

論文 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

上原 修一

要旨：これまでに鉄筋コンクリートせん断面降伏条件を提案し、それを用いた剛体ばねモデル法による耐震壁の解析を報告した。この論文では、そこで用いた降伏条件に関し、塑性ひずみ増分の直交性、およびコンクリート圧縮強度有効係数の決定法について、既往の試験体（前者31体、後者123体）との比較により検討した。その結果、塑性ひずみ増分の直交性は、ほぼ満足されていることが確認された。コンクリート圧縮強度有効係数については、垂直応力度及びコンクリート圧縮強度の関数とした提案式で概ね評価できることが分かった。

キーワード：関連する流れ則、直交則、極限解析、剛体ばねモデル、有効係数、降伏条件

1. はじめに

著者は、文献 [1] において、図-1に示すような、垂直応力度とせん断力を受ける鉄筋コンクリート（以下RCとする）せん断面の降伏条件は、コンクリートと鉄筋の降伏条件を累加することによって、図-2のように求められることを示した。さらに、その降伏条件を使った、剛体ばねモデル法により、RC耐震壁の離散化極限解析が可能であることを示した。

本論文では、文献 [1] で用いた、RCせん断面降伏条件に関し、重要と考えられる2つの事項について、基礎的な検討をした。一つは、塑性ひずみ増分のRCせん断面降伏条件に対する直交性の検討である。これは、文献 [1] における解析では関連する流れ則を仮定しているが、その仮定の妥当性を検討するため、および今後、変形量の定量的評価に結びつけるために行ったものである。この検討は、毛井らの試験体（RC試験体17体、無筋試験体14体）と比較することにより行った。

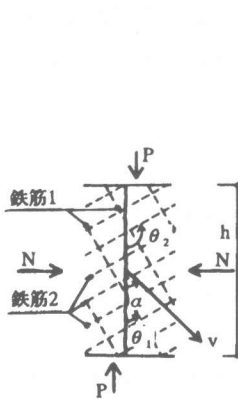


図-1 鉄筋コンクリートせん断面の破壊

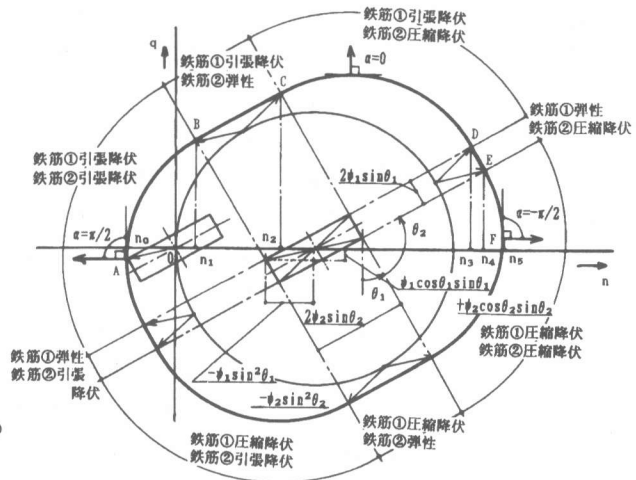


図-2 鉄筋コンクリートせん断面の降伏条件

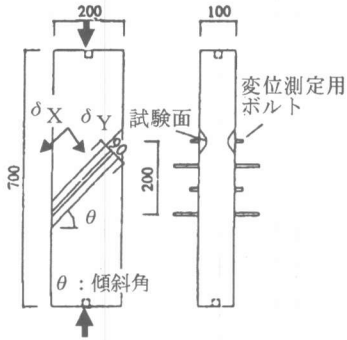


図-3 毛井らの実験 [D1] [D2]

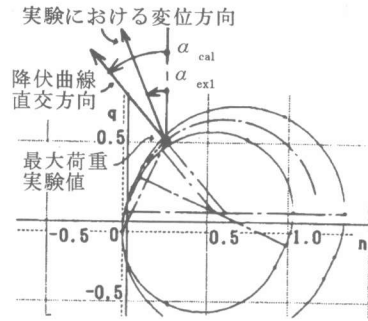


図-4 せん断面降伏曲線とせん断面変位の関係 (試験体No.84)

