

論文 鋼板拘束による橋脚補強効果に関する検討

安田扶律*¹・幸左賢二*²・須田久美子*³・新保弘*⁴

要旨：既存のRC橋脚をRC・鋼板併用工法で補強する場合において、巻立て鋼板の厚さならびにジベルの有無が橋脚の変形性能に与える影響を1/6スケール(70cmx70cm)の模型実験により評価した。ついで、一連の同一断面形状のRC補強およびRC・鋼板併用補強実験結果を基に、帯鉄筋比の増加がじん性率およびエネルギー吸収面積の向上に与える影響について評価した。その結果RC・鋼板併用試験体については、換算帯鉄筋比0.5%程度では補強前に比較してじん性率および吸収エネルギー面積の大幅の増加が認められた。これに対して、換算帯鉄筋比をさらに増加させても、じん性率、エネルギー吸収面積の増加は比較的小さく、限界値が認められる結果となった。
キーワード：耐震、補強、じん性、鋼板巻立て、RC巻立て、正負交番載荷

1. まえがき

既設RC橋脚を耐震補強し、巨大地震に対しても十分耐えるためには、耐力ばかりでなく変形性能を向上させてねばり強い構造とする必要がある。ここでは、既存のRC橋脚をRC・鋼板併用工法で補強する場合について、巻立て鋼板の厚さならびにジベルの有無が橋脚の変形性能に与える影響を1/6スケールの模型実験により評価した。ついで、一連の同一形状のRC補強およびRC・鋼板併用補強実験結果を基に、帯鉄筋比の増加がじん性率およびエネルギー吸収面積の向上に与える影響について評価した。

2. 実験

2. 1 試験体形状

既往の実験結果^{1)、2)}によると、既設RC試験体をRC巻立て、RC・鋼板巻立てにより補強することにより、じん性率を6～8程度に増加できることが明らかとなっている。しかしながら、巨大地震を対象として補強設計を実施する場合、10程度のじん性率を期待する場合がある。そこで、このようなじん性率を厚い鋼板あるいはジベルの補強によって可能であるかについて検討を加えた。試験体は巻立て鋼板の厚さおよびジベルの有無に着目し、表-1に示す4体とした。ここで、試験体番号は3章で既往実験結果とまとめて拘束効果の検討を行うために、NO.18～21としている。ジベル付試験体(NO.19およびNO.21)の外形状および配筋を図-1に示す。使用材料を表-2に示す。NO.18およびNO.19は図-1と同じ配筋でジベルのみが無い試験体である。ジベルにはM3全ねじ棒を使用し、長さは既設橋脚の補強の観点から既設部帯鉄筋から必要最小限の定着長(50φ)を確保している。試験体の製作手順としては、既設部分(図-1断面図の点線内)の配筋後フーチングコンクリートを打設し新設部分の部材軸方向鉄筋をあと施工アンカー

*1 阪神高速道路公団 工務部 設計課 係長、工修(正会員)

*2 阪神高速道路公団 復旧建設部 工事課 専門役、Ph.D(正会員)

*3 鹿島建設(株) 技術研究所 第一研究部 第1研究室 主任研究員(正会員)

*4 鹿島建設(株) 技術研究所 第一研究部 第1研究室 工修(正会員)

で定着し、柱部の配筋を施し巻立て鋼板およびジベルを設置し柱部の新旧部分のコンクリートを同時に打設した。すなわちここでは柱部新旧コンクリートの打継ぎによる影響は考慮していない。

2. 2 加力方法

加力要領図を図-2に示す。軸力は加力フレームに水平方向のスライド装置を介して取り付けられたジャッキにより、常に鉛直方向に一定圧縮力になるように制御した。平均軸圧縮応力度は13.1kgf/cm²である。水平力は、RC断面計算により求めた降伏荷重を基に、降伏荷重以前は荷重制御で、降伏荷重以降は変位制御で、降伏荷重時の変位 δ_y の整数倍で繰り返し数3回の正負交番載荷した。降伏荷重は最外縁の引張鉄筋が降伏ひずみに達した時の荷重としている。

