

論文 軸力・曲げモーメント・せん断力を受ける無筋コンクリート せん断面の強度に関する基礎的研究

上原 修一^{*1}・江崎文也^{*2}

要旨：N・M・Qの複合応力が加わるコンクリートせん断面の実験について報告する。この実験による試験体18体と既往の実験による14体、合計32体の実験結果を用いて、垂直ひずみ勾配が大きくなるにつれて有効係数が増大することを示す。次に、垂直ひずみ勾配の影響を考慮した有効係数の算定式を提案する。さらに、その提案した有効係数算定式を用いれば、コンクリートせん断面強度をほぼ評価できることを示す。

キーワード：有効係数、せん断面、極限解析、剛体ばねモデル、降伏条件

1. 序

一般に、大部分の中・低層RC建築物は、複雑な壁配置を有するが、このようなRC架構の破壊機構を簡便に解析する方法は未だ確立されていない。このような構造物の解析法の一つとして、剛体ばねモデルによる離散化極限解析法が考えられる。この解析法の構築を目的として、すでに、文献[1]において、RC板要素せん断面のN・M・Q（軸力、曲げモーメント、せん断力）の相関降伏条件を提案した。

本論文では、その降伏条件の適合性を向上させるため、せん断面が無筋である試験体10体（文献[2]に示す予備実験試験体2体を含む）に、N・M・Qを加えた実験、および同様の試験体8体にN・Mのみを加えた実験を報告し、コンクリートせん断面に関する有効係数について論ずる。

2. N・M・Qを加えた実験の概要

2.1 試験体

文献[1]において、コンクリートの降伏条件と鉄筋の降伏条件の累加により、RCせん断面降伏条件を導いた。したがって、ここではまず、図-1に示すような無筋コンクリート試験体を10体製作した。壁厚 $t=5\text{cm}$ 、壁の長さ 50cm の壁に両端より 7.5cm の深さのノッチを設けている。従ってせん断面の長さ $h=35\text{cm}$ である。表-1にN・M・Qを載荷した試験体一覧、表-3に使用したコンクリートの力学的性質を示す。試験体は、コンクリート強度が少し異なるほかは同じであり、載荷条件のみが異なる。

2.2 加力方法、変位の測定方法

加力装置を図-2に示す。表-1に示す軸力を所定の偏心位置に載荷し、頂部のはりに水平力を漸増単調載荷した。本試験装置では、文献[2]に示す予備実験のものより、加力フレームのサイズを少し大きくしているほか、水平加力ジャッキ側にも面外変形を拘束するためのジグを設けている。

変位については、変位計（ $1/1000\text{mm}$ ）により、せん断面両端の水平変位、垂直変位を測定し、せん断面を挟む上下の壁板の相対的な移動と回転を求めた（詳細は文献[3]を参照）。

2.3 実験結果

*1 有明工業高等専門学校助教授 建築学科、工修（正会員）

*2 九州共立大学工学部教授 建築学科、工博（正会員）

図-4、図-5に破壊状況の例を示す（実験結果の詳細は文献[3]を参照）。

初ひび割れは、曲げモーメントによる垂直ひずみ勾配がある場合はすべて引張側ノッチ付近に認められた。垂直ひずみ勾配がない場合で軸力が高い試験体のせん断面近く、および垂直ひずみ勾配がある試験体の圧縮側のせん断面近くは破壊直前であってもせん断ひび割れが少なかった。また、垂直ひずみ勾配がある試験体の圧縮側のコンクリートは、図-4、図-5に示すように引張側と比べて激しく圧壊している。さらに、多くの試験体で、このように、せん断面からずれたところ

で壁板表面のコンクリートの剥落が見られたが、せん断面以外は鉄筋があることから、断面全体の破壊としてはせん断面を中心とした破壊であると観察された。

表-1 NMQが加わる試験体一覧

試験体名	载荷条件	
	n	m/n=e/h
PC0010	0.1	0
PC0310	0.1	0.3
PC02510	0.1	0.25
PC025102	0.1	0.25
PC000102	0.1	0
PC00020	0.2	0
PC04010	0.1	0.4
PC05020	0.2	0.25
PC00040	0.389	0
PC10040	0.389	0.257

