

論文

[1042] コンクリートの圧縮強度に及ぼす試験機剛性の影響

正会員 友澤 史紀 (東京大学工学部)

正会員○野口 貴文 (東京大学工学部)

正会員 小野山 貫造 (東京大学大学院)

1. はじめに

高強度コンクリートの圧縮破壊は、通常のコンクリートに比べて脆性的であり、応力下降域のみならず上昇域においても、最大耐力点近傍でその挙動は不安定になると予想される。そのため、高強度コンクリートの圧縮強度は、通常のコンクリートよりも各種試験条件の影響を受け易いと考えられ、筆者らは、現行の圧縮強度試験方法 (JIS A 1108) の高強度コンクリートへの適用性について検討を行ってきた¹⁾。また、一般的な試験機 (最大秤量100t) で圧縮強度試験を行う場合、高強度であるほど最大耐力点は試験機の最大秤量に近づくため、通常のコンクリートでは問題とされなかった試験機の種類・性能が、コンクリートの圧縮強度に影響を及ぼす可能性が生じる。試験機の種類・性能に関する要因としては、制御方法、縦方向・横方向の剛性、加圧板・球座の寸法形状などが考えられるが、本研究では、試験機の縦方向剛性がコンクリートの圧縮強度試験結果に及ぼす影響に関して実験検討を行った。

2. 実験方法

実験は、2シリーズに分けて行ったが、使用材料は各シリーズ共通であり、表1に示す。コンクリートの調合を表2に示す。各シリーズとも、供試体は10φ×20cmのコンクリートシリンダーを用い、供試体数は一試験条件につき5本である。供試体は、実験まで標準水中養生を施した。また、養生期間中に各供試体の上端面には機械研磨を施し、実験直前には上下端面をカーボラダム300#で平滑に仕上げた。

1) シリーズI：異なる試験機3種類を用い、試験機の種類が圧縮強度試験結果に及ぼす影響について調べた。試験機付属の加圧板の影響を排除するため、供試体と試験機加圧板との間には同一の加圧板を挿入した。荷重の測定はロードセルにより行い、縦ひずみの測定は検長6cmのひずみゲージにより行った。実験は材令27~29日で行い、1日に1試験機5調合で実施した。

2) シリーズII：最大秤量200tの変位制御型試験機 (縦方向剛性635tf/cm) を用い、図1に示

すようにH型鋼 (SM58, 300×300mm) の曲げ剛性を利用して剛性を低下させることにより、試験機の

表1. 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント, ρ = 3.16
混和材	シリカヒューム, ρ = 2.1, 比表面積 210000cm ² /g
細骨材	天井川産川砂, ρ = 2.62, 吸水率 1.04%, F.M. = 2.90
粗骨材	青梅産硬質砂岩碎石, 最大寸法 20mm, ρ = 2.63, 吸水率 0.59%, F.M. = 6.71
混和剤	N社製高性能減水剤, N社製A/E補助剤

表2. コンクリートの調合

	調合名	W/C (%)	重 量 (kg/m ³)				
			水	セメント	シリカ	細骨材	粗骨材
I	I 25S	2.5	170	578	102	524	997
	I 25	2.5	170	680		524	997
	I 35	3.5	170	486		686	997
	I 45	4.5	170	378		778	997
	I 55	5.5	170	309		834	997
II	II 20S	2.0	170	722	128	266	1058
	II 25S	2.5	170	578	102	420	1058
	II 35	3.5	170	486		625	1058
	II 45	4.5	170	378		778	1058
	II 65	6.5	170	262		813	1058

