

繊維ロープ巻付け補強に関する実験的研究（その2：実験式の提案）

Experimental formula of seismic strengthening method for RC pier used continuous fiber rope

独立行政法人土木研究所寒地土木研究所	○正 員	三田村浩 (Hiroshi Mitamura)
独立行政法人土木研究所寒地土木研究所	正 員	佐藤 京 (Takashi Sato)
株式会社 高速道路総合技術研究所	正 員	塩畑英俊 (Hidetoshi Shiohata)
北武コンサルタント株式会社	正 員	渡辺忠朋 (Tadatomo Watanabe)
長岡技術科学大学	フェロー	丸山久一 (Kyuichi Maruyama)

1. はじめに

既設の鉄筋コンクリート橋脚に対する、新たな補強工法として、著者らは、連続繊維を用いた新たな補強工法である繊維ロープ巻付け補強に関する研究を行ってきた^{1)・2)}。本稿では、繊維ロープ巻付け補強に関する実験研究（その1：載荷実験）¹⁾で述べた、10体の供試体の正負交番載荷試験の実験結果を基に、繊維ロープ巻付け補強工法の補強効果を定義するとともに、ロープ巻付け補強工法の補強効果を予測する実験式の提案を行う。

2. 補強効果の定量化

2.1 補強効果の定義

繊維ロープ巻付け補強による補強効果について整理するために、RC 橋脚の荷重-変位関係包絡線を図-1 のようにモデル化した。図中に示した荷重-変位関係包絡線モデルの限界点A点からD点を、それぞれ次のように定義した。

- A点：最外縁の軸方向鉄筋が降伏ひずみに達する荷重(降伏荷重)点。
- B点：最大荷重に達したと考えられる点。
- C点：耐力が低下し始める点。
- D点：降伏荷重(A点の荷重)を維持できる最大変位点。

これらの定義に基づき、実験から得られた荷重-変位関係包絡線にA点からD点を設定した例として、供試体 No.1 と供試体 No.2 のものを図-2 に示す。図に示した荷重-変位関係包絡線は、載荷試験から得られた荷重変位履歴曲線¹⁾の各載荷ステップ (δy) の1 サイクル目の荷重時を結んだものである。ここで、降伏荷重点A点は、軸方向鉄筋の柱基部のひずみの測定値が、材料試験から得られた降伏ひずみ 2164μ に達した点として設定した。また、耐力低下開始点C点は、荷重-変位履歴関係のピーク荷重が、安定して保持できた最後の載荷ステップの変位として設定した。

図-2(a) と (b) からわかるように、アラミド繊維ロープを 25mm 間隔で巻付けた供試体 No.2 は、無補強の供試体 No.1 に比べて、耐力低下開始点C点の変位が大きく、また、耐力低下開始後の荷重-変位関係の下降勾配が緩やかであることがわかる。

このことから、繊維ロープ巻付け補強の補強効果とは、耐力低下が開始する変位が大きくなること（C点変位の増大）と、耐力低下開始後の荷重-変位関係の下降勾配

が緩やかになること（C-D勾配の変化）であると言える。また、実験結果から、ロープ巻付け補強によっては、部材の最大曲げ耐力は増加しないことが確認された。全 10 体の供試体の荷重-変位関係包絡線から得られたC点およびD点の荷重と変位を、表-1 に示す。