2. 3 実験結果

代表的試験体の荷重-変位関係を図-3, 4に示す。破壊状況はジベルの有無に拘わらず鋼板厚さが同じNO.18およびNO.19, NO.20およびNO.21ではほぼ同様であった。NO.18およびNO.19では1~2 δ_y で鋼板とコンクリートの剥離が開始し、6 δ_y で最大荷重となった。7~8 δ_y で鋼板の端部がスカート状に広がり始めた。9 δ_y から柱鉄筋が破断し11 δ_y で最大荷重の50%以下に荷重が低下した。最終状態ではジベルが無いNO.18に比べ、ジベルのあるNO.19は加力面および加力側面ともに鋼板端部の広がりがやや抑えられていた。NO.20およびNO.21では、1~2 δ_y で鋼板とコンクリートの剥離が開始し、7 δ_y で最大荷重となった。8~9 δ_y で鋼板の端部がスカート状に広がり始めた。10 δ_y から柱鉄筋が破断し12 δ_y で最大荷重の50%以下に荷重が低下した。

表-1 試験体の種類

試験体No.	巻立て鋼板厚さ(mm)	ジベル
18	1.6	なし
19	1.6	あり
20	3.2	なし
21	3.2	あり

表-2 使用材料一覧表

(a) 使用材料

コンクリート	設計基準強度 270kgf/cm ² 粗骨材の最大寸法 20mm
鉄筋	軸方向鉄筋 D10 SD295 帯筋 D6 SD295相当
鋼板	SPHC材
ジベル	M3 SUS304
あと施工アンカー	M12 SD345相当

(b) コンクリートの実験時圧縮試験結果

試験体No.	圧縮強度 (kgf/cm ²)	静弾性係数 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)
18	314	2.62
19	314	2.62
20	282	2.40
21	291	2.48

(c) 鋼材の引張試験結果

鋼材の種類	降伏応力度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)
軸方向鉄筋D10	3,890	5,590
帯筋D6	3,340	4,550
1.6mm鋼板	2,640	3,625
3.2mm鋼板	2,560	3,550

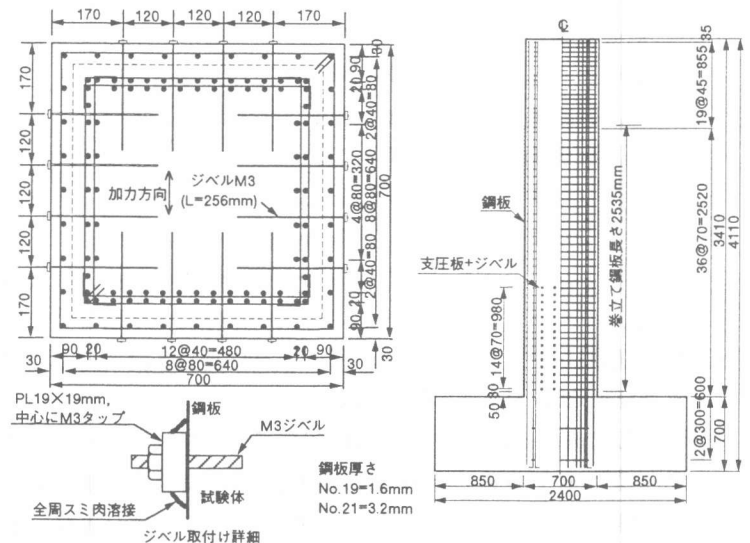


図-1 試験体形状および配筋

最終状態ではジベルが無いNO. 20に比べ、ジベルのあるNO. 21は加力面および加力側面ともに鋼板端部の広がりや抑えられていた。表-3に最大荷重の80%まで荷重が低下したときの変位を終局変位として算出したじん性率を示す。ここでは、RC断面計算において全引張鉄筋の図心位置におけるひずみが軸方向鉄筋の降伏ひずみ (1852×10^{-6}) に達したときの荷重を降伏荷重としそのときの変位を実験により得られた荷重変位関係から求めた。表-3より、鋼板厚さの影響を比較すると、NO. 18, 19のじん性率が7.5程度であるのに対して、NO. 20, 21のじん性率は8.3程度と若干の増加が見込まれた。これに対して、ジベルの有無ではそれぞれ7.5(NO. 18)と7.6(NO. 19)および8.3(NO. 20)と8.4(NO. 21)となりほとんど変化は認められなかった。また、エネルギー吸収面積は第1サイクル時における水平変位包絡線の終局変位までの面積で表しているが、いずれもほとんど変わらない結果となっている。

