

論文 鉄筋コンクリート部材のせん断挙動に及ぼす実験要因の検証

織地 啓^{*1}・大高 正裕^{*2}・林 和彦^{*3}・池田 尚治^{*4}

要旨:本研究は、鉄筋コンクリート部材のせん断挙動に及ぼす実験要因を検証し、寸法効果を別の視点から評価することを目的とした実証的研究である。実験の要因は、支点拘束の有無、かぶりの大きさ、骨材の最大寸法の変化である。その結果、支点拘束をするとせん断強度への影響は明確には示されないが、タイドアーチを形成しやすく破壊形態がせん断圧縮破壊に移行する傾向が示された。また、かぶり大きいと大きなひび割れが数箇所に集中して発生し、ひび割れ数は少ないが、そのひび割れが斜めひび割れの進展に大きく関わることを示された。

キーワード:せん断、支点拘束、かぶり、骨材の最大寸法、寸法効果

1. はじめに

せん断補強筋を用いていない鉄筋コンクリートはりのせん断強度は、有効高さ d が大きくなるにつれて減少することがこれまで数多くの実験によって報告されてきた。これらの研究を基に、コンクリートの標準示方書¹⁾の棒部材の設計せん断耐力算定式の中には寸法効果の影響が有効高さの4分の1乗に反比例するとして考慮されている。しかし、骨材の最大寸法(以下、 G_{max})を d に比例させた場合、 G_{max} と骨材のかみ合わせ作用がせん断耐力に大きく影響を与えるということが、井畔ら²⁾、塩屋ら³⁾、林ら⁴⁾の実験によって報告されている。

また、供試体寸法、鉄筋径、骨材の最大寸法等の多くのパラメーターの組み合わせによる寸法効果に対する評価が林ら⁴⁾によって実験的に行われ、外形寸法だけでなく、構成要素を含めてすべてを相似にすると寸法効果の影響は今まで認識されていたよりもはるかに小さくなることが実証されている。

既往のせん断挙動に及ぼす寸法効果に関する

研究は、有効高さや骨材の最大寸法などの要因を主として行われてきたが、支点拘束やかぶりを対象とした研究は前例がほとんどない。

また、過去の実験における寸法効果の評価は、支点拘束の影響が取り除けていたかが定かでないため、本研究では支点拘束も要因として、せん断挙動に及ぼす影響を把握することを目的とし、鉄筋コンクリートのせん断挙動の詳細をさらに追究していくものであり、本文は其中で支点拘束の有無、かぶりの大きさ、骨材の最大寸法を要因として行った実験の結果を基に検討したものである。

2. 供試体の概要および実験方法

2.1 実験供試体

供試体の形状を図-1に、諸元を表-1に、使用鋼材の力学的特性を表-2にそれぞれ示す。

(1) 供試体形状・鉄筋

供試体は、有効高さ 140mm、幅 75mm とし、かぶりが 10mm の供試体を「かぶり標準」、28mm の供試体を「かぶり大」とした。

*1 横浜国立大学大学院 工学府社会空間システム学専攻(正会員)

*2 横浜国立大学 工学部建設学科

*3 横浜国立大学大学院 工学研究院 助手 修(工)(正会員)

*4 横浜国立大学大学院 工学研究院 教授 工博(正会員)