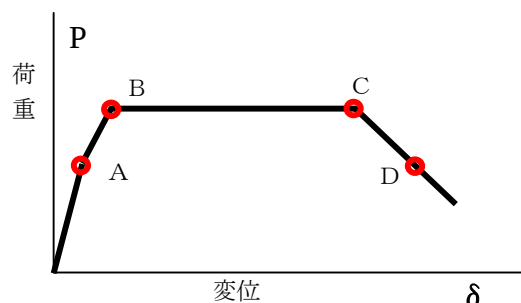


図-1 荷重-変位関係包絡線モデル

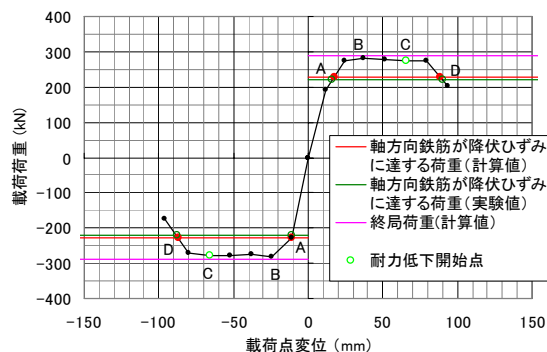


図-2 (a) 荷重-変位関係包絡線（供試体 No.1）

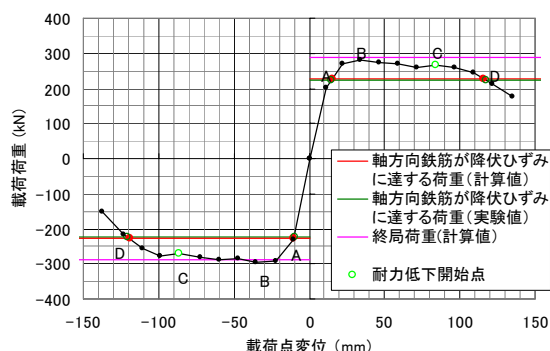


図-2 (b) 荷重-変位関係包絡線（供試体 No.2）

表-1 全供試体の C 点および D 点の荷重と変位

供試体 No.	C点(耐力低下開始点)						D点(降伏耐力を維持できる最大変位点)					
	Pm (kN)※			δ m (mm)			Pn (kN)			δ n (mm)		
	正側	負側	平均	正側	負側	平均	正側	負側	平均	正側	負側	平均
1	280.94	280.76	280.85	65.3	65.5	65.4	220.40	221.90	221.15	90.3	88.0	89.2
2	279.41	296.13	287.77	83.7	86.1	84.9	223.50	225.20	224.35	117.3	120.5	118.9
3	275.36	293.35	284.36	64.6	64.3	64.4	217.60	228.00	222.80	82.7	82.1	82.4
4	282.14	286.46	284.30	85.0	72.7	78.9	221.40	214.40	217.90	116.4	121.4	118.9
5	271.12	285.89	278.51	73.1	74.1	73.6	216.10	224.90	220.50	103.9	106.1	105.0
6	296.05	285.80	290.93	56.0	55.9	55.9	220.63	228.05	224.34	-	-	-
7	271.80	306.04	288.92	72.9	86.3	79.6	236.88	229.47	233.17	95.6	111.3	103.5
8	275.19	295.16	285.18	84.9	72.8	78.9	189.94	226.50	208.22	117.2	110.2	113.7
9	493.01	522.02	507.52	57.9	58.9	58.4	407.70	449.20	428.45	72.4	74.3	73.4
10	482.19	512.54	497.37	68.1	57.8	62.9	418.50	426.60	422.55	93.1	78.3	85.7

※Pmは、荷重-変位関係の最大荷重とした。

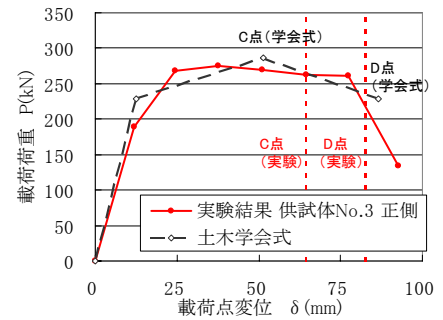
図-3 荷重-変位関係包絡線
(供試体 No.3)

表-2 供試体パラメーター一覧

供試体 No.	破壊 形態	せん断 スパン La (mm)	断面形状		配筋					補強方法					
					軸方向鉄筋		帯鉄筋			補強材の種類	補強区間	巻付け 間隔Sr (mm)	補強材 断面積 Ar(mm ²)	引張強さ Tr(KN)	ヤング率 E (kN/mm ²)
			断面幅 B(mm)	断面高 H(mm)	軸方向 鉄筋	pt (%)	帯鉄筋	帯鉄筋 間隔	pw (%)						
1	M	2105	600	600	D25	0.643	D10	100	0.238	無補強	-				
2	M	2105	600	600	D25	0.643	D10	100	0.238	アラミドロープ	1.5×Lp	25	11.53	28.48	45.77
3	MS	2105	600	600	D25	0.643	D10	200	0.119	無補強	-				
4	MS	2105	600	600	D25	0.643	D10	200	0.119	アラミドロープ	柱全高	25	11.53	28.48	45.77
5	MS	2105	600	600	D25	0.643	D10	200	0.119	アラミドロープ	柱全高	50	11.53	28.48	45.77
6	S	2105	600	600	D25	0.643	D10	300	0.079	無補強	-				
7	S	2105	600	600	D25	0.643	D10	300	0.079	アラミドロープ	柱全高	25	11.53	28.48	45.77
8	MS	2105	600	600	D25	0.643	D10	200	0.119	ビニロンロープ	柱全高	25	12.5	6.95	10.57
9	MS	2105	1200	600	D25	0.643	D10	200	0.059	無補強	-				
10	MS	2105	1200	600	D25	0.643	D10	200	0.059	アラミドロープ	柱全高	25	11.53	28.48	45.77