3. 鋼板・鉄筋拘束効果の評価

3. 1 評価手法

2章の実験によって、鋼板巻立て厚さあるいはジベル定着の有無にかかわらずじん性率の向上に上限値がある可能性が指摘された。ここでは、過去阪神道路公団で実施した実験結果を基に、帯鉄筋比とじん性率、エネルギー吸収量の関係について考察を加える。詳細な実験結果は参考文献^{1), 2)}に示されているが基本形状60x60cmのRC試験体にRC巻立て、鋼板巻立て、RC・鋼板巻立て補強などを実施している。従来の実験試験体に比べると帯鉄筋比を大幅に増加させたものが多い。ここで、実験のじん率算出にあたり、終局変位は前記と同様に最大荷重の80%ま

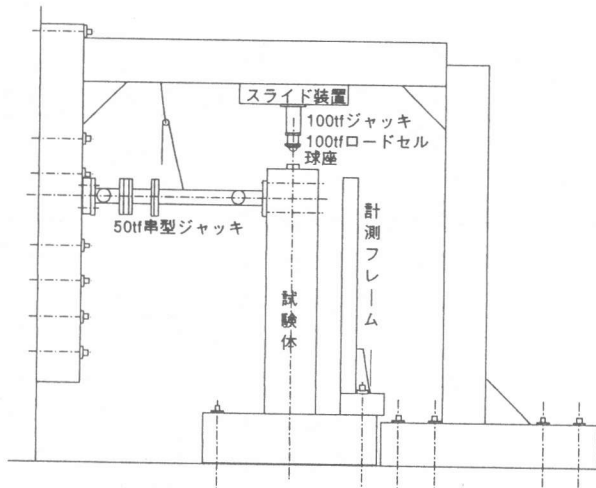


図-2 加力要領図

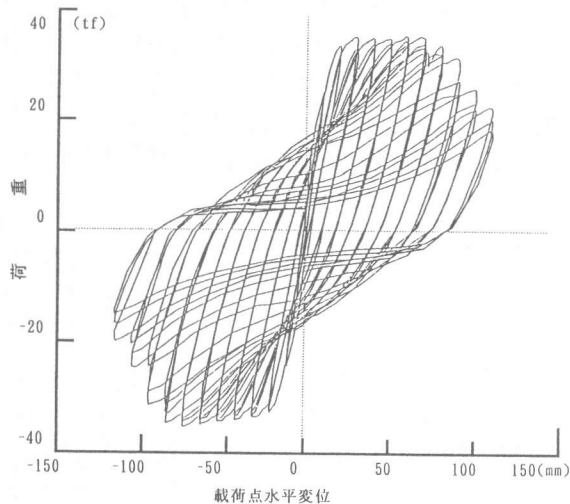


図-3 荷重-変位関係(NO. 18)

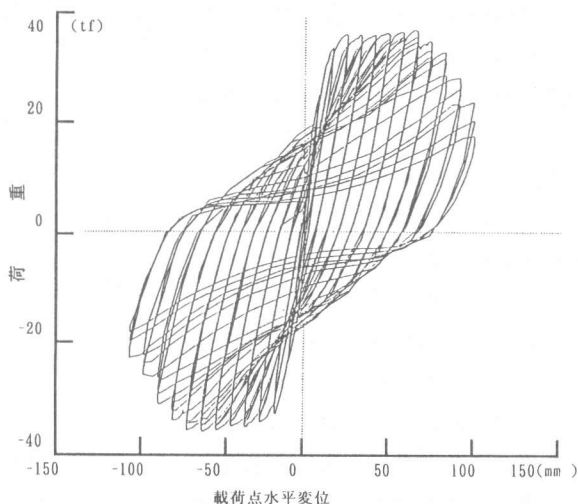


図-4 荷重-変位関係(NO. 20)

表-3 実験結果一覧表

試験体 No.	降伏荷重の計算値 (tf)	降伏変位 (mm)	終局変位 (mm)	じん性率	吸収エネルギー (tf・m)
18	28.4	13.16	98.83	7.5	3.1
19	28.2	12.79	96.74	7.6	3.0
20	28.1	11.23	92.82	8.3	3.0
21	27.5	11.61	97.11	8.4	3.0