表-2 NMのみが加わる試験体一覧

試験体名	载荷条件
	m/n=e/h
PC0001	0.000
PC0002	0.000
PC2501	0.250
PC2502	0.250
PC4001	0.400
PC4002	0.400
PC1251	0.125
PC1252	0.125

表-3 コンクリートの力学的性質

試験体名	σ_B (MPa)	E_c (GPa)
PC0010	31.7	25.2
PC0310	27.6	26.2
PC02510	28.8	28.8
PC025102	28.8	28.8
PC000102	31.8	29.2
PC00020	31.8	29.2
PC04010	33.0	28.5
PC05020	33.0	28.5
PC00040	33.8	28.2
PC10040	33.8	28.2
PC0001	28.0	25.2
PC0002	28.0	25.2
PC2501	28.0	25.2
PC2502	28.0	25.2
PC4001	38.5	28.8
PC4002	38.5	28.8
PC1251	38.5	28.8
PC1252	38.5	28.8

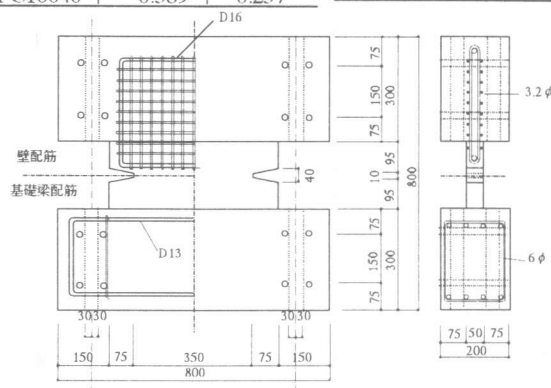


図-1 試験体形状および配筋図

- 1 試験体
- 2 ロードセル
- 3 油圧ジャッキ
- 4 軸力载荷用ピン
- 5 面外変形拘束ジグ
- 6 ローラー
- 7 载荷フレーム

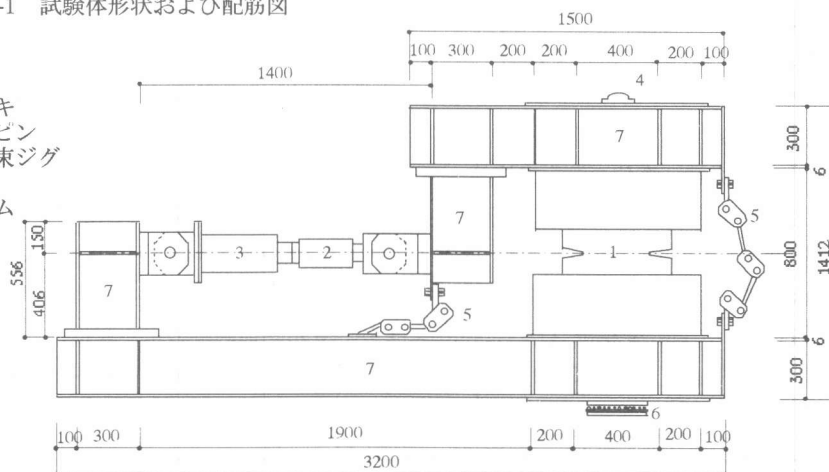


図-2 NMQを加える実験の加力装置

3. N・Mのみを加えた実験の概要

3.1 試験体、加力方法およびひずみの測定方法

N・M・Qを加えた試験体の壁板部分と同じ形状の試験体を製作した。ただし、鉄筋は全く含まれていない。表-2に試験体一覧、表-3に使用したコンクリートの力学的性質を示す。加力は、図-3に示すように、試験体の上の載荷ばり上のピンを移動させ、偏心率を変えた。加力はアムスラー型試験機による。ひずみは、壁板両側面に7枚の60mmのひずみゲージを貼付することにより測定した。

3.2 実験結果

図-6に破壊状況の例を示す。

全く同じ加力条件で2体ずつ実験したが、強度のばらつきはほとんど認められなかった。ひずみ勾配がある場合は、図-6に示すように圧縮応力の大きい部分が圧壊していることがわかる。引張り側では、このように終局直前にノッチに水平に引張ひび割れが入るものもあったが、他はすべて載荷用H型钢と壁板の間が分離し、引張ひび割れを生じなかった。