3. 定式化の考え方

前節で述べたように、繊維ロープ巻付け補強の補強効果は、C点およびD点の変位の増大、すなわち、変形性能の向上にある。したがって、繊維ロープ巻付け補強の補強効果の評価式の定式化は、補強による変形性能の向上を表現することによるものとした。

算定式の基本形を式(1)、(2)に示す。提案する算定式では、ロープ巻付け補強後の耐力低下開始点(C点)と、降伏耐力を維持できる最大変位点(D点)の部材角 θ_m 、 θ_n を、無補強状態におけるC点およびD点の部材角 $n\theta_m$ 、 $n\theta_n$ を基準として、これに補強効果を表す関数 $(1 + \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdots \alpha_N)$ を掛け合わせることで表現する。

$$\theta_m = (1 + \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdots \alpha_N) \times n\theta_m \quad (1)$$

$$\theta_n = (1 + \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdots \alpha_N) \times n\theta_n \quad (2)$$

ここで、補強効果を表す関数 $(1 + \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdots \alpha_N)$ の係数 α_1 、 α_2 、 $\cdots$ 、 α_N は、補強量や部材寸法、配筋状態など、補強効果と関係性が見られるパラメータによる関数として、C点、D点それぞれに対して、実験結果をもとに定める。

一方、基準となる無補強状態における部材角 $n\theta_m$ 、 $n\theta_n$ については、実験結果と土木学会コンクリート標準示方書³⁾⁴⁾の荷重と変位の算定式により求めた荷重-変位関係のC点およびD点を比較した結果、図-3に示すように、概ね近い値となったことから、本検討においては、土木学会式の変形性能算定式から得られる部材角を用いることとした。

4. 定式化

4.1 実験式のパラメータ

本研究における供試体のパラメーター一覧を、表-2に示す。本研究で行った載荷試験では、以下の4項目の実験パラメータに基づき、供試体を製作した。

- ① 柱部の破壊形態と繊維ロープによる補強効果
- ② 断面形状(B/H)と繊維ロープによる補強効果
- ③ 繊維ロープの巻付け間隔による影響
- ④ 繊維ロープの材質による補強効果

これらの実験パラメータを踏まえて、補強効果と関係性が見られるパラメータを検討した結果、補強効果を表す関数として、式(3.a)～(3.d)に示す4つの係数 $\alpha_1 \sim \alpha_4$ を設定した。

$$\alpha_1 = f(A_r / (S_r \cdot B)) \quad (3.a)$$

$$\alpha_2 = f(B) \quad (3.b)$$

$$\alpha_3 = f(E_r) \quad (3.c)$$

$$\alpha_4 = f(p_w / p_t) \quad (3.d)$$

ここに、 A_r ：ロープの断面積

S_r ：ロープの巻付け間隔

E_r ：ロープのヤング率

B ：部材の断面幅

p_t ：部材の引張鉄筋比

p_w ：部材の帯鉄筋比

4.2 定式化（補強効果を表す関数の設定）

補強効果を表す係数 α_1 から α_4 を、表-1に示した全供試体のC点およびD点の実験結果に基づき設定する。本検討においては、載荷方向の正側と負側で大きな差が見られなかったため、正側の実験結果を用いて係数の設定を行った。

各補強供試体について、基準となる無補強供試体に対する変形性能の増加量 $\angle\theta_m$ （C点）または $\angle\theta_n$ （D点）を求め、この変形性能の増加量 $\angle\theta$ と、係数 α_1 から α_4 のパラメータの関係をもとに、それぞれの係数を定める。図-4に、変形性能の増加量 $\angle\theta$ と、パラメータの関係を示す。図に示した、変形性能の増加量とパラメータの関係から、補強後のC点およびD点の変位 θ_m 、 θ_n に対して、係数 $\alpha_1 \sim \alpha_4$ を表す関数を、式(4-b)～(4-e)、式(5-b)～(5-e)のように設定した。