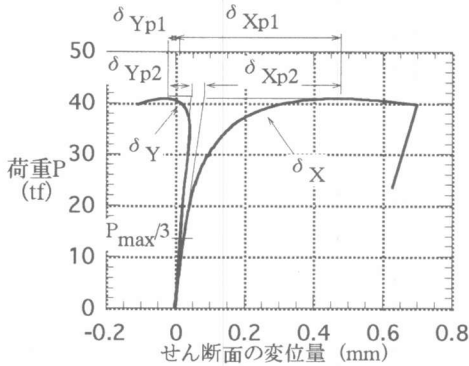


図-5 せん断面における塑性変形量実験値の定義

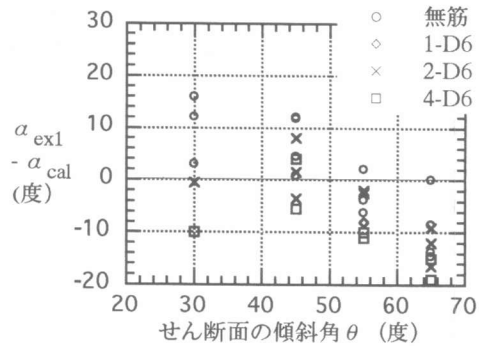


図-6 せん断面傾斜角と変位方向実験値と解析値の差の関係 (全変位を塑性変形量とした場合)

今一つは、コンクリート圧縮強度有効係数に関する検討である。文献 [1] における解析においては、すべて、0.7と仮定して解析したが、周知のように、有効係数はコンクリート強度等さまざまな要因により変動することが報告されている。そこで、本論文において、解析の精度を改善するため、コンクリート圧縮強度有効係数の評価法を提案した。さらに、既往の試験体123体の実験結果と比較、検討した。

なお、本論文で、用いる記号は次のとおりである。

t: 板の厚さ h: 断面のせい v: 隣接要素の相対変位 a: せん断面に対するvの角度 σ_B : コンクリートの圧縮強度 A_{s1} : 鉄筋1の断面積 f_{y1} : 鉄筋1の降伏点 θ : 毛井らの試験体のせん断面の傾斜角 θ_1 : せん断面に対する鉄筋1の角度 A_{s2} : 鉄筋2の断面積 f_{y2} : 鉄筋2の降伏点 θ_2 : せん断面に対する鉄筋2の角度 ν : コンクリート圧縮強度有効係数 ν_{ex} : コンクリート圧縮強度有効係数実験値 ν_{cal} : コンクリート圧縮強度有効係数計算値 $q = P / (h \cdot t \cdot \sigma_B)$ $n = N / (h \cdot t \cdot \sigma_B)$ $\psi_1 = A_{s1} \cdot f_{y1} / (h \cdot \sin \theta_1 \cdot t \cdot \sigma_B)$ $\psi_2 = A_{s2} \cdot f_{y2} / (h \cdot \sin \theta_2 \cdot t \cdot \sigma_B)$ $n_0 = \psi_1 \cdot \sin^2 \theta_1 + \psi_2 \cdot \sin^2 \theta_2$: 鉄筋比に相当する α_c : 試験体の切欠がコンクリート圧縮強度へ及ぼす影響を消去するための係数 (文献 [D1]、[D2] における α と同じ) δ_{Xp1} : せん断面に平行方向の最大強度時の全変位 δ_{Yp1} : せん断面に垂直方向の最大強度時の全変位 δ_{Xp2} : せん断面に平行方向の最大強度時の全変位から弾性変位を除いた変位 δ_{Yp2} : せん断面に垂直方向の最大強度時の全変位から弾性変位を除いた変位 $\alpha_{ex1} = -\tan^{-1} (\delta_{Yp1} / \delta_{Xp1})$: せん断面の変位方向実験値 (全変位) $\alpha_{ex2} = -\tan^{-1} (\delta_{Yp2} / \delta_{Xp2})$:

せん断面の変位方向実験値（弾性変位を除いた変位）

α_{cal} : せん断面の変位方向計算値

2. 塑性ひずみ増分直交性の検討

毛井らは図-3に示すような実験を行った[D1][D2]。この実験においては、破壊面を規定するため、試験体中央部分に、あらかじめ切欠が設けられている。切欠の傾斜角や、鉄筋量等を実験変数とし、強度とともに、せん断面に平行方向、垂直方向の変位などを測定している。

図-4に、降伏曲線とせん断面変位方向の実験値、解析値（降伏曲線に直交方向）を比較した例を示す。実験値には、図-5に示すように、せん

断面での弾性変形、測定区間の変形が含まれていると考えられるため、実験値として、それぞれの方向の全変位 δ_{xp1} 、 δ_{yp1} より得られる方向 α_{ex1} と、最大強度の1/3の応力を通る直線を弾性勾配と考え、それから得られる弾性変位を全変位から除いた変位 δ_{xp2} 、 δ_{yp2} より得られる方向 α_{ex2} の2種類

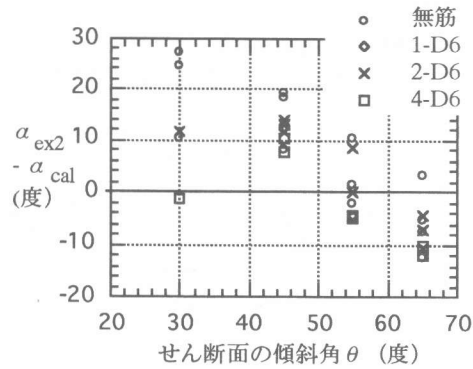


図-7 せん断面傾斜角と変位方向実験値と解析値の差の関係（全変位から弾性変位を除いた変位を塑性変形量とした場合）

表-1 せん断面の変位方向実験値と解析値の比較一覧（RC 17体、無筋 14体）

文献	試験体	傾斜角 θ (度)	鉄筋量	変位方向 (度)			解析値と実験値の差 (度)			
				α_{cal}	α_{ex1}	α_{ex2}	$\alpha_{ex1} - \alpha_{cal}$	$ \alpha_{ex1} - \alpha_{cal} $	$\alpha_{ex2} - \alpha_{cal}$	$ \alpha_{ex2} - \alpha_{cal} $
[D1]	82	45	4-D6	0.0	4.0	10.4	4.0	4.0	10.4	10.4
[D1]	84	65	4-D6	41.0	22.0	29.1	-19.0	19.0	-11.9	11.9
[D1]	122	55	1-D6	20.0	12.0	15.5	-8.0	8.0	-4.5	4.5
[D1]	123	55	2-D6	20.0	17.5	20.2	-2.5	2.5	0.2	0.2
[D1]	124	55	4-D6	20.0	10.0	15.1	-10.0	10.0	-4.9	4.9
[D2]	131	30	2-D6	-30.0	-30.5	-18.4	-0.5	0.5	11.6	11.6
[D2]	132	45	2-D6	0.5	-3.0	13.4	-3.5	3.5	12.9	12.9
[D2]	133	55	2-D6	21.0	19.0	29.6	-2.0	2.0	8.6	8.6