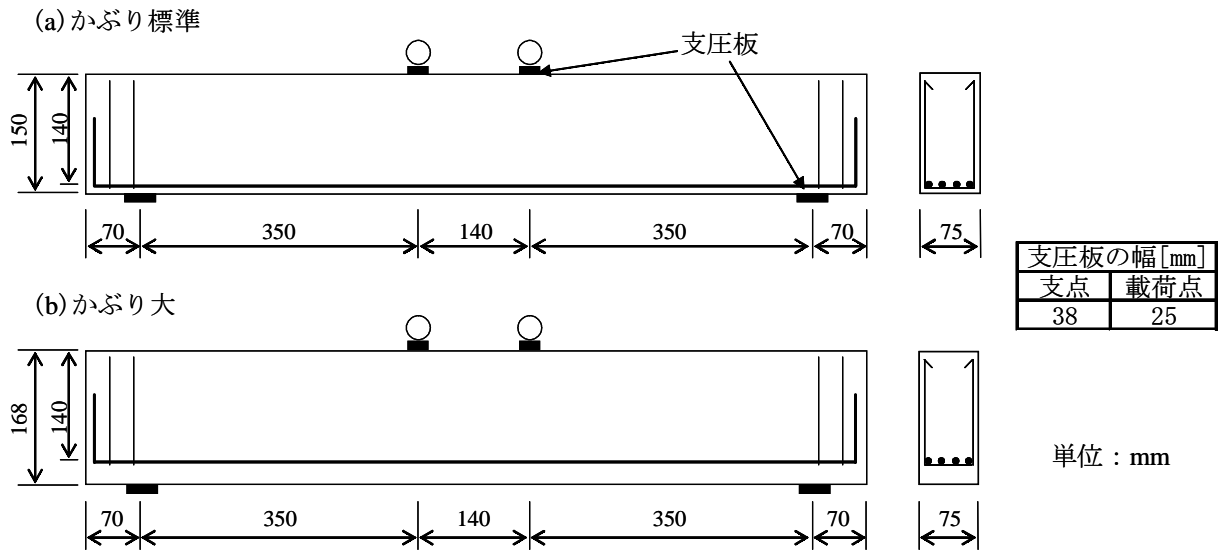


図-1 供試体形状

すべての供試体でせん断スパン有効高さの比(以下、 a/d)を2.5とした。主鉄筋にはD6を4本用い、鉄筋比を1.21%とした。また、 G_{max} が20mmの供試体で支点拘束とかぶり大の条件を組み合わせるものについては、曲げ破壊先行する恐れがあったため、載荷点から1dの区間内でD6を3本追加し、曲げ補強を行ったものもあわせて作製した。

(2) コンクリートの種類

セメントには早強ポルトランドセメントを用い、目標強度を26MPa、目標スランプを10cmとして配合した。配合を表-3に示す。

粗骨材には碎石を用い、 G_{max} は20mm、5mmの2種類とした。骨材全体(粗骨材+細骨材)の粗粒率は、それぞれ4.93、2.93である。骨材寸法が相似に1/2になると粗粒率は1低下するため、本実験で用いた20mmと5mmの関係は相似にスケールダウンできているものと考えられる。

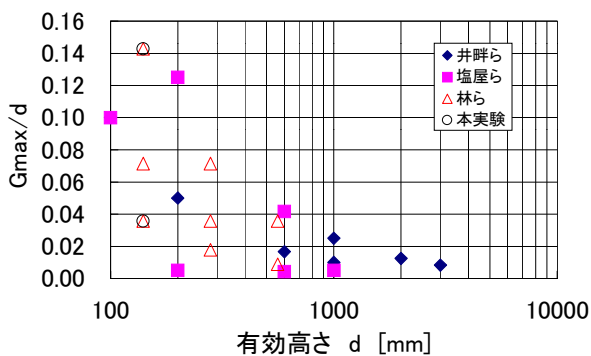


図-2 G_{max}/d と有効高さの関係

本実験の過去のせん断実験における位置付けをするために、供試体の骨材の最大寸法と有効高さの比(以下、 G_{max}/d)と有効高さの関係を図-2に示す。

(3) 供試体作製方法

供試体のコンクリートは2層に分けて打込み、各層毎にバイブレーターを用いて十分な締め固めを行った。打込み時に型枠からの水漏れはなく、打込み後の乾燥収縮による影響を少なくするため、供試体をビニールシートで密閉して養生した。

