

論文 粘弾塑性サスペンション要素法によるコンクリートの引張・曲げ破壊挙動の解析

荒井正直^{*1}・谷川恭雄^{*2}・森博嗣^{*3}・黒川善幸^{*4}

要旨：コンクリート構造物の破壊性状を、ひび割れの発生および進展を含めて予測することを目的として、本研究では、粘弾塑性サスペンション要素法を用いた数値解析的アプローチを試みる。本稿では、前報[1]で報告した圧縮破壊に引き続いて、引張・曲げ応力を受けるコンクリートの破壊挙動に与える諸要因について検討する。解析対象としては、直接引張試験、割裂引張試験、中央集中荷重および3等分点荷重による曲げ試験を取り上げ、それぞれのシミュレーション結果について考察を行った。

キーワード：粘弾塑性解析、非連続体モデル、破壊シミュレーション、引張破壊、曲げ破壊

1. まえがき

コンクリートの引張・曲げ破壊特性は、各種の外力を受けるコンクリート構造物の崩壊性状を予測する上で重要であり、各種強度の寸法依存性を中心として、破壊力学的な立場からも、実験的および解析的に検討されている[2]～[4]。しかし、コンクリートの破壊特性を再現するためには、ひび割れ進展過程を動的な立場から把握することが重要であり、また、最大耐力点以降に至るまでの変形挙動の正確なモデル化が不可欠である。

本研究の目的は、各種応力を受けるコンクリートの応力-ひずみ関係に与える諸要因の影響について数値解析的に検討し、コンクリートのひび割れ発生およびその進展を動的に取り扱うことができる解析手法を確立することにある。本稿では、コンクリートの破壊シミュレーション手法として先に提案した粘弾塑性サスペンション要素法を用いて、コンクリートの引張・曲げ破壊挙動の解析を行った結果を報告する。また、今回の解析では、従来の計算手法（ここでは、TYPE-Oと略記）を拡張した計算手法（ここでは、TYPE-N1およびTYPE-N2と略記）を用いた。TYPE-Oと、TYPE-N1およびTYPE-N2は、せん断破壊条件および粗骨材の回転の考慮の有無などが異なっており、本稿では、改良点のみについて説明する。解析手法の詳細は、既報[1]を参照されたい。

2. 解析手法の拡張

今回、新たに拡張を行った点は、以下の2点である。

- 1)粗骨材の回転の考慮。
- 2)破壊限界（Coulomb）線の変更。

上記1)については、並進(u)に関する運動方程式に、回転(ϕ)による運動方程式を付加した次式によって表される。

*1 名古屋大学大学院 工学研究科建築学専攻、工修（正会員）

*2 名古屋大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）

*3 名古屋大学助教授 工学部建築学科、工博（正会員）

*4 名古屋大学助手 工学部建築学科、工修（正会員）

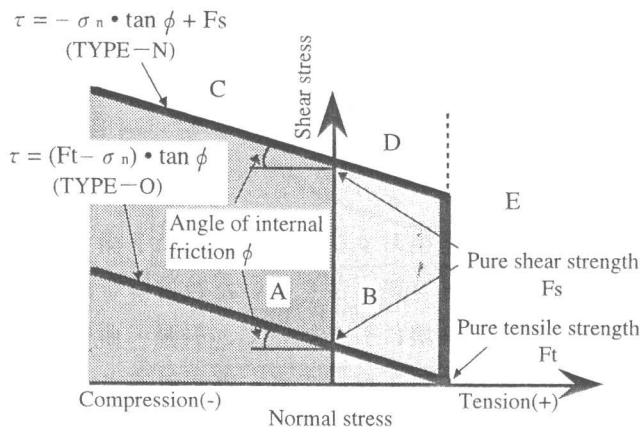


図-1 破壊条件

表-1 各解析プログラムの比較

Analytical method		Rotation of node	Criteria
TYPE-O		Rigid	Eq.(3)
TYPE-N	TYPE-N1		Eq.(4)
	TYPE-N2	Free	

$$\tau > (F_t - \sigma_n) \cdot \tan \phi \quad \text{or} \quad \sigma_n > F_t \quad (3)$$

$$\tau > -\sigma_n \cdot \tan \phi + F_s \quad \text{or} \quad \sigma_n > F_t \quad (4)$$