[D2]	134	65	2-D6	41.5	25.0	30.8	-16.5	16.5	-10.7	10.7
[D2]	141	30	4-D6	-30.0	-40.0	-31.1	-10.0	10.0	-1.1	1.1
[D2]	142	45	4-D6	0.0	-5.5	7.8	-5.5	5.5	7.8	7.8
[D2]	143	55	4-D6	25.5	14.5	21.2	-11.0	11.0	-4.3	4.3
[D2]	144	65	4-D6	41.5	26.5	31.5	-15.0	15.0	-10.0	10.0
[D2]	151	45	2-D6	0.0	8.0	14.0	8.0	8.0	14.0	14.0
[D2]	152	45	2-D6	1.5	3.0	13.4	1.5	1.5	11.9	11.9
[D2]	153	65	2-D6	41.0	29.0	34.1	-12.0	12.0	-6.9	6.9
[D2]	154	65	2-D6	41.0	32.0	36.8	-9.0	9.0	-4.2	4.2
平均							-6.5	8.1	1.1	8.0
[D1]	81	45	無筋	0.0	0.8	8.0	0.8	0.8	8.0	8.0
[D1]	83	65	無筋	39.5	24.9	31.9	-14.6	14.6	-7.6	7.6
[D1]	91	30	無筋	-31.0	-28.1	-20.6	2.9	2.9	10.4	10.4
[D1]	92	45	無筋	0.0	11.7	18.4	11.7	11.7	18.4	18.4
[D1]	93	55	無筋	21.0	17.2	22.5	-3.8	3.8	1.5	1.5
[D1]	94	65	無筋	39.5	31.0	34.5	-8.5	8.5	-5.0	5.0
[D1]	101	30	無筋	-29.0	-17.0	-1.6	12.0	12.0	27.4	27.4
[D1]	102	45	無筋	0.0	12.0	19.4	12.0	12.0	19.4	19.4
[D1]	103	55	無筋	20.0	22.0	30.6	2.0	2.0	10.6	10.6
[D1]	104	65	無筋	39.0	39.0	42.2	0.0	0.0	3.2	3.2
[D1]	111	30	無筋	-31.0	-15.1	-6.4	15.9	15.9	24.6	24.6
[D1]	112	45	無筋	0.0	4.4	12.4	4.4	4.4	12.4	12.4
[D1]	113	55	無筋	21.0	14.8	18.9	-6.2	6.2	-2.1	2.1
[D1]	114	65	無筋	39.5	25.8	27.2	-13.7	13.7	-12.3	12.3
平均							1.1	7.8	7.8	11.6