2.2 載荷方法

供試体の載荷には電動油圧ジャッキを用い、荷重分配桁を介して2点載荷をした。

2.3 支点拘束の有無

支点拘束状況を図-3に示す。支点拘束なしの場合は、ローラーを介して供試体を設置した。支点拘束がある場合は、反力台と支圧板を固

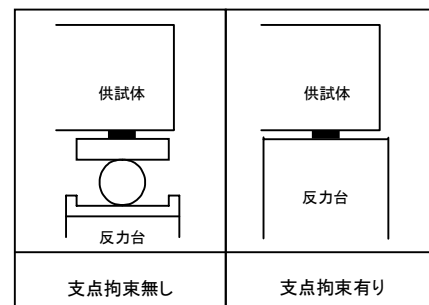


図-3 支点拘束の有無

表－1 供試体諸元と実験結果

No.	供試体名 ※1	有効 高さ d[mm]	寸法 h[mm]	骨材の 最大寸法 [mm]	主鉄筋	鉄筋 比 [%]	圧縮 強度 [MPa]	引張 強度 [MPa]	弾性 係数 [GPa]	ポア ソン 比	斜めひび割 れ進展時の せん断強度 [MPa]	終局時の せん断 強度 [MPa]	破壊 形式 ※2
1	UF-C-5-1	140	150	5	D6×4	1.21	28.5	2.08	18.2	0.21	1.39	-	DT
2	UF-C-5-2		150	5			27.6	1.98	17.3	0.22	1.21	1.46	SC
3	F-CB-5-1		168	5			28.5	2.08	18.2	0.21	1.20	1.31	SC
4	F-CB-5-2		168	5			27.6	1.98	17.3	0.22	1.21	-	DT
5	UF-CB-5-1		168	5			28.5	2.08	18.2	0.21	0.99	-	DT
6	UF-CB-5-2		168	5			27.6	1.98	17.3	0.22	1.07	-	DT
7	F-C-5-1		150	5			28.5	2.08	18.2	0.21	1.02	-	DT
8	F-C-5-2		150	5			27.6	1.98	17.3	0.22	1.21	-	DT
9	F-C-20-1		150	20			29.5	2.62	24.7	0.21	1.19	-	DT
10	F-C-20-2		150	20			29.5	2.62	24.7	0.21	1.28	1.46	SC
11	UF-CB-20-1		168	20			29.5	2.62	24.7	0.21	1.28	2.02	SC
12	UF-CB-20-2		168	20			29.5	2.62	24.7	0.21	1.28	1.72	SC
13 ^{※3}	UF-CB-20-3		168	20			30.0	2.77	22.6	0.19	1.36	1.50	SC
14 ^{※3}	UF-CB-20-4		168	20			30.0	2.77	22.6	0.19	1.23	-	DT

※1 供試体名のつけ方

[F:支点拘束無し, UF:支点拘束有り] - [C:かぶり標準, CB:かぶり大] - [骨材の最大寸法] - [同一条件供試体がある場合の順番]

※2 DT:斜引張破壊, SC:せん断圧縮破壊

※3 曲げ補強筋を追加した供試体(曲げ破壊が先行しないようにするために曲げ区間と1d区間は鉄筋比2.11%を増やした)

定した。回転成分の拘束をすると構造形式が異なるため行っていない。平行移動成分の拘束は反力台を固定しているため、完全ではないが拘束できているものとした。

3. 実験結果と考察

本実験の a/d は 2.5 であり、既往のせん断実験の範囲においては比較的ショートビームに位置する。 a/d=2.5 というのは、いわゆるせん断の谷⁵⁾の最低点にあたり、「斜引張破壊」と斜めひび割れ進展後にタイドアーチが形成され耐力を保持する「せん断圧縮破壊」との間の不安定領域である。そのため、既往のせん断実験との対応を図るために、本実験においては、斜めひび割れが形成され大きく進展した時点をコンクリートの斜引張破壊とし、以降「斜めひび割れ進展時」として示す。斜めひび割れ進展時の荷重としては、斜引張破壊をしたものはその最大荷重を、せん断圧縮破壊をしたものは斜めひび割れが大きく進展して一時的に荷重が低下する直前のピーク荷重とした。

作用せん断力を断面幅と有効高さで除した値

表－2 鋼材の力学特性

呼び名	規格	弾性係数 [GPa]	降伏応力 [MPa]	引張強さ [MPa]
D6	SD345	180	412	559
D3	—	178	279	343

表－3 コンクリートの配合

骨材の 最大寸法	W/C [%]	s/a [%]	W [kg/m ³]	C [kg/m ³]	S [kg/m ³]	G [kg/m ³]
20mm	65	48	175	270	906	1004
5mm	70	—	249	356	1625	—

をせん断強度とし、実験結果を表－1に示す。なお、表－1に示した斜めひび割れ進展時のせん断強度と終局時のせん断強度はコンクリートの圧縮強度の3乗根に比例すると考えて、強度補正を行っている。

3.1 骨材の最大寸法と有効高さの比

図－4に本実験における G_{max}/d と斜めひび割れ進展時のせん断強度の関係を示す。それぞれの骨材の最大寸法におけるせん断強度の最大値で比較すると差はあまりないが、実験結果全体でみると、G_{max}/d が小さくなるとせん断強度が低下するという傾向があることがわかる。こ

