

論文 超軽量コンクリートはりの付着割裂強度

荻野 鉄也*¹・稲垣 準二*²・本間 礼人*³・小林 克巳*⁴

要旨: 比重 1.2, 圧縮強度 30MPa および比重 1.6, 圧縮強度 60MPa の超軽量コンクリートを用いた RC はりの付着割裂実験を行い, 実験結果に基づいて付着割裂強度の評価について検討した。実験では, 超軽量コンクリートの場合, 普通コンクリートの場合に比べて付着割裂強度が低下した。上端筋と下端筋の付着強度比および横補強筋のない場合の付着強度の低下を適切に考慮することにより, 普通コンクリートに対する既往の評価式を準用して評価できることを示した。

キーワード: 超軽量コンクリート, はり, 付着割裂強度

1. はじめに

新しい軽量骨材の開発により, 比重 1.2, 圧縮強度 30MPa のような高強度超軽量コンクリートの製造が可能となってきた。本論は, これを建築物の構造体へ適用することを前提として, はりの付着割裂実験を行い, 付着割裂強度の評価について検討したものである。

一般に, 軽量になるほどコンクリートの引張強度が低下することが知られており, せん断耐力の低下の他に付着割裂強度の低下が予想される。曲げ降伏先行の部材設計をするためには付着割裂強度の評価が不可欠であるが, これに関する資料は殆どない。

2. はりの付着割裂実験²⁾の概要

試験体の形状および配筋例, 試験体一覧を図1, 表1に示す。試験体形状および主筋の配置については, 実験結果を, 普通コンクリートから高強度コンクリートまでを対象とした付着強度の評価に使用する角・張式¹⁾と比較検討するため, 角らの試験体を参考としている。はり断面は 200mm×400mm で, 試験体端部から 200mm の区間では, 主筋に鋼管をかぶせて反力による拘束をなくしている。加力点から 370mm の位置にはせん断ひびわれを誘発するためのスリットを設け, この位置から鋼管までの範囲 ($l_b=500\text{mm}$) を試験区間とした。試験体

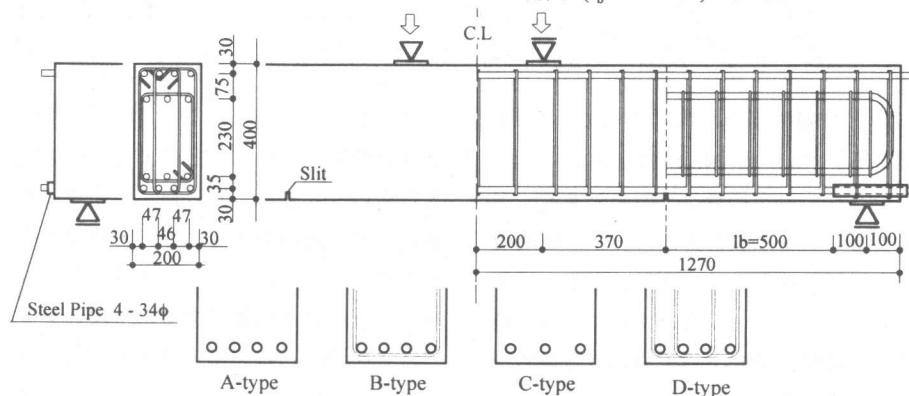


図1 試験体の形状および配筋例

*1 福井大学 環境設計工学科 (正会員)

*2 清水建設(株) 工修

*3 福井大学助教授 建築・建設工学科 工博 (正会員)

*4 福井大学教授 建築・建設工学科 工博 (正会員)