ここに、 τ ：せん断応力、 F_t ：純引張強度、 σ_n ：軸方向応力（引張を正とする）、 ϕ ：内部摩擦角、 F_s ：

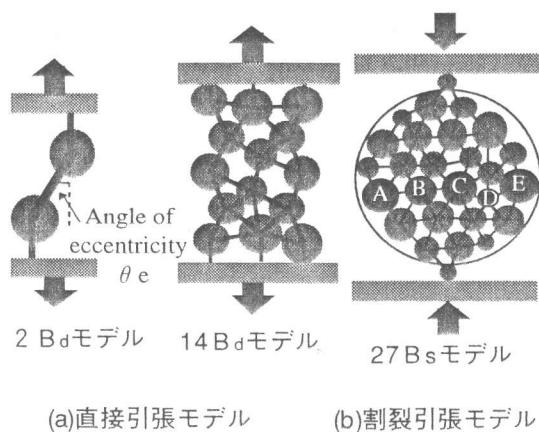
純せん断強度（今回の計算では、 $F_s=2F_t$ と仮定した）。

この変更は、引張領域の破壊に関する実測データを考慮したものである。

本稿では、上記の1)および2)の改良点の影響を調べるために、表-1に示す3種類の計算方法を比較している。

3. 引張試験のシミュレーション

今回の解析では、直接引張試験と割裂引張試験のシミュレーションを行った。いずれも材料パラメータであるモルタルの純引張強度 F_t および内部摩擦角 ϕ に影響要因として取り上げ、コンクリートの引張破壊挙動への影響について検討した。解析に用いた粗骨材配置モデルを図-2に、入力データを表-2に示す。



(a)直接引張モデル (b)割裂引張モデル

図-2 粗骨材配置モデル（引張モデル）

表-2 入力データ

		$\tan \phi$	F_t	E	η	v	d	D
Direct tension model	2Bd-model	0.3	3	21	0.5	0.02	1.2	4
	14Bd-model	0.1						
Tensile splitting model	27Bs-model	0.2	1	21	0.5	0.02	0.5~1.0	6.2
		0.3	2					
			3					
Bending model	14Bb-model	0.2				0.5	1.2	

[Notes] ϕ : Angle of internal friction, F_t : Pure tensile strength (MPa), E: Elastic modulus (GPa), η : Viscosity (MPa·s), v: Loading rate (cm/s), d: Diameter of aggregate (cm), D: Distance between loading boards (cm)

3.1 直接引張試験

直接引張試験のシミュレーションでは、まず、最も単純な2B_dモデルを用いて、TYPE-OおよびTYPE-N1の2種類の計算を行い、破壊条件の影響について検討した。

いずれの粗骨材配置モデルも載荷板を等速度運動させる変位制御により、直接引張試験のシミュレーションを行った。なお、コンクリートの引張応力 σ_t は、次式により算定した。

$$\sigma_t = 2P / \Sigma S \quad (5)$$

ここに、P：載荷板荷重 (kgf)、 ΣS ：境界面に形成されるサスペンション要素断面積の総和。

(1) 破壊条件の影響 (2B_dモデル)

図-3は、粗骨材間要素の偏心角 θ_e の変化が引張応力-ひずみ関係に与える影響を示したものである。(a)、(b)いずれの場合も、偏心角 θ_e が小さいほど、引張応力上昇域における応力-ひずみ曲線の勾配は急になる。また、(b)の場合では、偏心角 θ_e の値にかかわらず、コンクリート全体系の引張耐力がモルタルの純引張強度 F_t に一致するのに対し、(a)の場合では、偏心角 $\theta_e = 0$ 以外は、偏心角 θ_e が大きくなるにつれて、コンクリート全体系の引張耐力は純引張強度 F_t よりも小さくなる。この2B_dモデルでは、粗骨材-載荷板間要素には純引張応力が、また、粗骨材間要素には引張せん断応力が作用するが、(a)と(b)の計算結果の差異は、せん断破壊条件が異なっているために生じるものである。すなわち、(a)の場合には、粗骨材間要素にせん断破壊が生じるのに対し、(b)の場合は、せん断破壊応力が大きくなるため、粗骨材間要素が破壊する以前に、粗骨材-載荷板間要素に純引張破壊が生じる。

(2) 純引張強度 F_t の影響 (14B_dモデル)