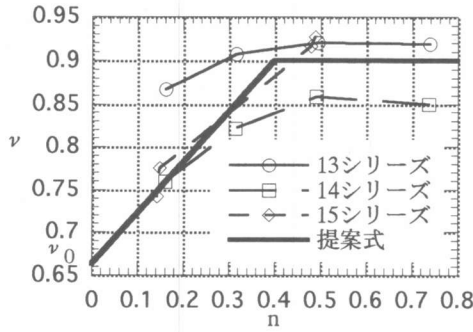


図-8 nと有効係数νの関係

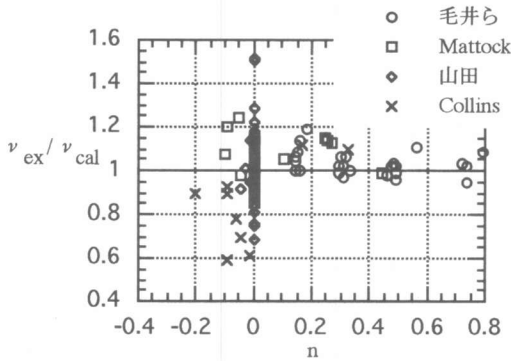


図-10 nと有効係数νの実験値と計算値の比の関係

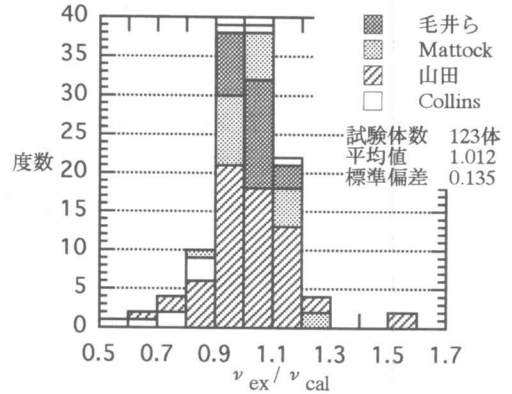


図-9 有効係数νの実験値と計算値の比の度数分布

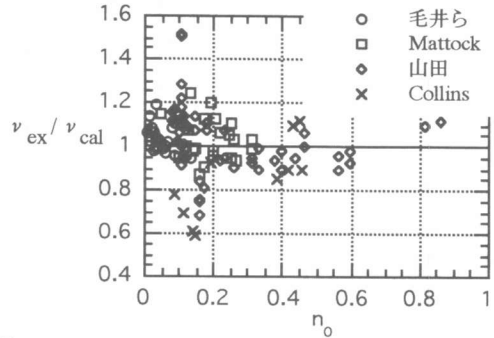


図-11 n₀と有効係数νの実験値と計算値の比の関係

を取り上げた。

図-6、図-7に各実験値と解析値の差とせん断面の傾斜角θの関係を示す。なお、ここでは14体の無筋の試験体の結果も含めている。図-6、図-7とも、全体的に右下がりの傾向がある。この原因の一つとして、コンクリート引張強度無視の影響が考えられる。また、鉄筋量が増すと縦軸の値が小さくなる傾向がうかがえる。ばらつきはあるが、図-6、図-7のいずれも平均的には実験値と解析はほぼ一致しており、せん断面の塑性ひずみ増分は降伏曲線とほぼ直交するとしても良いと考えられる。

検討に用いた試験体の一覧を表-1に示す。

3. コンクリート圧縮強度有効係数νについて

3.1 νの評価式の誘導

νの評価法については、コンクリート圧縮強度の関数とする [2] など、さまざまな提案式がみられ

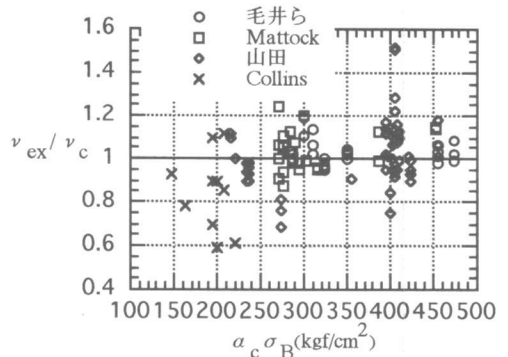


図-12 α_cσ_Bと有効係数νの実験値と計算値の比の関係 (毛井らの試験体以外はα_c=1.0)

るが、ここでは、文献 [3] において軸方向力の影響が大きいと報告されていることから、特にせん断面に加わる垂直応力度と ν の関係について検討した。

評価式誘導に用いた試験体は、毛井らが行った実験の中で、コンクリート強度が同程度で、垂直応力度を変化させた試験体 13、14、15 シリーズの 12 体 [D2] である (図-3 参照)。図-8 に 12 体の試験体の実験から得られる ν と n の関係を示す。ここで、 ν の実験値は、直線と円弧からなる RC せん断断面降伏条件が、 n - q 平面上で丁度 実験値を通る時のそれとして求められる [1]。

図-8 の結果から、 ν の評価式を次のように提案する。

$$\nu_{cal} = 2.5 (0.9 - \nu_0) n + \nu_0 \quad (n \leq 0.4) \quad (1)$$

$$\nu_{cal} = 0.9 \quad (0.4 < n) \quad (2)$$

ここで

$$\nu_0 = 0.8 - \sigma_B / 2400 \quad (3)$$

表-2 提案式誘導に用いた試験体一覧 (12 体)