表1 試験体一覧

No.	試験体名	主筋	横補強筋 タイプ	横補強筋	P _w (%)	Q _{uexp} (kN)	τ_{uexp} (MPa)	Failure mode
1	L-30-4B-0	4-D19	A	-	0	59.04	1.36	S
2	L-30-4B-0		A	-	0	55.80	1.27	S
3	L-30-4T-0		A	-	0	56.49	1.31	S
4	L-30-4B-6S50		B	2-6 ϕ @50	0.56	120.23	2.57	C
5	L-30-4T-6S50		B	2-6 ϕ @50	0.56	109.84	2.40	C
6	L-30-4B-9S50		B	2-9 ϕ @50	1.27	167.50	3.54	C
7	L-30-4B-9S40		B	2-9 ϕ @40	1.59	196.73	4.01	C
8	L-30-4B-6W100		D	4-6 ϕ @100	0.57	163.58	3.26	C
9	L-30-4B-9W100		D	4-9 ϕ @100	1.27	208.89	4.37	S
10	L-30-4B-9W80		D	4-9 ϕ @80	1.59	235.86	4.72	S
11	N-30-4B-6S50		B	2-6 ϕ @50	0.56	178.68	3.75	C
12	N-30-4B-6W100		D	4-6 ϕ @100	0.57	197.61	2.93	S
13	L-30-3B-0	3-D19	C	-	0	57.67	1.69	S
14	L-30-3B-0		C	-	0	56.49	1.62	S
15	L-60-4B-0	4-D19	A	-	0	99.74	1.86	S
16	L-60-4B-0		A	-	0	83.56	1.88	S
17	L-60-4B-6S50		B	2-6 ϕ @50	0.56	202.32	4.00	C
18	L-60-4B-9S50		B	2-9 ϕ @50	1.27	274.89	5.21	F
19	L-60-4B-6W100		D	4-6 ϕ @100	0.57	233.60	4.53	S
20	L-60-4B-9W100		D	4-9 ϕ @100	1.27	248.80	4.59	F
21	N-60-4B-6S50		B	2-6 ϕ @50	0.56	247.04	5.41	C
22	N-60-4B-6W100		D	4-6 ϕ @100	0.57	259.20	5.35	F

試験体名の N30, L30 は普通コンクリート(N)30MPa, 超軽量コンクリート(L)30MPa を表す。N60, L60 も同様。
破壊モード C: コーナースプリット S: サイトスプリット F: 曲げ降伏

表2 使用材料の材料試験結果

コンクリート					鉄筋			
コンクリートの種類	ρ	σ_B (MPa)	E (GPa)	σ_t (MPa)	鉄筋の種類	σ_y (MPa)	σ_m (MPa)	E (GPa)
普通-30	2.23	30.4	25.5	2.26	D19	612	792	203
超軽量-30	1.19	30.6	10.7	1.90	$\phi 9$	335	465	195
普通-60	2.32	60.4	33.2	3.50	$\phi 6$	371	497	211
超軽量-60	1.66	56.0	19.5	2.17				

ρ : 比重 σ_B : 圧縮強度 E : ヤング係数 σ_t : 割裂引張強度 σ_y : 降伏強度 σ_m : 引張強度 E : ヤング係数

は主筋本数と横補強筋の配置によって、A～D タイプがある。No.3 と No.5 は上端筋となるようにコンクリートを打設したものである。実験は単純支持中央2点荷重方式で行い、破壊時まで一方向単調荷重とした。主筋の引張力はスリット位置で主筋に貼付したひずみゲージの値から計算し、試験区間の主筋表面積で除して平均付着応力度を求めた。

使用したコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を表2に示す。

3. 実験結果

表1の右列に試験鉄筋の平均付着強度と破壊

モードを示してある。コンクリート強度・横補強筋量を増大させることにより、付着強度が増大している。また、同じ横補強筋量でも中子筋を配置すると付着強度上昇に有効であることがわかる。これらのことは、普通コンクリートを使用した場合と同様であるが、超軽量コンクリートを使用した試験体の付着強度は、普通コンクリートを使用したものより12%～36%小さな値を示している。また、L30 試験体では、上端筋と下端筋の付着強度比はほぼ1.0となっている。

最終破壊状況の例を図2に示す。全試験体とも等曲げ区間に曲げひび割れが発生した後、スリット位置からせん断ひび割れが発生した。そ

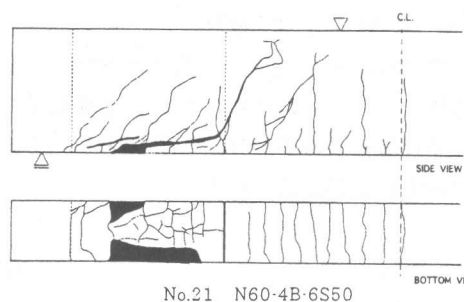
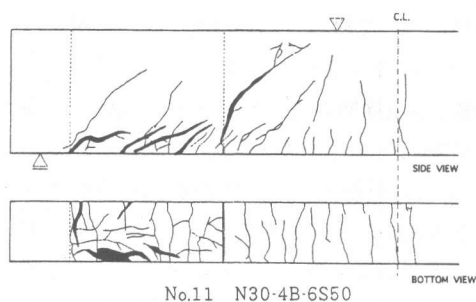