で載荷荷重が低下したときの変位とし、降伏変位は鉄筋降伏荷重まで載荷したときの変位としている。帯鉄筋比は断面積比として算出し、ジベルなどは帯鉄筋としては考慮していない。また、鋼板の帯鉄筋比への換算は、降伏応力の比で補正した値としている。

3. 2 R C 試験体の評価

図-5, 表-4にRC供試体の帯鉄筋比とじん性率の関係を示す。表-4には比較のため復旧仕様(土研式)³⁾および土木学会式⁴⁾により算定されたじん性率も示す。図-5に示すように実験値は帯鉄筋の増加に伴い、帯鉄筋比が0.3%でじん性率が6、帯鉄筋比が0.6%でじん性率が7.5程度に増加していることがわかる。帯鉄筋比とじん性率の関係を一次線形とみなして求めると(1)式が得られる。

a) 実験結果

$$\mu = 3.81 P_w + 5.04$$

b) 復旧仕様による解析結果

$$\mu = 7.33 P_w + 1.41$$

(1)

これに対して復旧仕様によるじん性率は、帯鉄筋が少ない0.3%では3.5程度と実験値の6よりもかなり小さいが帯鉄筋が大きい0.6%では6程度と実験値の値に近づいてくる。また、土木学会式では、適用範囲外であるものもあるが、一般的に実験値に比べて過大評価となっていることがわかる。これは、土木学会式は、既往の0.4%程度までの従来の構造物を評価対象としているため、本研究のような高帯鉄筋比についてはばらつきが大きくなることなどが考えられる。図-6に帯鉄筋比とエネルギー吸収面積の関係を示す。ここで、エネルギー

表-4 RC補強実験結果

	帯鉄筋比 pw(%)	じん性率 μ			吸収エネルギー (tf・m)	
		実験値	土研式	土木学会	実験値	土研式
No3	0.11	5.21	2.60	8.40	1.84	0.56
No4	0.11	5.25	2.60	8.38	1.86	0.56
No8	0.60	8.66	6.70	(26.89)*1	5.01	2.29
No9	0.60	5.66	6.70	(26.84)	3.11	2.28
No12	0.27	6.10	3.12	13.10	3.66	0.97
No13	0.27	6.41	3.12	12.96	3.93	0.97
No14	0.27	6.54	3.24	13.09	4.00	0.98
No12'	0.58	7.68	4.88	(26.05)	4.19	1.65
No22	0.11	6.14	2.69	8.36	1.87	0.54
No23	0.11	5.22	2.74	8.31	1.68	0.55
oogata	0.30	5.50	3.14	9.10	- *2	-
kogata	0.30	6.00	2.00	10.08	-	-

*1 ()内は適用範囲外の値を示す

*2 形状が異なるため比較せず

表-5 鋼板巻立て補強実験結果

	帯鉄筋比 pw(%)		じん性率 μ			吸収エネルギー (tf・m)	
	鉄筋のみ	鋼板含む	実験値	土研式	土木学会	実験値	土研式
No5	0.11	0.51	7.45	3.62	(20.33)*1	3.82	1.27
No6	0.11	0.51	5.38	4.78	(27.72)	2.12	1.21
No7	0.11	0.51	5.34	4.74	(27.46)	2.03	1.18
No10	0.20	0.55	7.55	6.21	(24.79)	3.92	2.09
No11	0.20	0.55	6.32	6.28	(24.98)	3.14	2.16
No18	0.39	0.73	7.51	5.40	(32.11)	3.10	1.93
No19	0.39	0.73	7.56	5.40	(32.41)	3.00	1.93
No20	0.39	1.08	8.27	7.83	(46.41)	3.00	3.07
No21	0.39	1.08	8.36	7.83	(47.02)	3.00	3.07
No24	0.20	0.53	7.54	2.96	(27.09)	2.62	1.17
No25	0.20	0.53	8.24	4.22	(26.63)	3.00	1.40
No26	0.20	0.53	8.72	5.20	(26.72)	3.12	1.49
No27	0.11	0.49	6.88	4.42	(17.76)	3.44	1.78