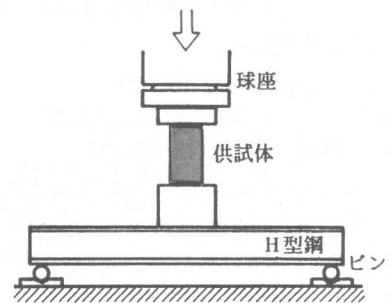


図1. 剛性低下試験法

縦方向剛性が圧縮強度試験結果に及ぼす影響について検討した。荷重の測定は試験機からの出力電圧(200mV/200t)により行い、縦ひずみおよび中央部横ひずみの測定は検長9cmのひずみゲージにより行った。実験は材令76~79日に1日1調合4剛性で実施した。載荷速度は、毎秒2~3kgf/cm²となるよう調整した。

また、試験機の縦方向剛性を図2に示す方法により実測した。すなわち、圧縮強度試験時と同一状態に試験機を設定し、オイルジャッキを挿入して上下加圧板間を押し広げ、荷重と加圧板間変位との関係から剛性を算出した。測定結果を表3に示す。

3. 実験結果

1) シリーズI

実験結果を表4に示す。図3に試験機剛性と試験機M400を基準にした圧縮強度比との関係を示す。剛性が低い場合(M100, 218tf/cm)に圧縮強度の低下が認められ、その傾向は高強度コンクリート(I 25S, I 25, I 35)において顕著である。図4に試験機剛性と圧縮強度の変動係数との関係を示す。剛性が低くなるほど変動係数は大きくなり、その傾向は、高強度コンクリート(I 25, I 35)において顕著である。また、試験機剛性の低下にともない最大応力時のひずみも低下するが、1/3割線弾性係数は試験機剛性の影響を受けない。

以上のようにコンクリートの圧縮破壊は、試験機剛性の影響を受けると考えられるが、シリーズIでは使用試験機が異なるため、圧縮強度低下の原因を試験機剛性に特定することはできず、同一試験機を用いた実験シリーズIIを実施した。

表4. 実験結果 (シリーズI)

試験機	圧縮強度 (kgf/cm ²) (標準偏差)					静弾性係数 (×10 ⁵ kgf/cm ²)					最大応力時のひずみ (×10 ⁻⁶)				
	I25S	I25	I35	I45	I55	I25S	I25	I35	I45	I55	I25S	I25	I35	I45	I55
M100	1130 (56)	889 (92)	554 (72)	472 (22)	410 (17)	4.09	4.08	3.78	3.51	3.26	3192	2448	1858	1851	1853
M200	1248 (24)	1035 (52)	715 (13)	523 (17)	434 (15)	4.01	4.12	3.53	3.45	3.39	3603	2911	2597	2216	2000
M400	1216 (44)	1036 (36)	694 (17)	503 (23)	423 (10)	4.12	4.12	3.88	3.56	3.42	3308	3021	2393	2019	1941

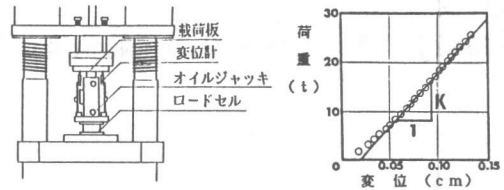


図2. 剛性実測方法

表3. 試験機の種類

シリーズ	試験機	最大秤量 (tf)	剛性 (tf/cm)
I	M100	100	218
	M200	200	513
	M400	400	577
II	H1	200	87
	H2	200	183
	H3	200	439
	H4	200	635

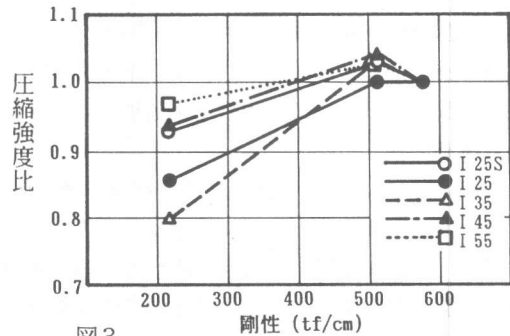


図3. 圧縮強度比に及ぼす剛性の影響(シリーズI)