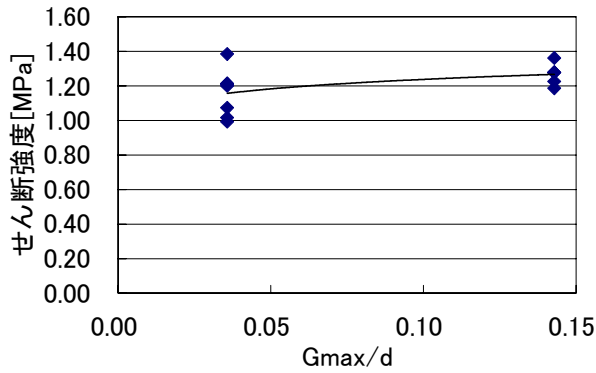


図-4 Gmax/d とせん断強度の関係

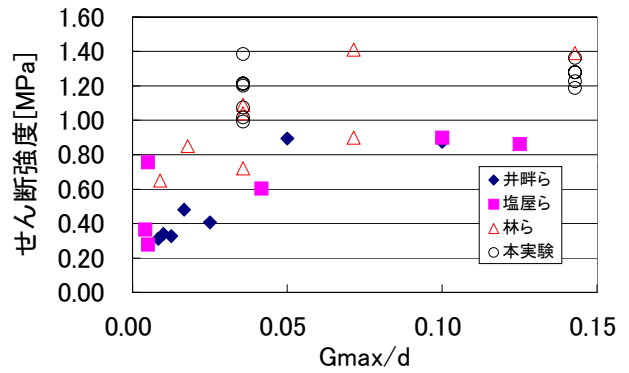


図-5 Gmax/d とせん断強度の関係

れは、林らの行った実験⁴⁾においても報告されている。また、既往の実験も含めたものを図-5に示す。図-4より同一有効高さの供試体においては、骨材の最大寸法が大きくなるにつれてせん断強度が上昇する傾向があることがわかる。

図-5より供試体寸法が異なる実験結果の比較において、既往の実験結果においてもGmax/dが小さくなるにつれて、せん断強度が低下する傾向があるのが明確なものとなっている。

3.2 かぶりと支点拘束とせん断強度

図-6に支点拘束の有無を含めたかぶりcとせん断強度の関係を示す。支点拘束なしの場合のかぶりの違いによるせん断強度の差はほとんど見られなかった。しかし、支点拘束をしたもので、かぶりが大きいと少しではあるがせん断強度が低下することが実験結果より得られた。支点拘束による影響は、d=140mmの供試体では全体として明確な違いがあまり見られなかった。

かぶり標準の供試体は、ひずみの発生が分散し、ひび割れも多く発生するのに対して、かぶり大の供試体は、大きなひずみが数箇所に集中して発生し、ひび割れの数は少なくなる傾向があった。かぶりが大きいと、コンクリート下面に生ずる引張力によって発生するひび割れが、ひび割れ発生荷重で主鉄筋の位置の深さまで進展し、主鉄筋が引張力を負担する前にコンクリート下面からのひび割れが、斜めひび割れの進展に結びつく要因となっていると考えられる。

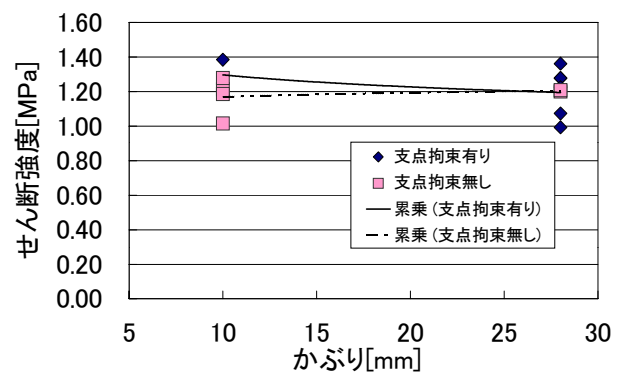


図-6 かぶり とせん断強度の関係

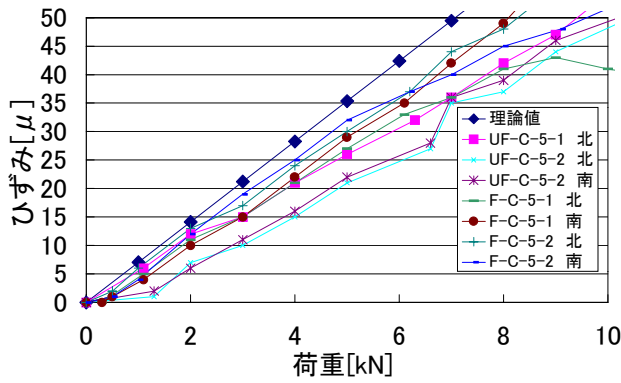
かぶりの大きさを要因として行われたせん断実験は前例がほとんどなく、斜めひび割れとの関係するため、今後データを蓄積していく必要があると思われる。