図2 最終破壊状況の例

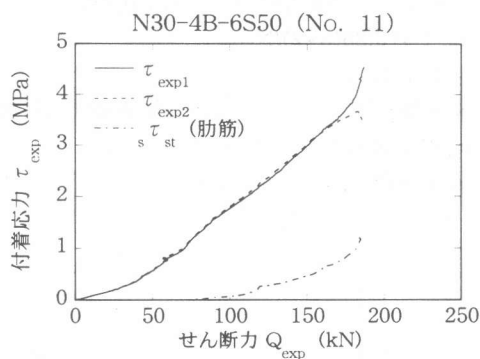
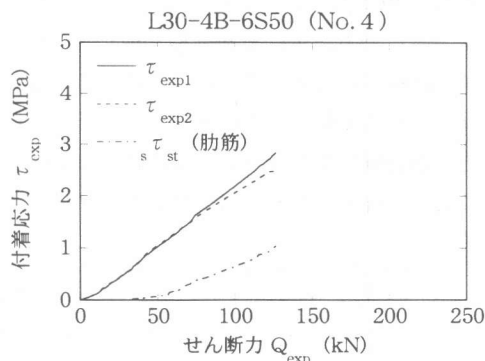


図3 付着応力(τ_{exp})とせん断力(Q_{exp})の関係

の後、主筋に沿う付着割裂ひび割れが発生したが、超軽量コンクリート試験体は、普通コンクリートの場合に比べ特異な破壊性状を示していない。

付着応力(τ_{exp})とせん断力(Q_{exp})の関係の例を図3に示す。コーナー筋の付着応力を τ_{exp1} 、中間筋の付着応力を τ_{exp2} とし、図4に示すトラス機構を仮定して横補強筋のつり上げ力につり合う付着応力を(1)式で計算した結果を τ_{st} としている。 T_{wi} は横補強筋に貼付したひずみゲージによる測定値から求めることができる。

$$\tau_{st} = \Sigma T_{wi} \cos \theta / (l_b \cdot \pi \cdot d_b) \quad (1)$$

T_{wi} : 一組の横補強筋の引張力

n : 試験区間内の横補強筋の組数

θ : コンクリート圧縮ストラットの角度
(45°に仮定)

l_b : 定着長さ(500mm)

d_b : 主筋の公称径(19mm)

横補強筋のつり上げ力につり合う付着応力は、付着割裂ひび割れが発生するあたりから生じ始めるが、超軽量コンクリートはりでは、割裂引張強度が小さいために、その時のせん断力は普通コンクリートの場合よりも小さい。

横補強筋で拘束されるコーナー筋の最大付着応力は、中間筋の最大付着応力よりも大きな値を示している。図3には示していないが、横補強筋のない試験体では、中間筋の最大付着応力のほうが大きい。中子筋を有する試験体では、中子筋によって拘束を受ける中間筋の最大付着応力はコーナー筋と同程度かそれ以上である。

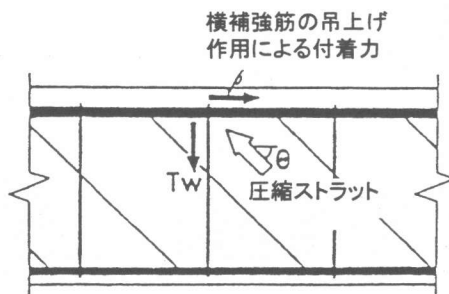


図4 トラス機構による補強筋のつり上げ効果

4. 角・張式¹⁾による検討

角・張式¹⁾は、上端筋の付着強度(τ_u)を横補強筋のない場合の付着強度(τ_{co})と横補強筋による付着強度の増加分(τ_{st})の和とし、重力単位系で表して(2)式としている。

$$\tau_u = \tau_{co} + \tau_{st} \quad (2)$$

$$\tau_{co} = (0.08 + 0.12b_i + 2.5b_i \cdot d_b/l_b) \sigma_B^{0.6}$$

$$\tau_{st} = \{(k_n \cdot q - 2.5d_b/l_b)b_i + k_n \cdot 18p_w \cdot b \cdot d_b/N\} \sigma_B^{0.6}$$