図-4は、モルタルの純引張強度 F_t がコンクリート全体系の引張耐力に与える影響を調べるため、14B_dモデルを用いて、TYPE-N1の計算を行った結果を示したものである。純引張強度 F_t が変化しても、ほぼ同様の引張応力の上昇域を示し、引張耐力点に達した後、応力が急激に減少し、脆性破壊が再現される。コンクリート全体系の引張耐力は、モルタルの純引張強度 F_t に比例して大きくなるが、その数値はモルタルの純引張強度 F_t よりも若干小さく

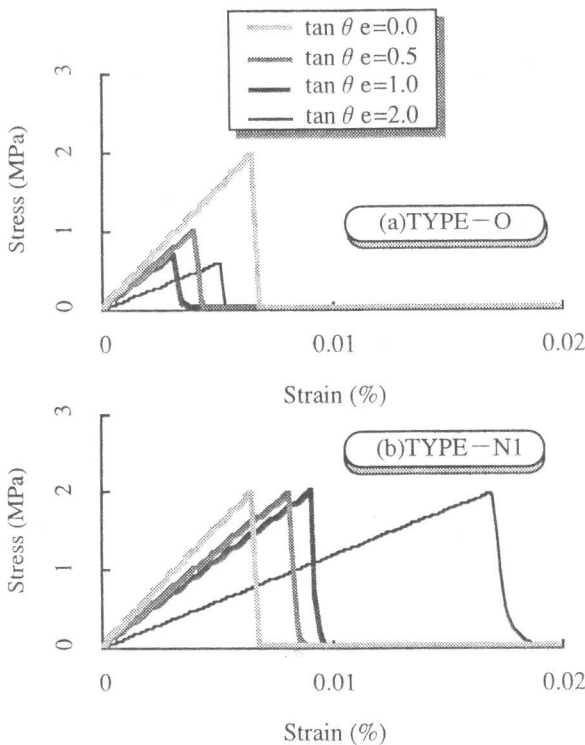


図-3 引張応力-ひずみ関係
(θ_e の影響：2B_dモデル、 $F_t=3\text{MPa}$ 、 $\tan \phi=0.3$)

め、14B_dモデルを用いて、TYPE-N1の計算を行った結果を示したものである。純引張強度 F_t が変化しても、ほぼ同様の引張応力の上昇域を示し、引張耐力点に達した後、応力が急激に減少し、脆性破壊が再現される。コンクリート全体系の引張耐力は、モルタルの純引張強度 F_t に比例して大きくなるが、その数値はモルタルの純引張強度 F_t よりも若干小さく

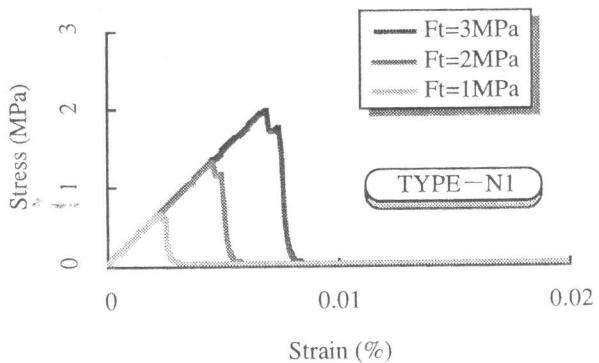


図-4 引張応力-ひずみ関係
(F_t の影響：14B_dモデル、 $\tan \phi=0.2$)

なっている。コンクリート全体系の引張破壊挙動（特に引張耐力）は、粗骨材-載荷板間要素の純引張破壊および粗骨材間要素のせん断破壊のいずれかに支配されるが、その決定因子の1つが粗骨材どうしの偏心角 θ_e であり、この解析例では、粗骨材間要素の破断で全体系の耐力が決まっている。また、せん断破壊条件に起因する差が引張領域では支配的となる。

(3)内部摩擦角 ϕ の影響（14B_dモデル）

図-5は、内部摩擦角 ϕ がコンクリート全体系の引張耐力に与える影響を示したものであり、14B_dモデルにTYPE-N1を用いた結果である。内部摩擦角 ϕ の変化にかかわらず、ほぼ同じ形状の応力-ひずみ関係となっている。この点は先に報告した圧縮破壊とは大きく異なる点である[1]。また、紙数の都合で示していないが、TYPE-Oの場合では、内部摩擦角 ϕ が大きくなるほど引張耐力は大きくなる。