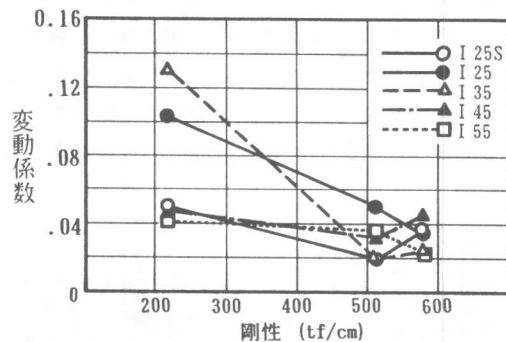


図4. 変動係数に及ぼす剛性の影響(シリーズI)

2) シリーズII

実験結果を表5に示す。表中の試験機「高剛性」の欄は、高フレーム剛性かつサーボ制御機構を有した試験機を用いて行った、同一コンクリートの材令56日の実験結果である。

図5に試験機剛性と圧縮強度試験結果（平均値、最大値、最小値）との関係を示す。通常強度のコンクリート（II 65）では、試験機剛性の影響はほとんどない。

しかしながら、高強度になるにつれて、試験機剛性の圧縮強度に及ぼす影響は顕著になる。調合II 35のコンクリートにおいて、圧縮強度の平均値は、試験機剛性がH2～高剛性（183tf/cm以上）の範囲では強度低下は認められないが、H1（87tf/cm）では約5%の強度低下を生じている。一方、最小値は、剛性 H2～H4（183～635tf/cm）の範囲で試験機剛性の低下にともない減少している。

調合II 25SおよびII 20Sに関しては、試験機剛性の低下にともない圧縮強度の平均値は明らかに低下する（高剛性に対してH1で約12%）。また、最大値がそれほど低下していないにもかかわらず、最小値の低下が著しい（高剛性に対するH1をみると、調合II 20Sで約16%、調合II 25Sで約28%）。

図6に試験機剛性と圧縮強度の変動係数との関係を示す。シリーズIと同様に、試験機剛性の低下にともない変動係数は大きくなり、その傾向は高強度コンクリートほど顕著である。このことは図5に示すように、試験機剛性の低下にともない、また高強度になるにともない圧縮強度の最大値と最小値の差が広がることから伺える。

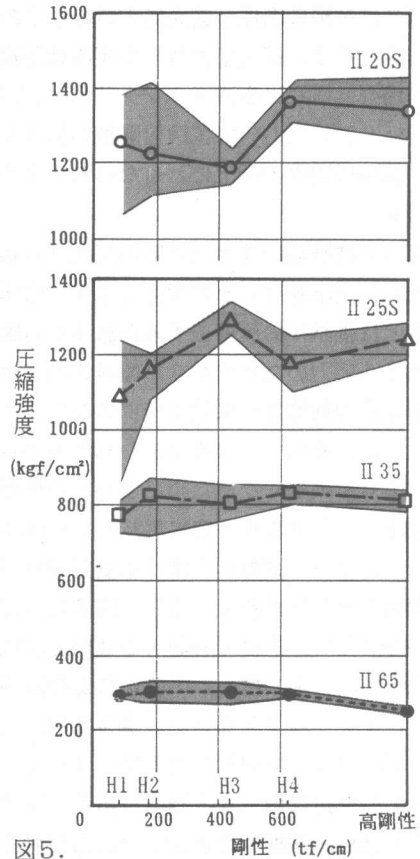


図5. 圧縮強度に及ぼす剛性の影響(シリーズII)

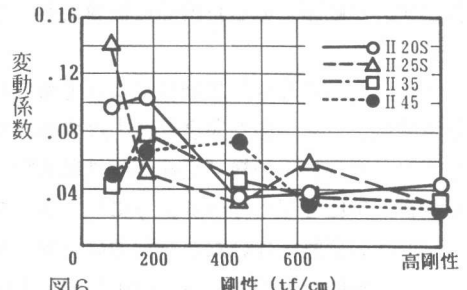


図6. 変動係数に及ぼす剛性の影響(シリーズII)