4. 有効係数に及ぼす m/n の影響について

N・M・Qを受ける無筋コンクリートせん断面の降伏条件として式(1)を提案した[1]。

$$\frac{1}{2} \left(\frac{n^2 + q^2}{v} - n \right) + m = 0 \quad (1)$$

ここで、 v : コンクリートの有効係数、 $n = N / (th \sigma_B)$ 、 $q = Q / (th \sigma_B)$ 、 $m = M / (th^2 \sigma_B)$ である。

また、コンクリート強度と垂直応力の影響を考慮した有効係数 v_n の算定式として式(2)、式(3)を提案した[4][5]。

$$v_n = 2.5 (0.9 - v_0) \frac{\sigma_u}{\sigma_B} + v_0 \quad \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_B} \leq 0.4 \right) \quad (2)$$

$$v_n = 0.9 \quad \left(0.4 \leq \frac{\sigma_u}{\sigma_B} \right) \quad (3)$$

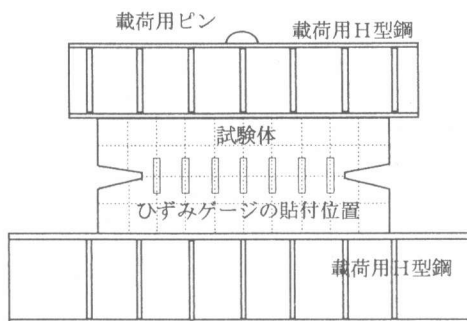


図-3 NMを加える実験の加力装置

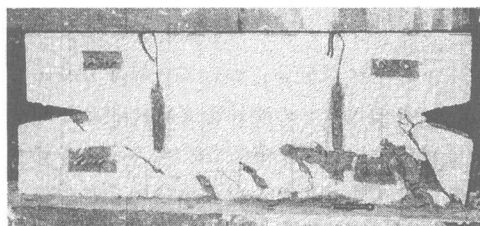


図-4 PC04010 南面の最終破壊状況

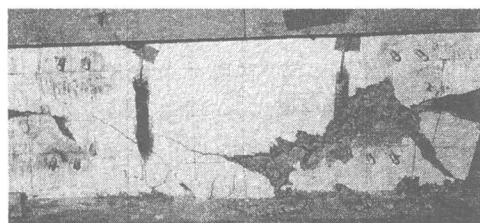


図-5 PC10040 南面の最終破壊状況

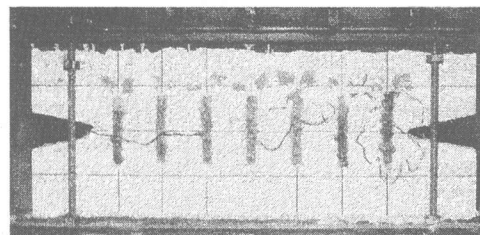


図-6 PC2502 の最終破壊状況

ここで、

$$\nu_0 = (0.8 - \sigma_B / 235) \quad (\sigma_B: \text{MPa}) \quad (4)$$

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_B} = \frac{n^2}{n - 2m} \quad (5)$$

ここで、 σ_u :せん断面の圧縮部分の平均垂直応力度、 σ_B :コンクリート圧縮強度である。

図-7に、 $m=0$ の試験体について圧縮応力度比 σ_u/σ_B と有効係数 ν の関係を実験値とともに示す。この図より、実験値は文献[4]で求めた式(2)、式(3)による値よりかなり小さいことがわかる。このように、実験値が小さくなる原因としては、せん断面の扁平率の影響[6]などが考えられるが、これについては別に検討することとし、ここでは式(4)に修正係数 α_f をかけることによって、この影響を除く。つまり、図-7の中に実線で示すような算定式により、有効係数に及ぼす垂直応力の影響を評価する。したがって、ここでは式(4)のかわりに、次式を用いる。

$$\nu_0 = \alpha_f (0.8 - \sigma_B / 235) \quad (\sigma_B: \text{MPa}) \quad (6)$$

ここでは、図-7より $\alpha_f = 0.334/0.668 = 0.5$ とした。

図-8に、百武ら、望月らの試験体[7][8]を加えて、32体の試験体の有効係数の実験値と式(2)、式(3)、式(5)、式(6)による計算値 ν_n の比と m/n ($m/n=e/h$ であるから偏心率に等しい。ここで、 e :荷重の図心からの偏心距離)の関係を示す。一覧を表-4～表-7に示す。図-8から、明らかに、 m/n 、つまりひずみ勾配が大きくなると有効係数が大きくなることがわかる。これは、張らが示す[9]ように、破壊していない部分のコンクリートがマイクロクラックの進展を抑