3.2 割裂引張試験

図-2に示した円形断面を有する27B_sモデルを用いて、TYPE-N1の計算手法による割裂引張試験のシミュレーションを行った。ここでは、引張破壊挙動に与える材料パラメータの影響の他に、試験体の変形過程を、断面内の粗骨材間要素間の距離より求めたひずみによって検討した。

なお、コンクリートの引張応力 σ_t は、次式によって求めた。

$$\sigma_t = 2P / (\pi d L) \quad (6)$$

ここに、P：荷重(kgf)、d：円柱供試体の直径(cm)、L：円柱供試体の長さ(cm)。

(1) 純引張強度 F_t の影響

図-6は、モルタルの純引張強度 F_t が全体系の引張応力-横ひずみ曲線に及ぼす影響を示したものである。この図によれば、コンクリート全体系の割裂引張強度は、入力値として用いたモルタルの純引張強度 F_t よりも、若干小さい値となった。

(2) 内部摩擦角 ϕ の影響

図-7は、内部摩擦角 ϕ が引張応力-横ひずみ曲線に及ぼす影響を示したものである。この図によれば、内部摩擦角 ϕ の増加に伴ってコンクリート全体系の割裂引張強度は増加している。前述の直接引張試験の場合と比較すると、内部摩擦角 ϕ の影響を大きく受けており、純引張のみで破壊が生

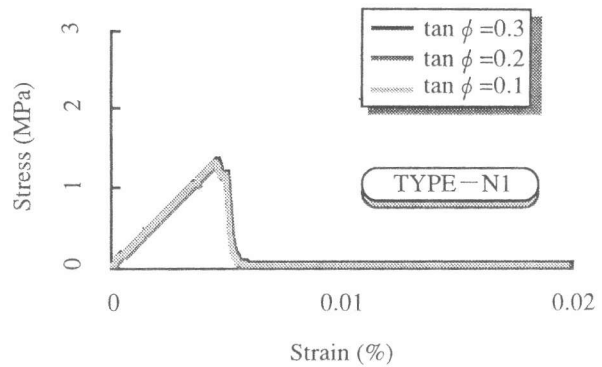


図-5 引張応力-ひずみ関係
($\tan \phi$ の影響：14B_dモデル、 $F_t=2\text{MPa}$)

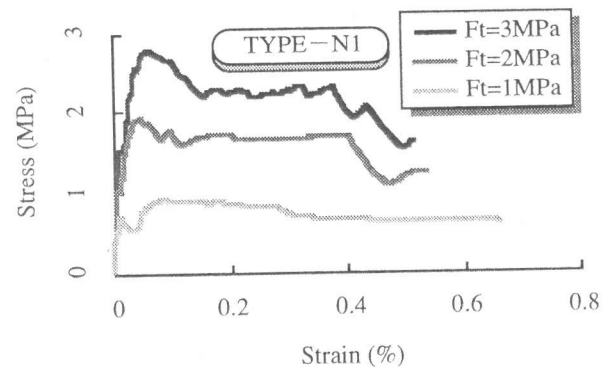


図-6 引張応力-横ひずみ関係
(F_t の影響：27B_sモデル、 $\tan \phi=0.3$)

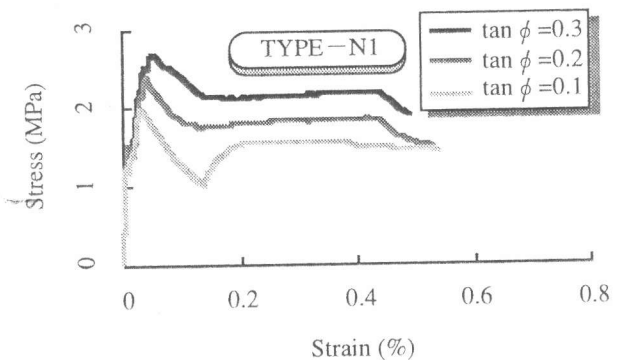


図-7 引張応力-横ひずみ関係
($\tan \phi$ の影響：27B_sモデル、 $F_t=3\text{MPa}$)

じていないことを示している。

(3) 変形過程

図-8は、荷板間中央部に位置する各粗骨材（図-2中のA,B,C,DおよびE）間のひずみの時間変化曲線を示したものである。荷荷開始直後から供試体中心部のBC間のひずみが最も大きくなっており、クラックの発生とともに急激に増大する。また、その結果、外側のAB間のひずみが急激に減少し、一時的に周辺部が除荷される現象が再現されている。