3.3 支点拘束による比較

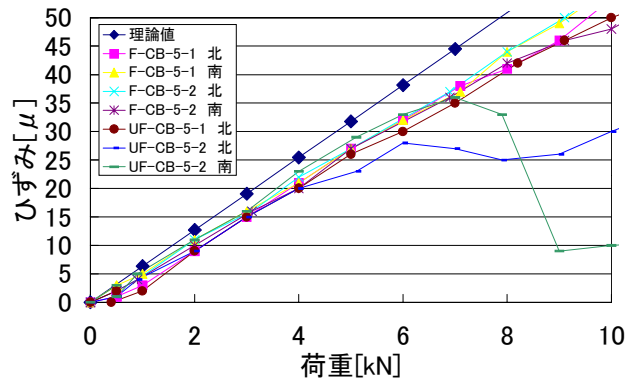
支点拘束によるせん断強度への影響は、斜めひび割れ進展時にはほとんどないものの、破壊形態は異なる傾向を示した。

支点拘束がある写真-1(a)では、タイドアーチを形成した後に耐力を保持し、圧縮部の圧壊で破壊しているのに対して、支点拘束のない写真-1(b)では、圧縮部は圧壊せずに斜めひび割れ進展と同時に急激な破壊をしている。

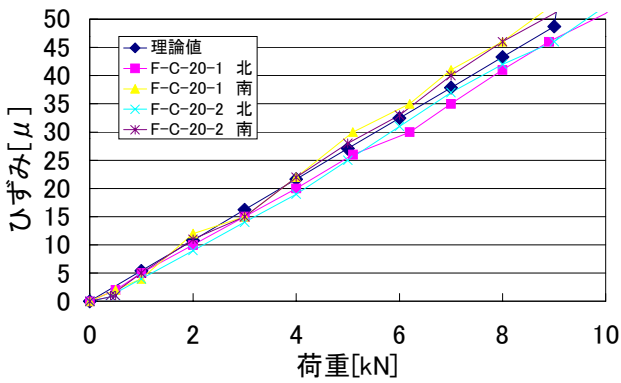
支点拘束をしていると支点付近に圧縮が発生する場合があります。載荷点から支点の区間で圧縮ゾーンがタイドアーチを形成しやすくなるため、本実験では、支点拘束による影響を把握するため、50mm間隔で供試体底面のひずみを連続的



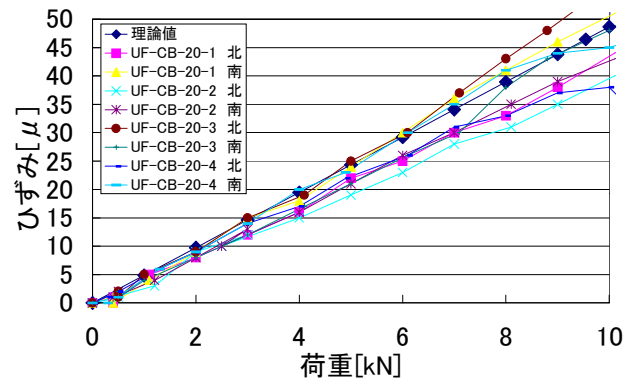
(a) かぶり標準, Gmax=5mm



(b) かぶり大, Gmax=5mm



(c) かぶり標準, Gmax=20mm



(d) かぶり大, Gmax=20mm

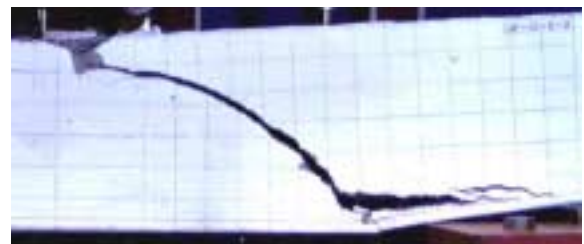
図ー7 支点から100mmの位置における供試体底面のひずみ

に計測した。支点拘束による影響が支点から付近の位置で最も出やすいと想定し、同一の骨材の最大寸法・同一のかぶりの供試体で支点拘束の影響を比較した。支点から100mmの位置における供試体底面のひずみの理論値と実測値の比較を図ー7に示す。