文献	試験体名	$\alpha_c \sigma_B$	θ_1 (度)	θ_2 (度)	ψ_1	ψ_2	n	n_0	ν_{ex}	ν_{cal}	ν_{ex}/ν_{cal}
[D2]	No.131	310	30	120	0	0.088	0.739	0.066	0.92	0.90	1.02
[D2]	No.132	310	45	135	0	0.088	0.494	0.044	0.92	0.90	1.02
[D2]	No.133	310	55	145	0	0.088	0.317	0.029	0.91	0.85	1.06
[D2]	No.134	310	65	155	0	0.088	0.161	0.016	0.87	0.76	1.14
[D2]	No.141	323	30	120	0	0.173	0.737	0.130	0.85	0.90	0.94
[D2]	No.142	323	45	135	0	0.173	0.491	0.086	0.86	0.90	0.95
[D2]	No.143	323	55	145	0	0.173	0.314	0.057	0.82	0.85	0.97
[D2]	No.144	323	65	155	0	0.173	0.160	0.031	0.76	0.76	1.00
[D2]	No.151	351	45	135	0	0.072	0.488	0.036	0.93	0.90	1.03
[D2]	No.152	351	45	135	0	0.072	0.479	0.036	0.92	0.90	1.02
[D2]	No.153	351	65	155	0	0.072	0.142	0.013	0.74	0.74	1.00
[D2]	No.154	351	65	155	0	0.072	0.148	0.013	0.77	0.74	1.04

表-3 提案式誘導に用いた試験体以外の試験体 (111 体)

[D1]	No.82	[D3]	1.5A	[D7]	3.1AL1	[D7]	3.3BH2	[D7]	3.5BH61	[D7]	7.2BH112.52
[D1]	No.84	[D3]	1.5B	[D7]	3.1AL2	[D7]	3.3BL1	[D7]	3.5BH62	[D7]	7.2BH1351
[D1]	No.122	[D3]	1.6A	[D7]	3.1BH1	[D7]	3.3BL2	[D7]	3.6BH61	[D7]	7.2BH1352
[D1]	No.123	[D3]	1.6B	[D7]	3.1BH2	[D7]	3.4AH1	[D7]	3.6BH62	[D7]	15.2AH1
[D1]	No.124	[D3]	6.2	[D7]	3.1BL1	[D7]	3.4AH2	[D7]	3.2AH131	[D7]	15.4BH1
[D2]	No.161	[D4]	9.1	[D7]	3.1BL2	[D7]	3.4AL1	[D7]	3.2AH132	[D7]	15.1AH2
[D2]	No.162	[D4]	9.2	[D7]	3.2AH1	[D7]	3.4AL2	[D7]	3.3AH131	[D8]	PV10
[D2]	No.163	[D4]	9.3	[D7]	3.2AH2	[D7]	3.4BH1	[D7]	3.3AH132	[D8]	PV12
[D2]	No.164	[D4]	9.4	[D7]	3.2AL1	[D7]	3.4BH2	[D7]	5.1AH021	[D8]	PV19
[D2]	No.171	[D4]	9.5	[D7]	3.2AL2	[D7]	3.4BL1	[D7]	5.1AH022	[D8]	PV20
[D2]	No.172	[D4]	9.6	[D7]	3.2BH1	[D7]	3.4BL2	[D7]	5.1AH041	[D8]	PV22
[D2]	No.173	[D6]	E1U	[D7]	3.2BH2	[D7]	3.2BL61	[D7]	5.1AH042	[D8]	PV27
[D2]	No.174	[D6]	E4U	[D7]	3.2BL1	[D7]	3.2BL62	[D7]	5.1AH061	[D8]	PV28
[D3]	1.2A	[D6]	E6U	[D7]	3.2BL2	[D7]	3.3BH61	[D7]	5.1AH062	[D8]	PV29
[D3]	1.2B	[D6]	F1U	[D7]	3.3AH1	[D7]	3.3BH62	[D7]	7.2BH451	[D8]	PV23
[D3]	1.3A	[D6]	F4U	[D7]	3.3AH2	[D7]	3.4BH61	[D7]	7.2BH452	[D8]	PV25
[D3]	1.3B	[D6]	F6U	[D7]	3.3AL1	[D7]	3.4BH62	[D7]	7.2BH67.51		
[D3]	1.4A	[D7]	3.1AH1	[D7]	3.3AL2	[D7]	3.4BL61	[D7]	7.2BH67.52		
[D3]	1.4B	[D7]	3.1AH2	[D7]	3.3BH1	[D7]	3.4BL62	[D7]	7.2BH112.51		