*1 ()内は適用範囲外の値を示す

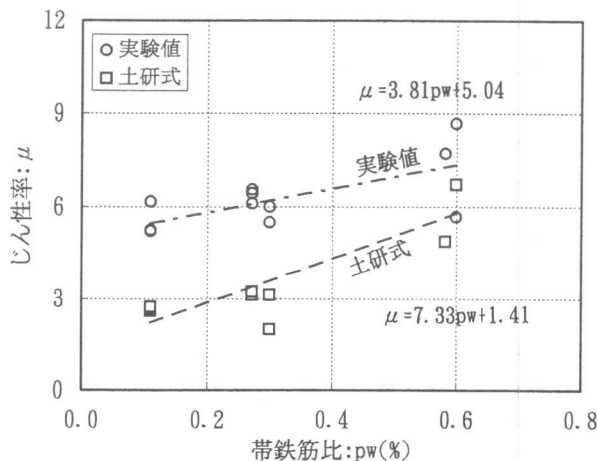


図-5 帯鉄筋比とじん性率の関係

ギー吸収面積は前記と同様に第1サイクル時の水平変位包絡線の終局変位までの面積である。図から分かるとおり、帯鉄筋比-じん性率関係に近似しているが帯鉄筋比が0.3~0.6%の範囲にわたって解析値はかなり安全側の傾向となっている。

3. 3RC・鋼板併用試験体の評価
 図-7、表-5は、RC鋼板併用試験体について、帯鉄筋比とじん性率の関係を示す。図に示すとおり、0.5%程度では、鋼板の設置とともに、補強前に比べてじん性率の大幅な増加が認められる。しかしながら、前述のように $t=3.2\text{mm}$ 、換算帯鉄筋比を1.1%としても、じん性率の増加は小さくなっている。換算帯鉄筋比とじん性率の関係を一次線形とみなして求めると(2)式が得られる。

a) 実験結果

$$\mu = 2.34 P_w + 5.82$$

b) 復旧仕様による解析結果

$$\mu = 5.57 P_w + 1.73$$

(2)

(1)式に比べる実験結果のじん性率の増加が小さいことがわかる。同様に他の実験^{5)、6)}でもこのような傾向が認められており、概ねこのような道路橋RC橋脚を対象とした実験では、じん性率は10程度が限界と考えられる。これには以下のような要因が考えられる。

a) 帯鉄筋比の増加に伴い、試験体の損傷パターンはせん断破壊、曲げせん断破壊、曲げ破壊形式に変化する。帯鉄筋比の増加は、せん断損傷パターンの範囲には非常に有効であるが、曲げ損傷パターンにおいては じん性の増加傾向が減少する。