表5. 実験結果 (シリーズII)

試験機	圧縮強度 (kgf/cm ²) (標準偏差)				静弾性係数 (×10 ⁵ kgf/cm ²)				最大応力時のひずみ (×10 ⁻⁶)				臨界応力比			
	II20S	II25S	II35	II65	II20S	II25S	II35	II65	II20S	II25S	II35	II65	II20S	II25S	II35	II65
H1	1253 (122)	1088 (154)	768 (32)	298 (15)	4.31	4.08	4.10	3.28	3134	2753	2247	1746	97.2	96.9	92.7	84.7
H2	1224 (127)	1164 (60)	821 (64)	300 (20)	4.44	4.27	4.11	3.12	2912	2872	2640	1656	97.5	93.4	86.2	86.1
H3	1185 (40)	1285 (40)	800 (37)	300 (22)	4.47	4.07	4.03	3.20	2842	3278	2395	1573	88.0	91.6	92.2	84.9
H4	1360 (50)	1172 (68)	828 (26)	298 (9)	4.43	4.04	4.02	3.17	3251	3133	2485	1674	88.8	94.4	93.3	87.8
高剛性 (56日)	1342 (59)	1244 (36)	806 (22)	253 (8)	4.48	4.26	4.01	2.90	3332	3282	2635	1882	-	-	-	-

図7に試験機剛性と最大応力時のひずみとの関係を示す。最大応力時のひずみは圧縮強度の場合と同様に高強度コンクリート(II 20S, II 25S, II 35)において試験機剛性の影響を受け、試験機剛性の低下にともない減少する傾向にある。

図8に試験機剛性と臨界応力度比(=臨界応力度/圧縮強度)との関係を示す。臨界応力度とは供試体の体積ひずみが減少から膨張に転じる応力のことであり、臨界応力度以上の圧縮応力状態では供試体内部のひずみエネルギーが、必要とされるひびわれ解放エネルギーよりも大きくなるためひびわれの伝播速度は増大し、荷重を一定に保持しても崩壊に至ることから、臨界応力度は不安定破壊伝播の開始点とも呼ばれている²⁾。図8に示されているように、調合II 35およびII 65では試験機剛性と臨界応力度比との間に特定の関係を見いだすことはできないが、調合II 20SおよびII 25Sでは、試験機剛性の低下にともない、臨界応力度比は増加する傾向にある。図9に調合II 20S, 試験機H2およびH4の応力ひずみ曲線を示すが、試験機剛性が低い場合(H2), 体積ひずみが膨張に転じた瞬間に破壊に至っている。

また、図10に高剛性試験機によって得られた下降域までも含めた完全な応力ひずみ曲線を示す。高剛性試験機で圧縮強度試験を行った場合、神田も述べているように³⁾、ポップアウト状の剥離を伴いながら応力は上昇していき、一時的な耐力の低下(図中矢印)と応力の再配分が生じた後、再び応力が上昇する場合がある。しかしながら、一般的に使用されている低剛性試験機では、载荷中に試験機に多大なエネルギーが蓄積されており、剥離などにより一旦供試体の耐力低下が生じると、蓄積されたエネルギーが流入し供試体を破壊に至らしめるため、供試体本来の最大耐力に達する前に、応力上昇域で破壊してしまうものと考えられる。

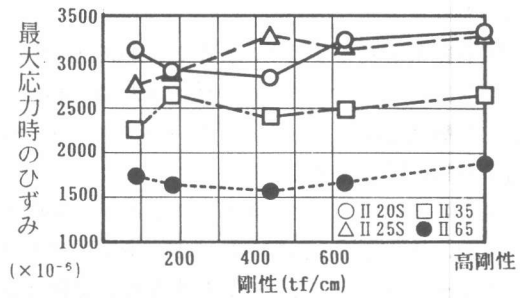


図7. 最大応力時のひずみに及ぼす剛性の影響 (シリーズII)