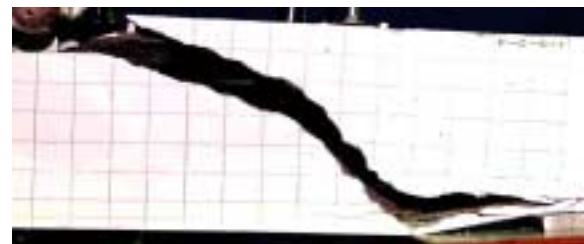
その結果、わずかな差であるが支点拘束をした供試体の方が、支点拘束をしていない供試体を下回る傾向が見られた。また、支点拘束がある供試体はひび割れ発生荷重付近で引張ひずみが減少し、その後圧縮ひずみへと移行するものと考えられる。

4. 寸法効果の評価

過去の実験において、支点拘束やかぶりを対象とした前例はほとんどないため、明確な寸法効果への評価をすることは難しい。しかし、寸



(a) UF-C-5-2



(b) F-C-5-1

写真ー1 支点拘束による破壊形態の違い

法効果に与える影響として、今までは主として有効高さによるものと認識されてきたが、過去のさまざまなせん断実験で報告されているように、骨材の最大寸法の影響や骨材のかみ合わせ作用が有効高さと比べて大きい影響を及ぼすといえる。

本実験において、結果を骨材の最大寸法別に比較すると 20mm の供試体では、斜めひび割れ進展時のせん断強度はあまり変わらないが、斜めひび割れ進展後にタイドアーチを形成しやすく、破壊形態はせん断圧縮破壊へとなる傾向があり、終局時のせん断強度も G_{max} が 5mm で支点拘束した場合よりも最大で 1.4 倍近くも上回った。これは骨材のかみ合わせ作用がせん断強度に大きく関わっていることを表わしているといえる。

また、かぶりが大きいと局部的にひずみが生じ、その付近は大きなひずみが生じず、ひび割れの数は少なくなる傾向があった。したがって、発生したひび割れが直接斜めひび割れの進展へと結びつきやすくなると考えられる。

本実験では、支点拘束において支点と供試体との完全な拘束ができていないことを考慮する必要がある。そのために正確な評価ができないとしても、本実験で対象とした要因も寸法効果を評価する際に影響するものと考えることができる。

5. 結論

本実験の範囲内で得られた結果をまとめると次のとおりとなる。

- (1) 鉄筋コンクリート部材におけるコンクリートのせん断強度は、骨材の最大寸法と断面の有効高さとの比 (G_{max}/d) に影響を受けることが著者らの既往の研究で示されたが、本研究においてもこのことが改めて確認できた。
- (2) かぶりを大きくすると、ひずみが局部的に発生し、そこから発生するひび割れが斜めひび割れの進展に結びつく可能性のあることが実験より得られた。

- (3) 支点拘束をすると、供試体底面の引張ひずみは単純支持の場合の理論値よりも若干低い値を示し、その後圧縮ひずみへと移行するものもあった。このことからタイドアーチを形成しやすくなり、破壊形態がせん断圧縮破壊となる傾向にあることが実験より得られた。

謝辞

本研究を行うにあたり、横浜国立大学の森下豊技官には、多大な協力を頂いた。ここに、謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編 (平成 8 年制定), 1996.3
- 2) 井畔瑞人, 塩屋俊幸, 野尻陽一, 秋山暉：等分布荷重下における大型鉄筋コンクリートはりのせん断強度に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.348, V-1, pp.175-184, 1984.8
- 3) 塩屋俊幸, 岡田武二：鉄筋コンクリートはりのせん断強度に及ぼす骨材径の影響, 第 7 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.521-524, 1985.6
- 4) 林和彦, 織地啓, 山口隆裕, 池田尚治：鉄筋コンクリート部材のせん断挙動に及ぼす寸法効果について, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.973-978, 2001.6
- 5) Kani, G.N.J.: How Safe Are Our Large Reinforced Concrete Beams? Journal of American Concrete Institute, No.64-12, pp.128-141, Mar.1967