

論文 粗骨材の寸法および配置がコンクリートの圧縮破壊挙動に及ぼす影響に関する研究

平岩 陸^{*1}・谷川恭雄^{*2}・森博嗣^{*3}・南部禎士^{*4}

要旨：本研究では、粘弾塑性サスペンション要素法を用いて、コンクリートの変形・破壊性状に与える粗骨材の寸法および配置の影響に関する基礎的な研究を行った。粗骨材面積比を一定とした場合の粗骨材径の影響については、2次元モデル供試体を用いた一軸圧縮試験を行い、それと同条件の解析による結果と比較した。さらに、粗骨材の寸法および配置の影響について数値解析を行い、配置による影響が比較的大きいという結果を得た。

キーワード：粘弾塑性解析、非連続体モデル、圧縮破壊挙動、粗骨材、応力-ひずみ関係

1. まえがき

筆者らはこれまでに粘弾塑性サスペンション要素法(VEPSEM)を用いて、硬化コンクリートの変形・破壊挙動のシミュレーションを行ってきた[1,2]。本解析手法では、コンクリートを粗骨材とマトリックスからなる二相材料として取り扱う非連続体モデルを用い、動的解析を行うため、計算量が比較的多くなり、粗骨材節点数が少ないモデルでしか解析が行えなかった。しかし、近年のコンピュータのハード面における発展により、多くの計算量の必要な解析が手軽に行えるようになりつつある。

本研究では、粗骨材節点の寸法および配置が

コンクリートの一軸圧縮変形・破壊性状に与える影響に関する基礎的な研究を行った。粗骨材断面積比を一定としたときの粗骨材径の影響に関しては、解析と同条件で、2次元モデル供試体を用いた一軸圧縮試験を行い、解析の再現性についても確認した。さらに、粗骨材節点の直径および配置を、ある範囲で任意に変化させた解析を行い、これらの要因がコンクリートの変形・破壊性状に与える影響を解析的に検討した。

2. 粗骨材径の影響

2.1 2次元モデル実験の概要

図-1に示すように、一軸圧縮試験用に、モ

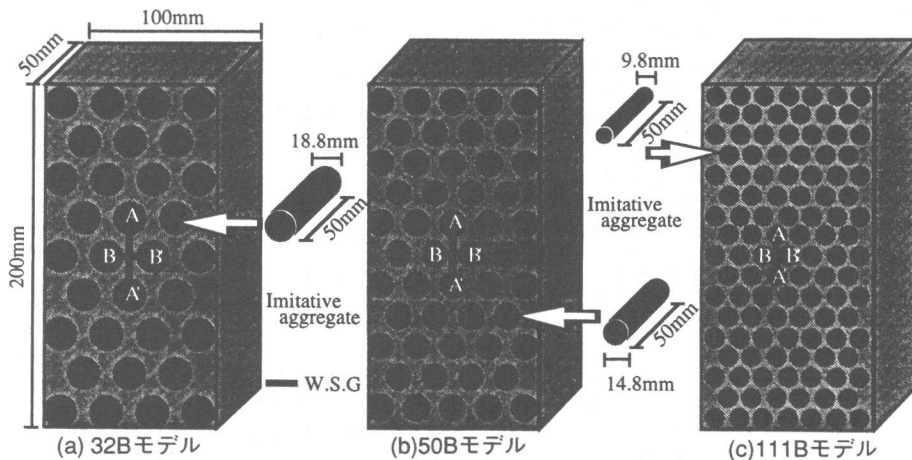


図-1 2次元モデル実験用供試体

- *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 工学研究科建築学専攻、工博 (正会員)
- *3 名古屋大学助教授 工学研究科建築学専攻、工博 (正会員)
- *4 名古屋大学大学院 工学研究科建築学専攻 (会員外)