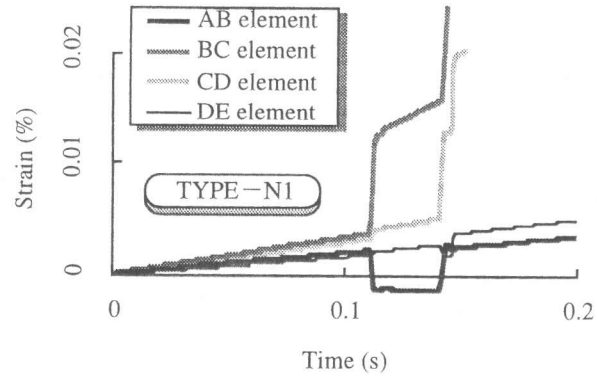


図-8 ひずみの時間変化 (27Bsモデル)

4. 曲げ試験のシミュレーション

図-9に示す2種類の解析モデルを用いて、中央集中荷重および3等分点荷重試験時のコンクリート梁の曲げ破壊のシミュレーションを行った。ここでは、モルタルの純引張強度 F_t および荷荷試験方法の差異がコンクリートの曲げ変形挙動に及ぼす影響について検討した。また、計算手法としては、TYPE-OおよびTYPE-N2の2種類を用い、それぞれの結果を比較した。解析に用いた入力データを前掲の表-2に示す。

いずれの試験方法においても曲げ応力 σ_b は、次式によって算出した。

$$\sigma_b = M / Z \quad (7)$$

ここに、 M ：最大曲げモーメント(kgf・cm)、 Z ：断面係数(cm^3)。

ここでは、供試体として粗骨材に外接する直方体を想定し、そのスパンおよび長方形断面より、上記のモーメントおよび断面係数を与えた。

図-10および11は、モルタルの純引張強度 F_t が曲げ応力-中央たわみ関係に与える影響を示したものであり、前者は中央集中荷重試験、後者は3等分点荷重試験のシミュレーション結果である。これらの図によれば、いずれの場合も、供試体の曲げ耐力はモルタルの純引張強度 F_t にほぼ比例している。また、TYPE-OおよびTYPE-N2を比較すると、TYPE-Oの方が、最大耐力はやや小さく、応力下降域が延性的となる。図-10と図-11とを比較すると、荷荷方法による違いが

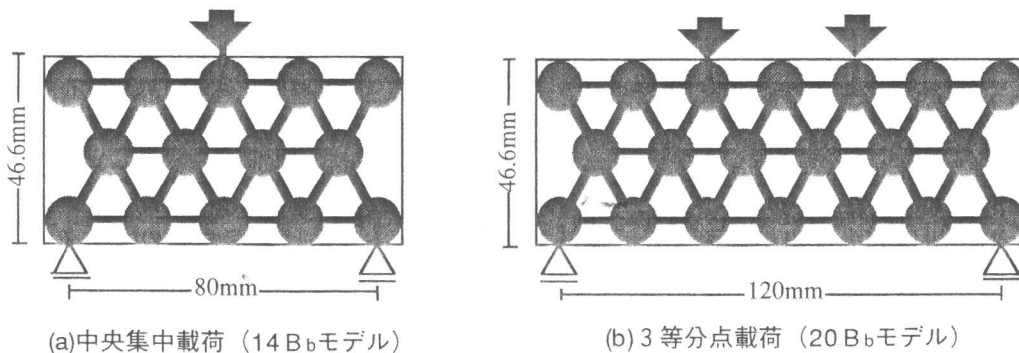


図-9 粗骨材配置モデル (曲げモデル)