(1) C点（耐力低下開始点）

$$\theta_m = (1 + \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4) \times_n \theta_n \quad (4-a)$$

$$\alpha_1 = 4.12 \times (A_r / (S_r \cdot B) \times 100) \quad (4-b)$$

$$\alpha_2 = 0.11 + 0.89 \times (600/B) \quad (4-c)$$

$$\alpha_3 = 1 \quad (4-d)$$

$$\alpha_4 = 1.02 - 0.35 \times (p_w / p_t) \quad (4-e)$$

(2) D点（降伏耐力を維持できる最大変位点）

$$\theta_n = (1 + \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4) \times_n \theta_n \quad (5-a)$$

$$\alpha_1 = 3.92 \times (A_r / (S_r \cdot B) \times 100) \quad (5-b)$$

$$\alpha_2 = 0.40 + 0.60 \times (600/B) \quad (5-c)$$

$$\alpha_3 = 1 \quad (5-d)$$

$$\alpha_4 = 1.26 - 1.42 \times (p_w / p_t) \quad (5-e)$$

係数 α_1 については、比例関係として係数を定めた。これに対して、係数 $\alpha_2 \sim \alpha_3$ に関しては、それぞれの変数で基準となる状態（ α_2 : $B=600\text{mm}$ (1:1 供試体), α_3 : $E=45.77\text{kN/mm}^2$ (アラミド繊維), α_4 : $p_w/p_t=0.185$ (MS型)) で、係数の値が1となるように補正して、係数を定めた。また、図-4の(c), (g)より、補強材のヤング率の違いが、変形性能の増加量へほとんど影響しなかったことから、式(4-d), (5-d)のように、 $\alpha_3=1$ とした。

5. 実験式の精度の検証

5.1 土木学会式による変形性能算定結果

実験結果と、構築した実験式(式(4), (5))による算定値を比較することで、実験式の精度を確認する。

まず、基準となる無補強状態での部材角 $n\theta_m$ および $n\theta_n$ の計算結果を示す。土木学会の変形性能算定式により算出した、無補強の場合のC点及びD点の部材角を、