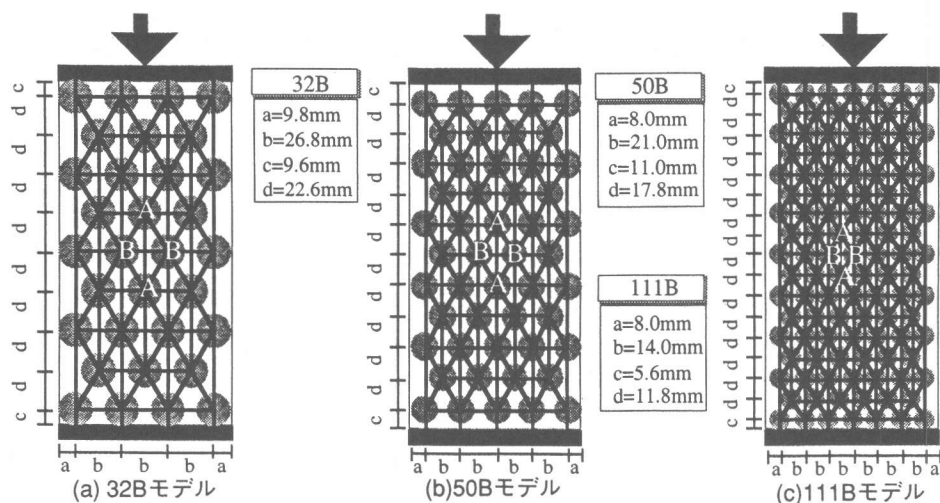


図-2 解析モデル

ルタル製の円柱形模擬粗骨材（以下、単に粗骨材と略記）を二次元に配置した二次元モデル供試体32Bモデル、50Bモデルおよび111Bモデルを、それぞれ3本ずつ計9本作製した。なお、供試体の厚さは、予備実験により比較的安定した結果が得られた50mmとした。粗骨材の寸法はそれぞれ $\phi 18.8 \times 50\text{mm}$ 、 $\phi 14.8 \times 50\text{mm}$ および $\phi 9.8 \times 50\text{mm}$ である。また、供試体断面に占める粗骨材面積の比を、各モデルとも同一のほぼ0.4とした。マトリックスおよび粗骨材に用いた各モルタルの調合を表-1に示す。なお、供試体お

よび粗骨材の作製方法、計測および載荷方法に関しては、既報[2]と同様である。ただし、載荷速度は0.8mm/sの一定としている。

2.2 解析の概要

上記の実験結果と比較・検討するために、VEPSEMを用いて、二次元応力下におけるコンクリートの一軸圧縮試験のシミュレーションを行った。本解析手法の詳細については、既報[1]を参照されたい。

解析モデルは、図-2に示すように、初期状態としてそれぞれ32、50および111個の粗骨材節点を二次元に配置した32Bモデル、50Bモデルおよび111Bモデルである。粗骨材節点の大きさ、形状および配置は、前述の実験における二次元モデル供試体と同一である。

本解析では、いずれの場合も時間刻みを 2.5×10^{-6} 秒とし、縦ひずみが0.5%に達するまでの変形挙動について計算を行った。解析に用いた入力データを表-2に示す。

2.3 実験結果と解析結果の比較

図-3は、各モデル供試体より実測された圧縮応力 σ_c -縦ひずみ ϵ_c 曲線と、各解析モデルより計算された圧縮応力 σ_c -縦ひずみ ϵ_c 曲線を比較したものである。なお、実験では、載荷軸方向の応力上昇域のひずみについては、ワイヤーストレインゲージ(W.S.G)による供試体中央部（図-1中A-A'間）のひずみを、応力下降域のひ

表-1 二次元モデル実験に用いたモルタルの調合

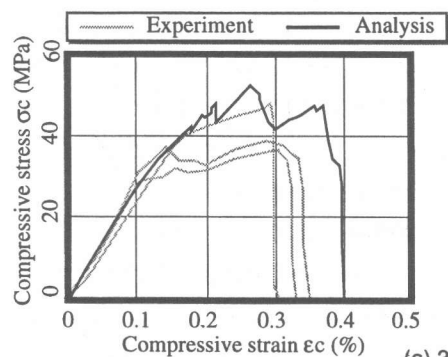
TYPE	W/C	W	C	S	HAE/C
Matrix mortar	0.50	345	690	1136	0.008
Ag25	0.25	287	1148	909	0.045

[Notes] Ag25: Imitative aggregate made of mortar
W/C: Water cement ratio, W: Water (kg/m^3),
C: Cement (kg/m^3), S: Sand (kg/m^3), HAE:
High-range water reducing AE agent