$$k_n = 1.0 + 0.85(n-2)/N$$

$$b_i = b \cdot d_b/N - 1$$

N:主筋本数

n:1組の横補強筋の足数

p_w :横補強筋比

l_b :付着長さ

d_b :主筋径

b:はり幅

σ_B :コンクリート圧縮強度

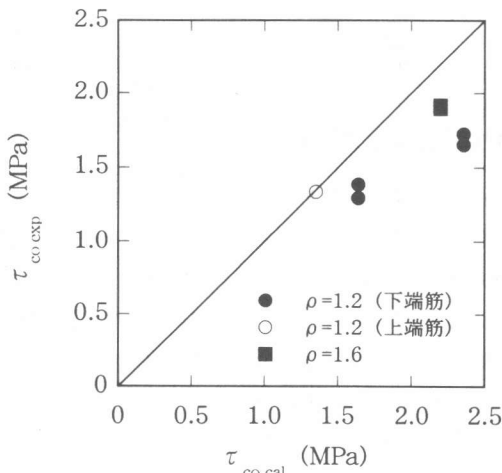


図5 横補強筋のない場合の付着強度の実験値と計算値

下端筋については、 $\sigma_B \leq 300 \text{ kgf/cm}^2$ の場合、上端筋の1.22倍としている。

図5は横補強筋のないA, Cタイプ試験体の付着強度実験値($\tau_{co,exp}$)と角・張式¹⁾による計算値($\tau_{co,cal}$)との関係を示す。実験値は計算値よりも2割程度小さく、超軽量コンクリートの割裂引張強度が小さくなることに起因していると考えられる。図6は横補強筋による付着強度の増加分の実験値($\tau_{st,exp}$)と計算値($\tau_{st,cal}$)との関係を示す。ここで実験値は横補強筋を配したB, Dタイプ試験体の付着強度から、横補強筋のないA, Cタイプ試験体の付着強度を差し引いて求めた。超軽量コンクリートはりにおける横補強筋による付着強度の増加は、普通コンクリート