b) 帯鉄筋に比べて鋼板は換算帯鉄筋比で評価されるよりも補強効果が若干小さい。

次に、換算帯鉄筋比と吸収エネルギー面

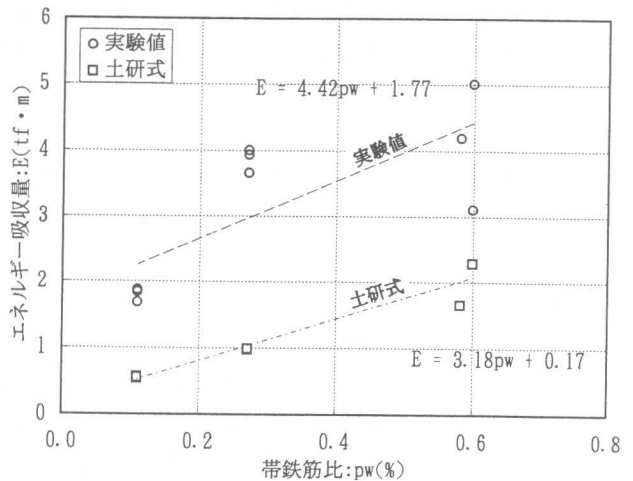


図-6 帯鉄筋比とエネルギー吸収面積

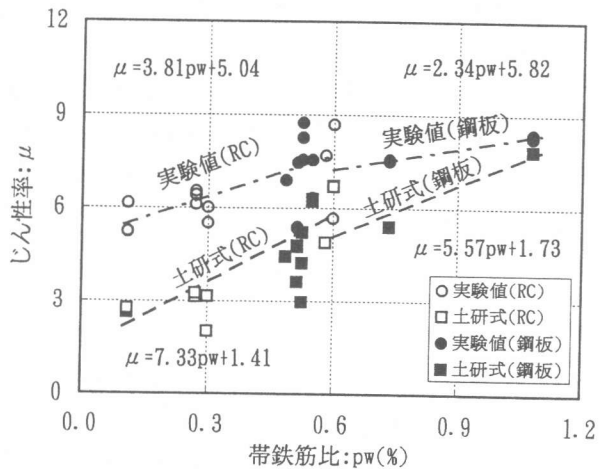


図-7 帯鉄筋比とじん性率の関係

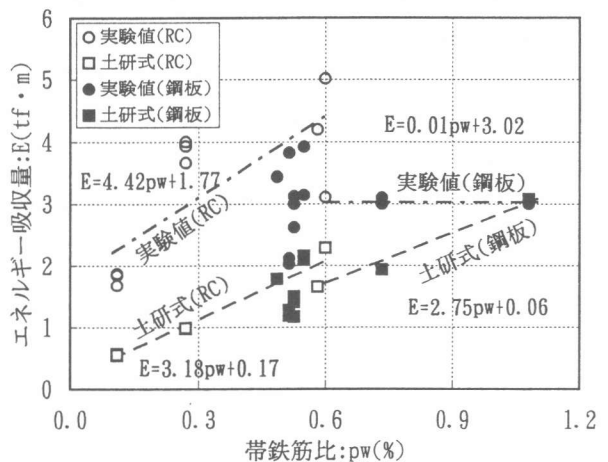


図-8 帯鉄筋比とエネルギー吸収面積

積の関係を図-8に示す。換算帯鉄筋比と吸収エネルギー面積関係は、0.6%までのRC試験体に比べると換算帯鉄筋の増加に伴うエネルギー吸収面積の増加がほとんどない結果となっている。

4. まとめ

RC鋼板併用工法において、巻立て鋼板の厚さならびにジベルの有無をパラメーターとした実験および一連の同一形状の補強試験体の実験結果を用いた解析により得られた主な結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 鋼板厚(1.6, 3.2mm)をパラメーターとした実験結果においては、鋼板厚を増してもじん性率増加は7.5から8.3程度と比較的小さかった。また、ジベルの有無をパラメーターとした実験ではじん性率の増加はほとんど認められなかった。
- 2) 0.6%程度までの帯鉄筋比を対象とした、RC補強実験試験体は補強前と比較して帯鉄筋比の増加とともにじん性率は6から8に、吸収エネルギー面積は1.8tf・mから4.0tf・mと大幅な向上が認められた。復旧仕様による解析値は実験結果と比較して、じん性率およびエネルギー吸収面積ともかなり安全側の値となった。また、土木学会式のじん性率は実験結果とかなり異なる傾向が得られた。
- 3) RC・鋼板併用試験体については、換算帯鉄筋比0.5%程度では補強前に比較してじん性率および吸収エネルギー面積の大幅な増加が認められた。これに対して、換算帯鉄筋比をさらに増加させても、じん性率および吸収エネルギー面積の増加は比較的小さかった。また、復旧仕様による解析値は、じん性率およびエネルギー吸収面積ともほぼ実験値に対応する傾向が得られた。

参考文献：

- 1) 横井・藤井・安田・幸左：損傷を受けた橋脚の補強効果に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，第18巻第2号，1996.7.
- 2) 幸左・大塚・星隈・中島：RC橋脚の補強手法に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，第18巻第2号，1996.7.
- 3) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様，1995.2.
- 4) 土木学会：阪神淡路大震災被害分析と靱性率評価式，コンクリートライブラリー12，1996.7.
- 5) 金子・山田・宇佐見：既設RC橋脚の耐震性向上に関する実験検討，土木学会51回年次学術講演会第5部門，1996.9.
- 6) 西川・渡辺・佐藤・谷村：鋼板巻き補強柱部材の変形性能，コンクリート工学年次論文報告集，第18巻第2号，1996.7.