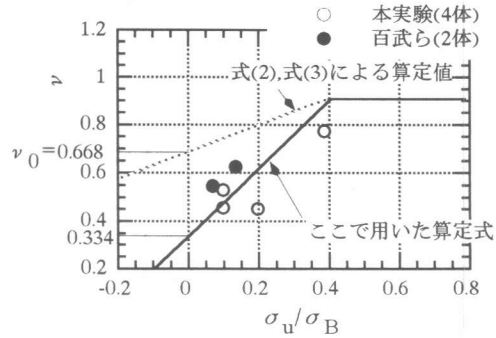


図-7 圧縮応力度比 σ_u/σ_B と有効係数 ν の関係

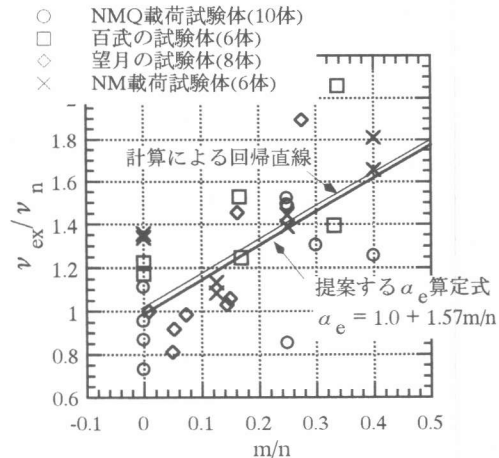


図-8 m/n と m/n の影響を考慮しない有効係数計算値 ν_n に対する実験値 ν_{ex} の比の関係

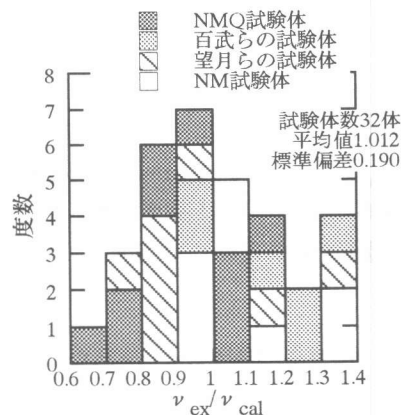
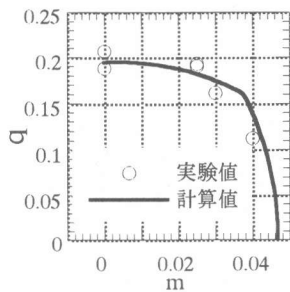
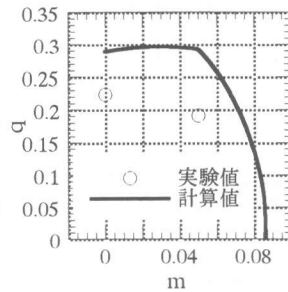


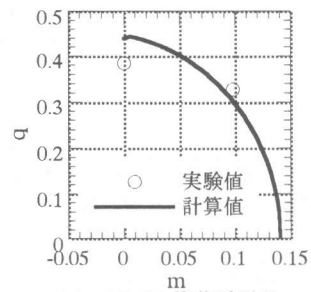
図-9 曲げモーメントを受ける試験体の有効係数 ν の実験値と計算値の比の度数分布



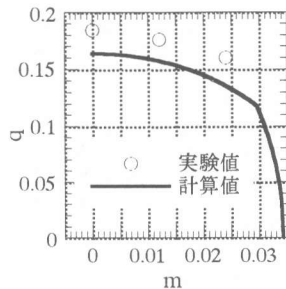
(a) NMQ 载荷試験体 (n=0.1)



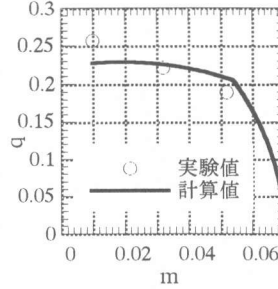
(b) NMQ 载荷試験体 (n=0.2)