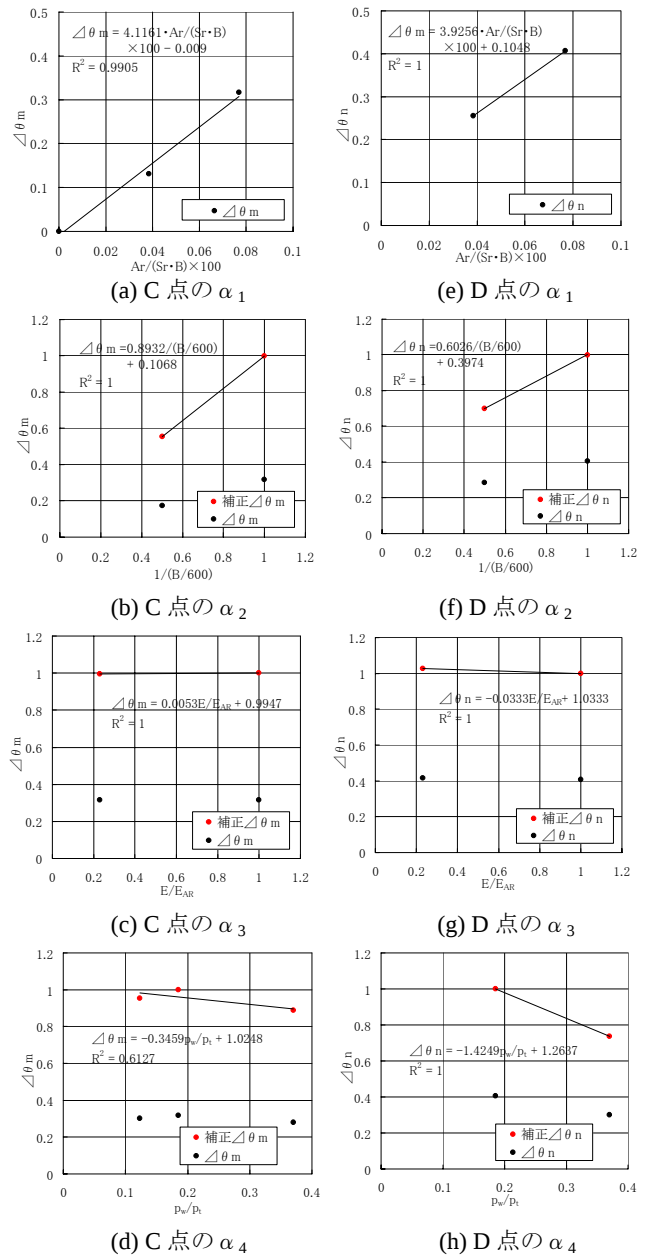


図-4 α_1 から α_4 の設定

表-3 土木学会式による変形性能算定結果

供試体 No.	C点		D点	
	$0.021 \cdot k_{w0} \cdot p_w + 0.013$	$0.79p_t + 0.153$	$n\theta_m$ 計算値	$n\theta_n$ 計算値
1, 2	0.0172	0.6610	0.02769	0.04444
3~5, 8	0.0151	0.6610	0.02435	0.04110
6, 7	0.0144	0.6610	0.02323	0.03998
9, 10	0.0141	0.6610	0.02240	0.03458

表-3にまとめる。土木学会の変形性能算定式においては、引張鉄筋比に関する項で、

$$0.79p_t + 0.153 \geq 0.78 \quad (6)$$

の条件がある。これに対して、本研究で用いた実験供試体は、 $0.79p_t + 0.153 = 0.6610$ であり、この条件を満たしていない。表-3に示した変形性能の算定結果は、この条件を無視して $0.79p_t + 0.153 = 0.6610$ として算定した場合の計算値である。

表-4 実験式による変形性能の算定結果 (C点)

供試体 No.	実験値 exp θ_m	耐力低下開始点(C点)							
		算定値				学会式に対して			
		係数 $\alpha_1 \sim \alpha_4$				cal θ_m		実験値に対して	
		α_1	α_2	α_3	α_4	cal θ_m	exp θ_m / cal θ_m	cal θ_m	exp θ_m / cal θ_m
1	0.03104	0.000	1.000	1.000	0.890	0.02769	-	0.03104	-
2	0.03975	0.317	1.000	1.000	0.890	0.03550	1.12	0.03979	1.00
3	0.03069	0.000	1.000	1.000	0.955	0.02435	-	0.03069	-
4	0.04040	0.317	1.000	1.000	0.955	0.03171	1.27	0.03997	1.01
5	0.03472	0.158	1.000	1.000	0.955	0.02803	1.24	0.03533	0.98
6	0.02660	0.000	1.000	1.000	0.977	0.02323	-	0.02660	-
7	0.03462	0.317	1.000	1.000	0.977	0.03041	1.14	0.03483	0.99
8	0.04036	0.343	1.000	1.000	0.955	0.03233	1.25	0.04076	0.99
9	0.02752	0.000	0.555	1.000	0.988	0.02240	-	0.02752	-
10	0.03234	0.158	0.555	1.000	0.988	0.02435	1.33	0.02991	1.08
平均	-	-	-	-	-	-	1.22	-	1.01

表-5 実験式による変形性能の算定結果 (D点)

供試体 No.	実験値 exp θ_n	降伏耐力を維持できる最大変位点(D点)							
		算定値				学会式に対して			
		係数 $\alpha_1 \sim \alpha_4$				cal θ_n		実験値に対して	
		α_1	α_2	α_3	α_4	cal θ_n	n θ_n / cal θ_n	cal θ_n	n θ_n / cal θ_n
1	0.04289	0.000	1.000	1.000	0.734	0.04444	-	0.04289	-
2	0.05573	0.301	1.000	1.000	0.734	0.05428	1.03	0.05238	0.94
3	0.03930	0.000	1.000	1.000	0.997	0.04110	-	0.03930	-
4	0.05528	0.301	1.000	1.000	0.997	0.05345	1.03	0.05111	0.92
5	0.04935	0.151	1.000	1.000	0.997	0.04728	1.04	0.04520	0.92
6	0.03388	0.000	1.000	1.000	1.086	0.03998	-	0.03388	-
7	0.04543	0.301	1.000	1.000	1.086	0.05306	0.86	0.04496	0.99
8	0.05569	0.327	1.000	1.000	0.997	0.05449	1.02	0.05210	0.94
9	0.03442	0.000	0.700	1.000	1.130	0.03458	-	0.03442	-
10	0.04420	0.151	0.700	1.000	1.130	0.03869	1.14	0.03852	0.87
平均	-	-	-	-	-	-	1.02	-	0.93