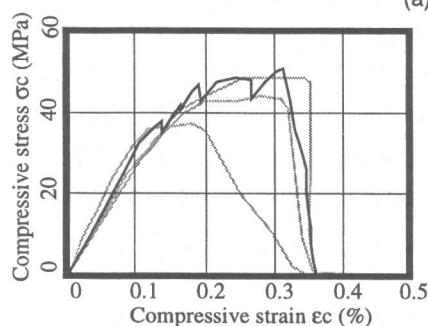
表-2 解析の入力データ

	$\tan\phi$	Ft	Em	η	v	d	H	D
32B-model	0.10	2.0	13	0.1	0.8	18.8	100	50
50B-model						14.8		
111B-model						9.8		

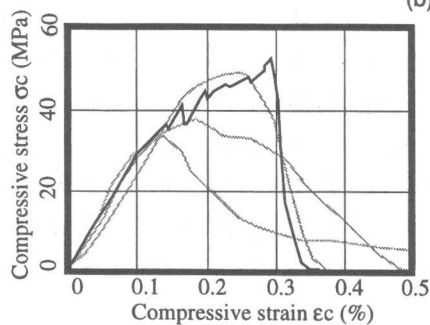
[Notes] ϕ : Angle of internal friction, Ftm: Pure tensile strength (MPa), Em: Elastic modulus (GPa), η : Viscosity ($\text{MPa}\cdot\text{s}$), v: Loading rate (mm/s), d: Diameter of aggregate (mm), H: Initial distance between loading boards (mm), D: Width of specimen (mm)



(a) 32Bモデル



(b) 50Bモデル



(c) 111Bモデル

図-3 圧縮応力 σ_c —縦ひずみ ϵ_c 曲線

ずみについては、変位計による全体ひずみ（載荷板間変位より算定）を用いており、解析結果もこれに準じて示した。

従来の実験では、富調合のコンクリートでは粗骨材の寸法が大きいと圧縮強度が低下すると報告されている[3]。しかし、今回の実験で用いた3種類の粗骨材の寸法差では、粗骨材寸法が圧縮強度に及ぼす顕著な影響は見られなかった。粗骨材寸法による圧縮強度の変化は、ブリーディングによって生じる粗骨材下部の弱化層の存在に起因するものと説明されているが、本実験では、2次元モデル供試体の打設を図-1の前面から行ったため、ブリーディングによって生じ

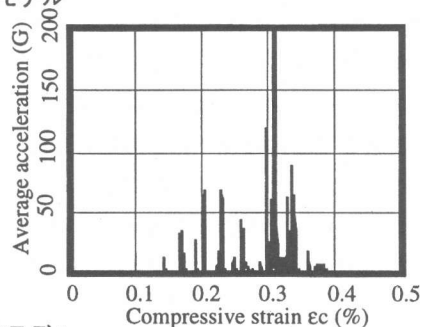
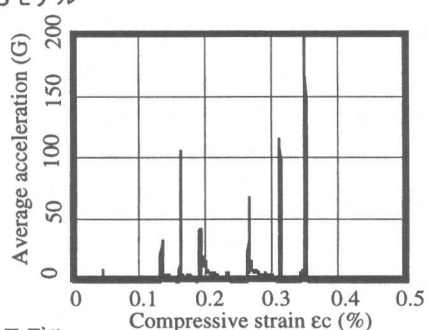
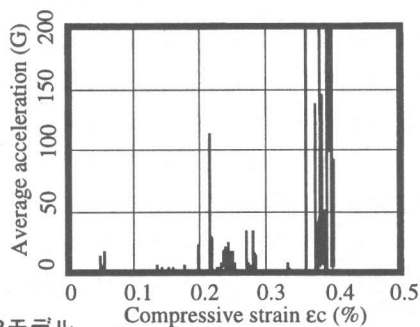


図-4 平均加速度—圧縮ひずみ ϵ_c 曲線

る粗骨材下部の弱化層が生じなかったものと思われる。また、破壊の際の弱点となる粗骨材界面部とモルタルマトリックスとの強度差が小さかったことも原因と考えられるが、本解析は界面の破壊を考慮していないので、モデル供試体の作製方法としては妥当であり、実験に対する解析の再現性は良好であったと考えられる。

一方、解析結果において3種類のモデルの強度差が小さかった原因は、以下のように考えられる。本解析では、粗骨材の直径に比例する断面を持つサスペンション要素により節点間の応力伝達を行うため、粗骨材の直径が小さくなれば要素断面が小さくなり破壊しやすくなる。一

