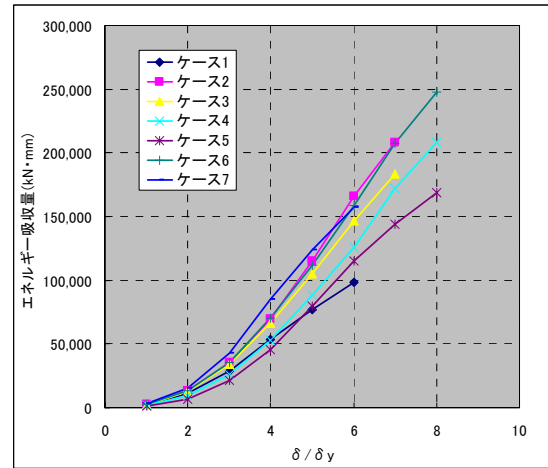


図-9 エネルギー吸収量

表-9 $6\delta_y$ における累積エネルギー吸収量

実験ケース	1	2	3	4	5	6	7
累積エネルギー吸収量 (kN・mm)	99,000	166,000	146,000	126,000	115,000	158,000	157,000
ケース1に対する比率	—	1.68	1.47	1.27	1.16	1.60	1.59

(3)アラミドロープ巻付け補強において、コーナー部に鋼材を設置した場合、設置しない場合に対して変形性能やエネルギー吸収量が向上する。

(4)アラミドロープ巻付け間隔を狭くした場合、RC柱の最大曲げ耐力およびエネルギー吸収量が増加する。ただし、降伏剛性や変形性能は増加しない。

本実験により、アラミドロープ巻付け工法がじん性補強（変形性能の向上）に有効であり、人力で施工できることから施工効率が高く、かつ、防寒養生が不要となることから、積雪寒冷地域での適合性に優れた一手法である。しかし、現在、全国的にフルスペックでの耐震補強設計に移行することから、今後、この手法を基本に曲げ補強効果を取り入れた補強手法も必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 田坂雄治, Nguyen Hung. P, 下村 匠, 関島謙蔵 : ロープ状連続繊維補強材によるコンクリート部材のせん断補強, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.60, pp.CS16-010, 2005
- 2) N.H.Phon, T.Shimoura, K.Sekijima, and K.Maruyama : Experimental study on shear behavior of concrete beams reinforced with continuous fiber rope, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, NO.2, pp.1441-1446, 2005
- 3) 笠井尚樹, 渡辺忠朋, 三田村浩, 石川博之, 丸山久一 : ロープ状連続繊維補強材を用いた RC 橋脚の段落し部せん断補強に関する検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.61, pp.963-964, 2006