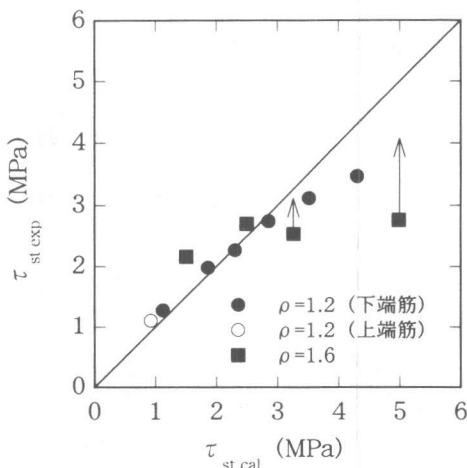


図6 横補強筋による付着強度の増加分の実験値と計算値

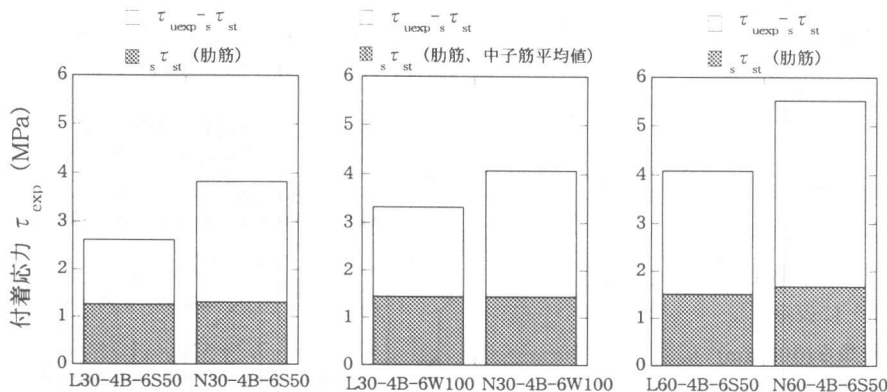


図7 最大耐力時における付着応力に対する横補強筋のつり上げによる付着応力の割合

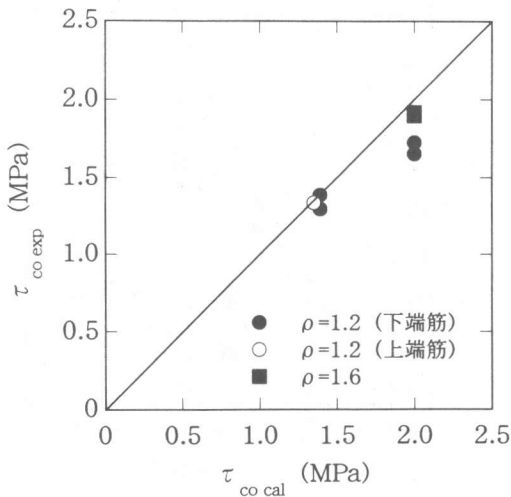


図8 横補強筋のない場合の付着強度の実験値と計算値(付着強度比を1.0と仮定)

の場合と同程度であることがわかる。

5. トラス機構による検討

はりの最大耐力時における付着応力に対する横補強筋のつり上げによる付着応力(τ_{st})の割合を、普通コンクリート試験体とそれに対応する L30, L60 試験体について 図7に示す。Dタイプ試験体では、肋筋と中子筋について平均したものを示している。L30, L60 試験体とそれに対応する普通コンクリート試験体では、横補強筋のつり上げによる付着応力はほぼ同じであり、付着強度の差は τ_{st} 以外の部分に生じていることがわかる。このことは角・張式¹⁾による検討結果と同じである。

6. 付着強度の評価

6.1 上端筋と下端筋の付着強度比

上端筋の下端筋に対する付着強度比は、角・張式¹⁾では $1.22(\sigma_B \leq 30\text{MPa})$ としているが、超軽量コンクリートの場合、Aタイプ試験体では $0.97 \sim 1.04$ 、Bタイプ試験体は 1.07 であった。用いた人工軽量骨材の絶乾比重が小さいために、絶乾状態で練混ぜを行うと骨材が浮き上がってくる。本研究では、水セメント比を $28 \sim 30\%$ として骨材が均一に分散するよう配慮し

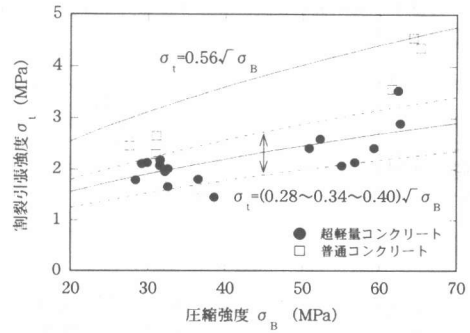


図9 超軽量コンクリートの割裂引張強度と圧縮強度の関係

ているが、そのためにブリージングの影響が少なくなり、上端筋と下端筋の付着強度差がなくなってくるものと考えられる。表1に示した上端筋の試験体は僅か2体であり、付着強度比を定量的に求めることは難しいが、暫定的に1.0と考えてもよいものと判断される。

図5に示した計算値を、上端筋と下端筋の付着強度比1.0として求め直した結果を図8に示す。実験値の計算値に対する比は平均で0.93程度となるが、角・張式¹⁾を準用するためには、付着強度比の考慮だけでは不十分であることがわかる。

6.2 割裂引張強度の考慮

角・張式¹⁾では、横補強筋のない場合の付着強度および横補強筋による付着強度の増加に対して、コンクリート強度の影響を $\sigma_B^{0.6}$ (σ_B : 圧縮強度)で表している。付着割裂ひび割れがコンクリートの割裂引張強度に関係すること、コンクリートの割裂引張強度は圧縮強度に正比例せず $\sigma_B^{0.5}$ に比例するという提案式³⁾もあることから、角・張式¹⁾の $\sigma_B^{0.6}$ をコンクリートの割裂引張強度に関係する項と見ることに不自然はないであろう。超軽量コンクリートの割裂引張強度実験値は図9に示すように、 $(0.28 \sim 0.34 \sim 0.40) \cdot \sigma_B^{0.5}$ であり普通コンクリートの $(0.38 \sim 0.56 \sim 0.75) \cdot \sigma_B^{0.5}$ ³⁾に比べると1/2程度にまで低下することもある。角・張式¹⁾の $\sigma_B^{0.6}$ の項にコンクリートの比重を考慮することが望ましいが、現時点では資料も少ないこと