方で、今回の3つの解析モデルは、粗骨材の直径と粗骨材節点間距離の比がほぼ2:1となっている。このため、粗骨材の直径が小さくなるほど粗骨材数が多くなり、それに従って要素数が多くなる。したがって、応力を伝達する要素の断面積が供試体全体ではほぼ等しくなるので、各モデル間の強度差が現れなかったものと考えられる。この条件では、粗骨材の直径と粗骨材節点間距離との比を同一にすれば、粗骨材の直径が強度に及ぼす影響はほとんど生じない。しかし、応力下降域における性状は、かなり異なった結果が得られているため、全体の破壊挙動に関しては今後さらに詳細な検討が必要であろう。

図-4は、図-2に示した各解析モデル中央部の粗骨材節点Bの加速度を各ひずみレベルで平均して示したもの(平均加速度-圧縮ひずみ ϵ_c 曲線)である。最大応力以前においては、平均加速度の発生頻度は32Bモデルが最も少なく、50Bモデル、111Bモデルの順に多くなっているが、発生している平均加速度の大きさは111Bモデルが最も小さい。これは、粗骨材が小さいモデルでは要素が小さいため要素の破壊頻度は高いが、破壊による衝撃は小さくなるためである。最大応力以後、応力が急激に低下するひずみレベルでは、各モデルとも多くの要素が瞬時に破壊されるため、大きな加速度が生じている。

3. 粗骨材粒径の不均等性の影響

3.1 解析の概要

図-2の各解析モデルのうち、32Bモデルおよび111Bモデルに対して、全粗骨材節点数の1/4にあたる数の任意の粗骨材の直径を10%大きくし、同数の任意の粗骨材の直径を10%小さくした解析モデルを3個ずつ作製して解析を行った。各モデルの一例を図-5に示す。なお、その他の入力データは表-2と同一である。

3.2 解析結果

図-6は、各解析モデルによる圧縮応力 σ_c -縦ひずみ ϵ_c 曲線であり、図-2の各解析モデル

の圧縮応力 σ_c -縦ひずみ ϵ_c 曲線も比較のため併示した。粗骨材数の多い111Bモデルの方が、応力下降域がやや緩やかになっている。これは、111Bモデルの方が各要素の断面が小さいため、粗骨材の直径の変化によって生じる強度の弱い要素の影響も相対的に小さくなり、破壊が徐々に進行することに起因するものと考えられる。32Bモデルでは、粗骨材の直径が均等な場合より、不均等な場合の方が強度が高く、応力下降域が脆性的になった。

図-7は、平均加速度-圧縮ひずみ ϵ_c 曲線の一例である(図-6中の矢印の結果に対応)。図-4(c)と同じく、111Bモデルの方が頻繁に小さい加速度が発生しており、内部の破壊が徐々に進行していることを示している。

4. 粗骨材配置の不均等性の影響

4.1 解析の概要

図-2の32Bモデルおよび111Bモデルに対して、全粗骨材節点数の1/4にあたる数の任意の粗骨材について、粗骨材節点間距離の1%に当たる距離を載荷軸方向に、同数の任意の粗骨材については載荷軸と垂直な方向に移動させた解析モデルを3つずつ用意して解析を行った。各モデルの一例を図-8に示す。なお、その他の入力データは表-2と同一である。