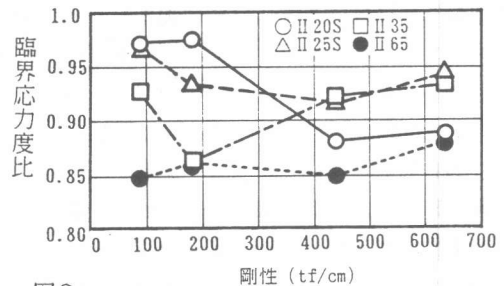


図8. 臨界応力度比に及ぼす剛性の影響 (シリーズII)

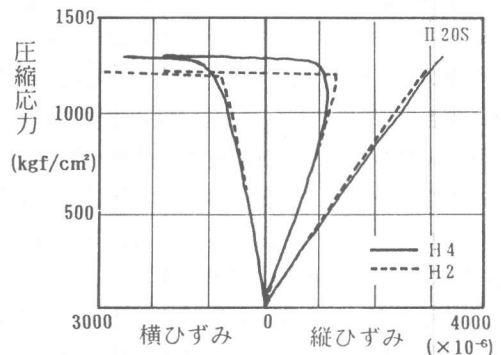


図9. 応力ひずみ曲線に及ぼす剛性の影響

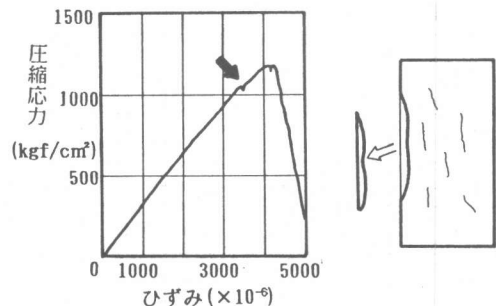


図10. 高剛性試験機による応力ひずみ曲線

4. 考察

本実験の結果、試験機の縦方向剛性が圧縮強度試験結果に影響を及ぼすことが認められた。

既往の研究によれば、Sigvaldason⁴⁾は圧縮強度約300kgf/cm²のコンクリートを用いて、縦方向剛性の異なる試験機2種類（剛性約3600tf/cmおよび約180tf/cm）により圧縮強度試験を行い、差が認められないことから、試験機の縦方向剛性は圧縮強度に影響を及ぼさないと結論している。本実験でも、調査Ⅱ65においては試験機剛性の影響は認められず、Sigvaldasonの結果と一致する。しかし、Glucklichら⁵⁾は圧縮強度約90kgf/cm²の石膏硬化体を用いて、スプリング（剛性1tf/cm）により剛性を低下させた試験機により圧縮強度試験を行い、約30%もの強度低下が生じたと報告している。このように、試験機剛性の圧縮強度に及ぼす影響に関しては、統一的な見解はなく、供試体の組成ならびに破壊機構までもを含めた総合的な考察を行わなければならない。

本研究では、破壊の進展に伴うエネルギーの消費と流入という破壊力学的観点に立ち、町田の著書⁶⁾に従い、供試体のみならず試験機の剛性までも含めた載荷系の安定性に基づいて、試験機剛性の圧縮強度に及ぼす影響について論じる。

図11に示すように、損傷aを有する供試体に加える荷重Pまたは変形を増大させていく場合、損傷の微小な増大 Δa を考えると、(1)式が成立すれば損傷形成に必要なエネルギーは供給されるエネルギーを上回り、損傷はエネルギー的に安定な状態にある（右図中の点O）。

$$\left(\frac{\partial W'_{app}}{\partial a} \right)_{u_T} < \frac{dW'_{mat}}{da} \quad (1)$$

ここで、 W'_{app} ：単位損傷の形成により系から供給されるエネルギー
 W'_{mat} ：単位損傷を形成するのに必要なエネルギー
 a ：供試体に生じている損傷
 u_T ：系全体の変位