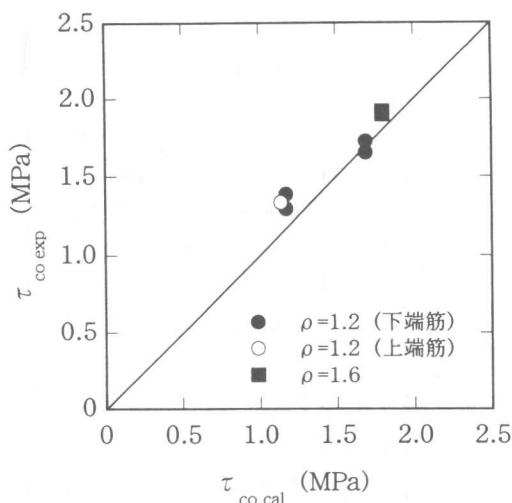


図 10 横補強筋のない場合の付着強度の実験値と計算値 (付着強度比と、割裂引張強度の低下を考慮)

からこの定式化を行うことは困難であり、材料試験結果に基づいて、 $\sigma_B^{0.6}$ の項に [超軽量コンクリートの割裂引張強度/普通コンクリートの割裂引張強度] を乗じることにして、付着強度の評価を試みた。図 8 の結果に、さらに割裂引張強度を考慮した結果は図 10 となり、安全側に評価できるようになる。

角・張式¹⁾では、横補強筋による付着強度の増加に対しても、 $\sigma_B^{0.6}$ の項がかかっているが、図 6 および図 7 に示したとおり、横補強筋による付着強度の増加量は、超軽量コンクリートの場合も普通コンクリートの場合も同程度であるため、ここでは横補強筋のない場合の付着強度にかかる $\sigma_B^{0.6}$ の項のみに割裂引張強度の低下を考慮することとし、横補強筋による付着強度の増加量も含めて付着強度の評価を行うと図 11 となる。実験値の計算値に対する比は平均で 1.11 となり、ほぼ実験値の下限をとる評価となる

7. まとめ

超軽量コンクリートを用いたはり主筋の付着強度は普通コンクリートの場合に比べて低下する。主な理由は超軽量コンクリートの割裂引張強度が低下することによると思われるが、骨材が超軽量であるが故に、下端筋に対して上端筋

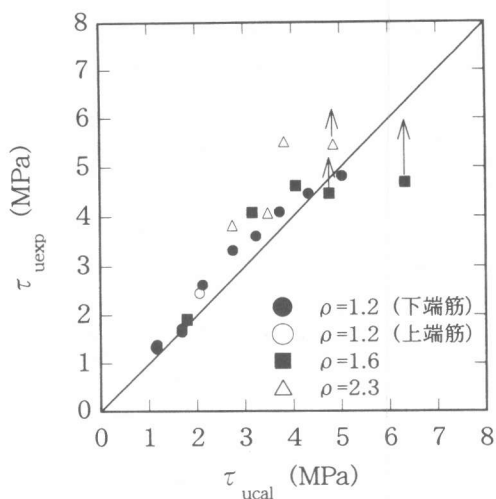


図 11 修正した角・張式¹⁾を用いた付着強度の評価

の付着強度が小さくならないという、はりの付着割裂耐力としてはプラス側の現象もある。今後、上端筋と下端筋の付着強度比、およびコンクリートの割裂引張強度の影響を十分な実験資料に基づいて定式化する必要はあるが、これらを適切に評価に入れることで、基本的には角・張式¹⁾を準用することが可能であろう。

謝 辞

本論のもとになる実験は、日米ハイブリッド共同研究に組織された超軽量高強度コンクリートのハイブリッド構造への利用研究委員会(委員長:松崎育弘東京理科大学教授, 1995~1997年度)の活動の一環として行ったものである。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 角徹三ほか: 高強度コンクリートレベルも包含する RC 部材の付着割裂強度算定式の提案, コンクリート工学論文集, No.3, pp.97-108, 1992.1
- 2) 稲垣準二ほか: 超軽量・高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材の構造性能 その 1 梁の付着割裂実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.355-356, 1997.9
- 3) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説—許容応力度設計法—, 日本建築学会, p54 (8.3)式, 1999.11