4.2 解析結果

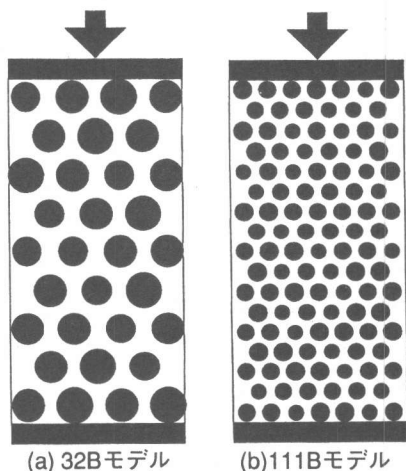


図-5 不均等な粗骨材径をもつ解析モデルの一例

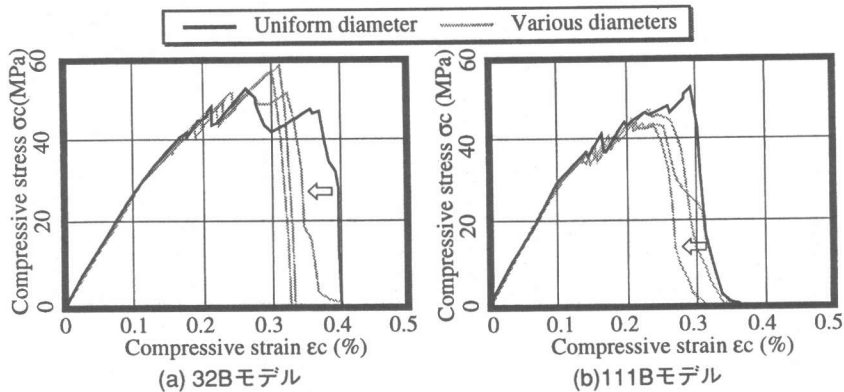


図-6 不均等な粗骨材径をもつ解析モデル
による圧縮応力 σ_c —圧縮ひずみ ϵ_c 曲線

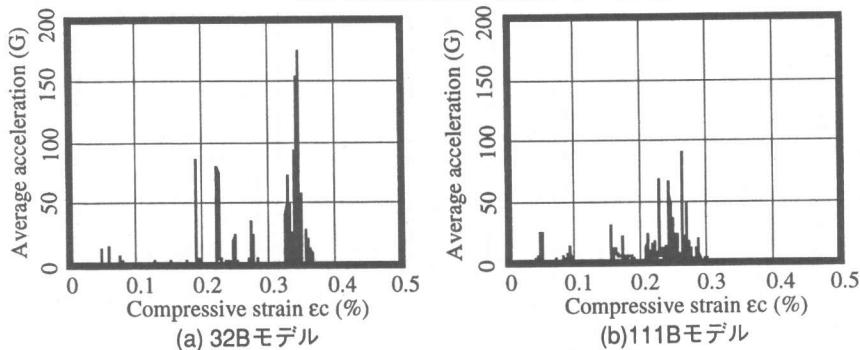


図-7 不均等な粗骨材径をもつ解析モデル
による平均加速度—圧縮ひずみ ϵ_c 曲線

図-9は、各解析モデルによる圧縮応力 σ_c —縦ひずみ ϵ_c 曲線である。粗骨材数の多い111Bモデルでは、応力下降域が緩やかになっている。また、図-6の(b)と比較すると、特に応力下降域において、粗骨材配置の影響が大きいことがわかる。本解析手法では、要素の圧縮破壊を考慮しておらず、純圧縮では破壊が生じない。このため、粗骨材配置が均等な場合には、載荷軸方向の要素が最大応力時まで全く破壊せず、最大応力時付近で他の要素が破壊し、急激に内部応力が不均質になると、載荷軸方向の要素がせん断破壊に至り、瞬時に抵抗力が失われる。一方、粗骨材配置が不均等な場合には、最大応力時以前から各要素が徐々に破壊に至るため、圧縮強度が低下し、応力下降域は緩やかになるものと考えられる。32Bモデルでは、要素数も少ないため、不均等な粗骨材配置の影響があまり現れず、比較的脆性的となる傾向は図-6の(a)と同様である。

図-10は、平均加速度-圧縮ひずみ ϵ_c 曲線である(図-9中の矢印の結果に対応)。32Bおよび111Bモデルともに、加速度の大きさおよび発生頻度は図-7の結果と類似しており、不均等な粗骨材径と、不均等な粗骨材配置の影響には、顕著な差が見られない。しかし、粗骨材径の影