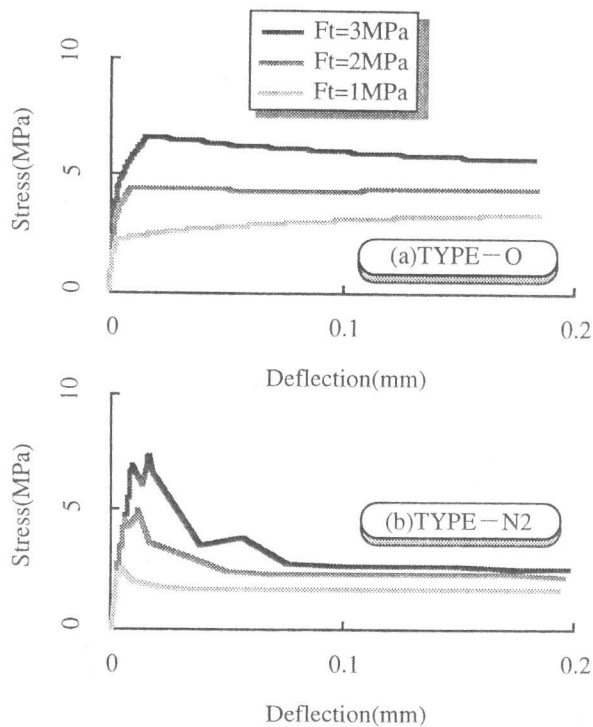


図-10 曲げ応力-中央たわみ関係
(F_t の影響：中央集中荷重試験)

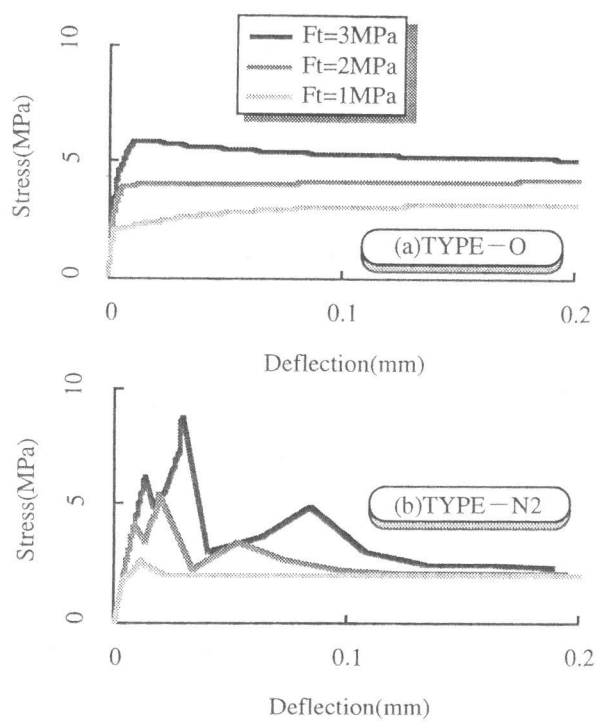


図-11 曲げ応力-中央たわみ関係
(F_t の影響：3等分点荷重試験)

若干見られる。現実に観測される結果は、図(b)の形状に近いものであり、この種の解析には、粗骨材の回転を考慮する計算手法が不可欠であることがわかる。

5. まとめ

本研究では、粘弾塑性サスペンション要素法を用いて、引張・曲げ応力を受けるコンクリートの破壊性状に関するシミュレーションを行った。本研究によって得られた結果は、次のようにまとめられる。

- 1) 直接引張試験および割裂引張試験のシミュレーションでは、新たなせん断破壊条件の採用によりコンクリート全体系の引張耐力とモルタルの純引張強度 F_t がほぼ一致する結果が得られるが、粗骨材間要素の構成状態によっては引張せん断破壊によって、引張耐力が若干小さくなる。
- 2) 曲げ試験のシミュレーションでは、計算手法によらず、ほぼ純引張強度 F_t に比例した曲げ耐力を得ることができるが、粗骨材の回転を考慮することによって、実測結果に近い変形挙動を再現することができる。

【謝辞】本研究に際して、船見晃啓君（名古屋大学大学院生）の助力を得た。また、本研究費の一部は、石田財団および内藤科学技術財団研究助成金、平成6年度文部省科研費一般研究(C)・同特別研究員奨励研究によった。付記して謝意を表す。

【引用文献】

- [1]森 博嗣・荒井正直・船見晃啓・谷川恭雄：サスペンション要素法によるコンクリートの破壊解析に関する研究，コンクリート工学論文報告集，Vol.15，No.1，pp.417-422，1993.6.
- [2]渡部 憲・山田和夫・山本俊彦・石川雅美：コンクリートの曲げ破壊挙動の寸法依存性に関する基礎的研究，コンクリート工学論文報告集，Vol.15，No.1，pp.453-458，1993.6.
- [3]内田裕市・六郷恵哲・小柳 浴：コンクリートの曲げ強度の寸法効果に関する破壊力学的検討，土木学会論文集，Vol.16，No.442，pp.101-107，1992.2.
- [4]六郷恵哲・白井伸明・内田裕市：コンクリートの破壊の数値解析の現状と課題，コンクリート工学，Vol.32，No.12，pp.5-14，1994.12.