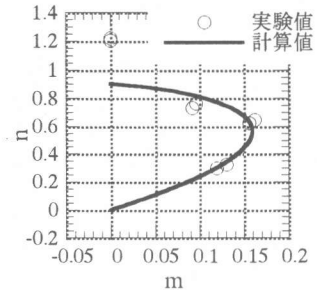
(c) NMQ 载荷試験体 (n=0.389)



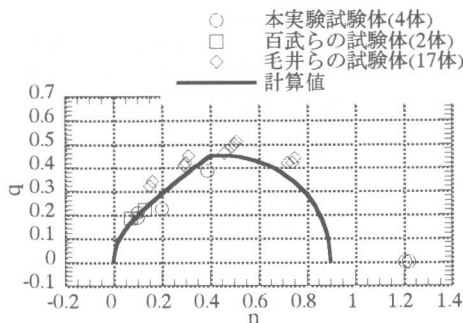
(d) 百武らの試験体 (n=0.072)



(e) 百武らの試験体 (n=0.131)



(f) n-m 平面での比較 (NM 载荷試験体)



(g) n-q 平面での比較

図-10 強度計算値と実験値の比較

制するためであると考えられる。

この相関性を考慮し、新たに m/n の影響を評価する式として次式を提案する。

$$v_{cal} = \alpha_e v_n \quad (7)$$

ここで

$$\alpha_e = 1.0 + 1.57 \frac{m}{n} \quad (8)$$

5. 有効係数算定式の評価について

提案した算定式(7)の精度を検査するため、図-9において、算定式の誘導に用いた試験体32体について、有効係数の実験値と計算値を比較した。ひずみ勾配がない場合[4]に比べ、ばらつきが大きい、ほぼ実験と対応していることがわかる。図-10に強度計算値と実験値の比較図を示す。差が大きいものも認められるが、全体的には概ね実験値を予測できていることがわかる。なお、図-10(g)の検討には毛井らの試験体[10]を加えている。

6. まとめ

N・M・Qの複合応力が加わるコンクリートせん断断面の実験について報告した。この実験の試験体と既往の試験体を合わせた32体の実験結果より、垂直ひずみ勾配が大きくなるにつれて有効係数が増大することを示した。次に、垂直ひずみ勾配の影響を考慮した有効係数の算定式を導き、

その適合性を検討した。その結果、提案した有効係数算定式を用いれば、ばらつきはあるが、コンクリートせん断面強度をほぼ評価できることがわかった。

謝辞

本研究は九州共立大学特別研究助成および第14回スパンクリート協会研究助成金を受けた。また、実験にあたっては、九州共立大学江崎研究室の卒論生、有明高専の上原研究室の卒研生に協力頂いた。加力装置、試験体製作にあたっては、同大学技能員栗山哲生、青木治および生野千力の各氏および有明高専技官松原征男、柿原正治、坂口誠の各氏のお世話になった。ここに、関係各位に対し、深く感謝します。

参考文献

[1] UEHARA, S. : Discrete Limit Analysis of Shear Walls by Yield Criterion of RC Shear Planes Considering Bending Moment, Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol.18 1996(投稿中)

[2] 上原修一、江崎文也：RC板要素せん断面の力学挙動に及ぼす垂直ひずみ勾配の影響に関する実験的研究(予備実験)、日本建築学会研究報告中国・九州支部第10号・構造系、pp.485-488、1996.3

表-4 NMQ 載荷試験体の有効係数実験値および計算値一覧

試験体名	q_{ex}	ν_{ex}	σ_w/σ_B	ν_n	m/n	ν_{cal}	ν_{ex}/ν_{cal}
PC0010	0.207	0.527	0.100	0.475	0.000	0.475	1.111
PC0310	0.161	0.900	0.250	0.691	0.300	1.016	0.886
PC02510	0.190	0.923	0.200	0.619	0.250	0.862	1.070
PC025102	0.193	0.942	0.200	0.619	0.250	0.862	1.092
PC000102	0.188	0.453	0.100	0.474	0.000	0.474	0.955
PC00020	0.223	0.449	0.200	0.616	0.000	0.616	0.729
PC04010	0.112	1.128	0.500	0.900	0.400	1.465	0.770
PC05020	0.191	0.766	0.400	0.900	0.250	1.253	0.611
PC00040	0.384	0.768	0.389	0.884	0.000	0.884	0.869
PC10040	0.327	1.335	0.782	0.900	0.251	1.255	1.063