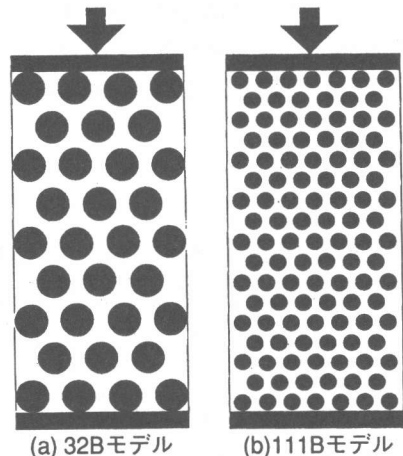


図-8 不均等な粗骨材配置をもつ
解析モデルの一例

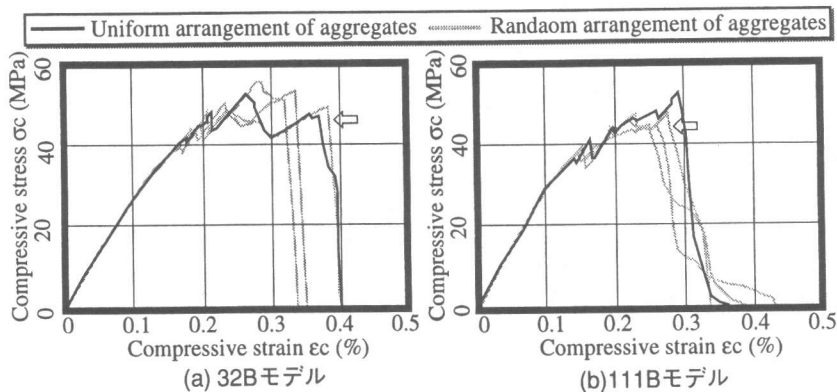


図-9 不均等な粗骨材配置をもつ解析モデルによる圧縮応力 σ_c —圧縮ひずみ ϵ_c 曲線

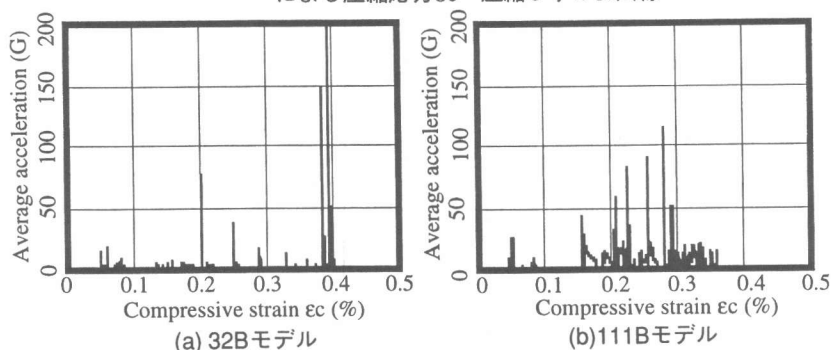


図-10 不均等な粗骨材配置をもつ解析モデルによる平均加速度—圧縮ひずみ ϵ_c 曲線

響を見るために設定したモデルでは、粗骨材の直径を20%の幅で変動させているのに対して、粗骨材配置の影響を見るために設定したモデルでは、配置を2%の幅で変動させた。図-5と図-8を比較すると、不均等な粒径のモデルの方が全体の不均等性は大きい。このことを考慮に入れると、本解析の範囲では、コンクリートの変形・破壊性状に及ぼす影響としては、粗骨材の配置（位置）の変動が支配的であると判断できる。

5. まとめ

本研究では、VEPSEM解析を用いて、コンクリートの一軸圧縮変形・破壊性状に与える粗骨材の寸法および配置の影響に関する基礎的な研究を行った。

以下に、得られた知見を示す。

- (1)粗骨材径と粗骨材節点間距離の比を同一とすれば、供試体全体の要素の断面積がほぼ等し

くなり、VEPSEM解析において、粗骨材径が強度に及ぼす影響は小さくなり、2次元モデル供試体を用いた実験結果でも同傾向を示した。

- (2)粗骨材の直径の不均等性よりも、配置の不均等性の方が圧縮応力—縦ひずみ曲線に与える影響が大きく、特に応力下降域の変動が顕著である。

【謝辞】

本研究の実施に際して、名古屋大学・黒川善幸助手、名古屋大学4年生・糸谷哲也君および川戸耕介君の助力を得た。また、本研究費の一部は、平成9年度文部省科学研究費補助金・基盤研究(B)によった。付記して謝意を表する。

【引用文献】

- [1]荒井正直・船見晃啓・黒川善幸・森博嗣・谷川恭雄：非連続体モデルを用いたコンクリートの破壊解析手法，日本建築学会構造系論文集，No.471，pp.1-9，1995.5
- [2]荒井正直・谷川恭雄・森博嗣・平岩陸・南部禎士：コンクリートの高速変形挙動に関する実験的・解析的研究，日本建築学会構造系論文集，No.494，pp.15-22，1997.4
- [3]小野ら：建築材料，理工図書，1989