なお、高強度コンクリートの試験体についての報告は少なく、コンクリート圧縮強度が ν に及ぼす影響についての検討はできないので、ここでは文献 [3] に示す式を式 (3) として準用した。図-8中に、評価式による値を太線で示す。誘導に用いた試験体の一覧を表-2に示す。

3.2 ν の評価式の検討

図-9～図-12に、式の誘導に用いた試験体12体を含む、既往の試験体123体による検討結果を示す。なお、試験体の選定にあたっては、 n_0 が0.08以下で、且つ n_0+n が0.08以下のものは ν の評価が難しく、誤差が大きく見込まれることから除外した。図-8に示すように、平均値が1.012、標準偏差が0.135と比較的よく評価できていると考える。検討に用いた試験体名の一覧を表-3に示す。また、Collinsの試験体は平板であるが、破壊面の応力は、加力面の応力を座標変換することにより求めた。

4. まとめ

RCせん断面降伏曲線と塑性ひずみ増分の直交性に関し、既往のRCせん断面試験体17体、無筋コンクリートせん断面試験体14体の実験結果を用いて検討したところ、ほぼ直交しているとみなして良いとの結果が得られた。また、RCせん断面条件に用いる、コンクリート圧縮強度有効係数 ν について、RCせん断面試験体123体の実験結果を用いて検討した。その結果、 ν を垂直応力度とコンクリート圧縮強度の関数としたところ実験値との対応は良好であった。

謝辞

貴重なデータを快く送って頂いた、毛井崇博氏（竹中工務店）、菊池健児先生（大分大学）、文献を送付頂いた山田博士（前田建設）に深く感謝します。

参考文献

- 1) 上原修一：鉄筋コンクリートせん断面降伏条件による鉄筋コンクリート造耐震壁の離散化極限解析、コンクリート工学年次論文報告集 Vol16, No.2, 1994年, pp.1337-1342
- 2) Nielsen, M.P. : Limit Analysis and Concrete Plasticity, Prentice-Hall, 1984.
- 3) 長沼一洋、山口恒雄：ひび割れたコンクリートの圧縮特性に関する研究、JCIコロキウム「RC構造のせん断設計法に関する解析的研究」論文集, pp.23-30, 1989.10

検討に用いた試験体の引用文献

- D1) 毛井崇博、上田真稔、菊池健児、吉村浩二、末石伸行、野田孝介：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、日本建築学会九州支部研究報告、第33号、pp.197-200, 1992.3
- D2) 毛井崇博、上田真稔、菊池健児、吉村浩二、野田孝介：RC平板のせん断破壊に関する基礎的研究（その3）鉄筋コンクリート板、日本建築学会研究報告中国・九州支部、第9号の1構造系、pp.325-328, 1993.3
- D3) Hofbeck, J. A., Ibrahim, I. O. and Mattock, Alan H. : Shear Transfer in Reinforced Concrete, ACI Journal, pp.119 - 128, Feb. 1969
- D4) Mattock, Alan H. and Hawkins, Neil M. : Shear Transfer in Reinforced Concrete - Recent Research, PCI Journal, pp.55 - 75, March - April 1972
- D5) Mattock, A. H. : Shear Transfer in Concrete Having Reinforcement at an Angle to the Shear Plane, Shear in Reinforced Concrete, SP-42, American Concrete Institute, Detroit, 1974, PP.17-42
- D6) Mattock, A. H., "Shear Transfer in Reinforced Concrete with Moment or Tension Acting Across the Shear Plane," PCI Journal, July-August 1975, pp.76-93
- D7) 山田一字：鉄筋コンクリート製原子炉格納容器の設計における問題点、特にRCシェル要素のせん断設計方法の合理化に関する研究、前田建設技術研究所報、No.22-1、1982年3月
- D8) Vecchio, F., Collins, M. P. : The Response of Reinforced Concrete to Shear and Normal Stresses, ISBN 0-7727-7029-8, Publication No. 82-03, University of Tronto, March 1982