表-5 NM 載荷試験体の有効係数実験値および計算値一覧

試験体名	q_{ex}	ν_{ex}	σ_w/σ_B	ν_n	m/n	ν_{cal}	ν_{ex}/ν_{cal}
PC0001	1.205	1.205	1.205	0.900	0.000	0.900	1.339
PC0002	1.221	1.221	1.221	0.900	0.000	0.900	1.356
PC2501	0.621	1.250	1.250	0.900	0.250	1.253	0.997
PC2502	0.645	1.298	1.298	0.900	0.250	1.253	1.036
PC4001	0.298	1.490	1.490	0.900	0.400	1.465	1.017
PC4002	0.326	1.628	1.628	0.900	0.400	1.465	1.111
PC1251	0.763	1.020	1.020	0.900	0.125	1.077	0.947
PC1252	0.731	0.977	0.977	0.900	0.125	1.077	0.907

表-6 百武らの試験体の有効係数実験値および計算値一覧

試験体名	q_{ex}	ν_{ex}	σ_w/σ_B	ν_n	m/n	ν_{cal}	ν_{ex}/ν_{cal}
N20E0C	0.184	0.542	0.072	0.443	0.000	0.443	1.224
N20E125C	0.176	0.753	0.108	0.493	0.167	0.622	1.212
N20E250C	0.160	1.332	0.219	0.647	0.338	0.991	1.344
N40E0C	0.257	0.622	0.136	0.529	0.000	0.529	1.174
N40E125C	0.221	0.764	0.197	0.613	0.169	0.776	0.985
N40E250C	0.189	1.206	0.375	0.865	0.331	1.314	0.918

表-7 望月らの試験体の有効係数実験値および計算値一覧

試験体名	q_{ex}	ν_{ex}	σ_w/σ_B	ν_n	m/n	ν_{cal}	ν_{ex}/ν_{cal}
N13EH00C	0.188	1.132	0.185	0.597	0.275	0.855	1.323
N13EH10C	0.138	0.387	0.076	0.420	0.051	0.454	0.851
N13EH20C	0.258	0.575	0.169	0.575	0.008	0.582	0.988
N13EH30C	0.199	0.603	0.189	0.585	0.144	0.717	0.842
N20EH10C	0.199	0.770	0.137	0.530	0.162	0.665	1.159
N20EH20C	0.178	0.426	0.133	0.525	0.049	0.565	0.753
N20EH30C	0.208	0.537	0.155	0.545	0.072	0.606	0.885
N20EH40C	0.258	0.766	0.276	0.724	0.149	0.893	0.858

注 百武ら、望月らの試験体の h/t は 15 である。

[3] 上原修一、江崎文也：RC板要素せん断面の力学挙動に及ぼす垂直ひずみ勾配の影響に関する実験的研究(第3報 無筋コンクリート試験体について)九州共立大学工学部研究報告第21号、pp.111-118、1997.3

[4] 上原修一：鉄筋コンクリートせん断面降伏条件に関する基礎的検討、コンクリート工学年次論文報告集、vol. 17, No. 2, pp.845-850、1995.6

[5] 上原修一、江崎文也：RC板要素せん断面の力学挙動に及ぼす垂直ひずみ勾配の影響に関する実験的研究(予備実験結果の検討)、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2、構造IV、pp.531-532、1996.9

[6] 宮腰ら：13000kgf/cm²級の高強度せん断補強筋を用いたRC壁柱のせん断破壊性状に関する実験的研究(その5)、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2、構造IV、pp.85-86、1996.9

[7] 百武茂ほか：RCプレキャスト耐震壁の接合部耐力に及ぼす曲げ変形の影響(その1：実験概要および実験結果)、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2、構造IV、pp.179-180、1995.8

[8] 望月泰宏ほか：RCプレキャスト耐震壁の水平接合部耐力に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2、構造IV、pp.851-852、1996.9

[9] 張冠華ほか：コンクリート柱の力学特性に及ぼすひずみ勾配の影響、コンクリート工学年次論文報告集、vol. 17, No. 2, pp.345-350、1995.6

[10] 毛井崇博ほか：RC平板のせん断破壊に関する基礎的研究(その2)無筋コンクリート板、日本建築学会研究報告九州支部第33号・1構造系、pp.197-200、1992.3