は、補強供試体。

5.2 実験値と算定値の比較

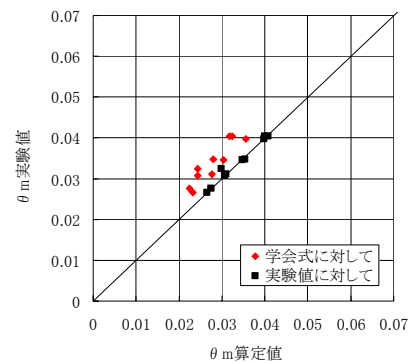
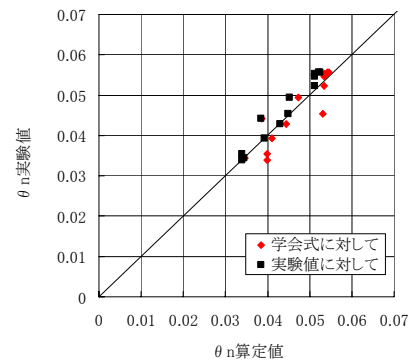
実験値と算定値の比較を行うことで、構築した算定式の精度を検討する。

表-4 および表-5 に、耐力低下開始点 (C点) と降伏耐力を維持できる最大変位点 (D点) それぞれの、実験値と式(4-a)および式(5-a)による算定値を示す。表中には、補強後の変形性能を求める基準となる無補強状態での部材角 θ_m , θ_n として、載荷実験における無補強供試体から得られた実験値を用いて算定した場合と、表-3 に示した学会式による値を用いて算定した場合を示した。

表中に示した補強供試体の実験値と算定値の関係を、図-5 および図-6 に示す。図中で、無補強状態での部材角として実験値を用いた場合の結果 (黒のプロット) を見ると、実験値と算定値は良く一致している。このことから、補強効果を表す式 (4-a), (5-a) の係数の設定が妥当であることがわかる。次に、無補強状態での部材角として土木学会式による計算値を基準とした場合 (赤のプロット) を見ると、C 点変位について、算定値がやや過小となる傾向が見られるものの、構築した実験式により、補強後の変形性能を概ね予測できていることがわかる。

6. まとめ

本稿では、既設コンクリート橋脚に対する新たな補強工法である、繊維ロープ巻付け補強工法について、実験結果を基に、本工法の補強効果について整理するとともに、補強効果を予測する実験式の構築を行った。

図-5 実験値と算定値の比較 (C点の部材角 θ_m)図-6 実験値と算定値の比較 (D点の部材角 θ_n)

本工法の補強効果について、「① 耐力低下が開始する変位が大きくなるとともに、耐力低下開始後の荷重-変位関係の下降勾配を緩やかになる」こと、「② 最大耐力は増大しない」ことを踏まえて、実験結果に基づき補強後の変形性能を予測する算定式を構築した。その結果、

- ロープの巻付け間隔、躯体の断面幅、鉄筋比等をパラメータとした、補強効果を表す関数を用いて、補強後の変形性能を予測する実験式を構築した。
- 構築した実験式による補強後の変形性能の算定値と実験値とを比較した結果、構築した実験式により、補強後の変形性能を予測できることが確認された。

参考文献

- 坂口淳一, 三田村浩, 塩畑英俊, 西 弘明, 下村 匠: 繊維ロープ巻付け補強に関する実験的研究 (その 1: 載荷実験), 土木学会北海道支部論文報告集, 第 66 号, 2010.2.
- 三田村浩, 本間淳史, 下村匠, 丸山久一: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1267-1272, 2008.
- 土木学会: 2007 年制定 コンクリート標準示方書【設計編】, pp.83-86, 2008.3.
- 渡邊忠朋, 谷村幸裕, 瀧口将志, 佐藤 勉: 鉄筋コンクリート部材の損傷状況を考慮した変形性能算定手法, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp.31-45, 2001.8.