この条件下で損傷を増大させるためには、系全体の変位 u_T を変化させ、すなわち荷重Pを増大させ W'_{app} を高める必要がある。その場合、(2)式のエネルギー平衡を保ちつつ損傷は安定成長を継続する（右図中の経路O→B）。

$$W'_{app}(a, P) = W'_{mat}(\Delta a) \quad (2)$$

ここで、P：荷重
 Δa ：損傷の微小な増大

しかし、損傷の安定成長段階において

$$\left(\frac{\partial W'_{app}}{\partial a} \right)_{u_T} = \frac{dW'_{mat}}{da} \quad \text{AND} \quad \left(\frac{\partial^2 W'_{app}}{\partial a^2} \right)_{u_T} > \frac{d^2 W'_{mat}}{da^2} \quad (3)$$

となると、系から供給されるエネルギーが損傷形成に必要なエネルギーを上回り、損傷は不安定

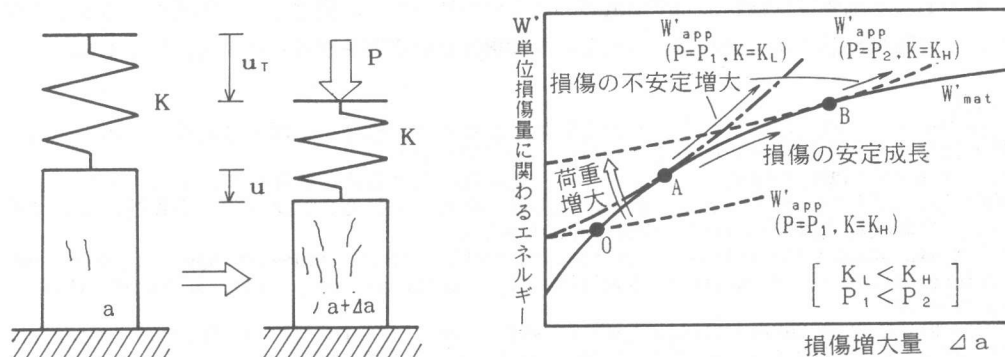
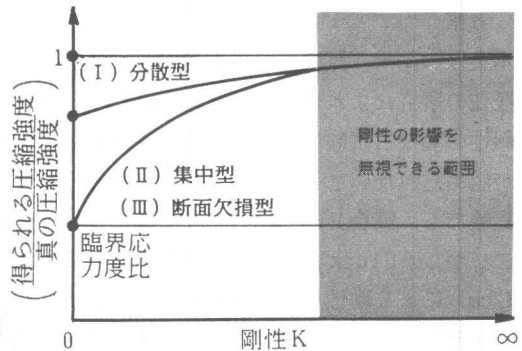
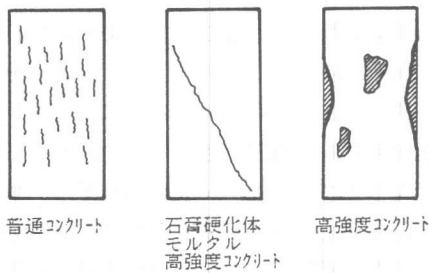


図11. 圧縮強度に及ぼす剛性の影響に関する概念図



(I) 分散型 (II) 集中型 (III) 断面欠損型

図12. 供試体の組成の影響に関する概念図

な増大を開始する (右図中の点B)。

系全体の変位 u_T は、荷重 P 、供試体変位 u および試験機剛性 K と(4)式のような関係にあり、 W' と u は、損傷量 a および荷重 P の関数であると考えられるため(5)式が成立する。

$$u_T = P/K + u \quad (4)$$

$$dW'_{app} = \left(\frac{\partial W'_{app}}{\partial a} \right)_P da + \left(\frac{\partial W'_{app}}{\partial P} \right)_a dP \quad (5)$$

損傷の微小な増大においては、系全体の変位 u_T は一定とみなせるため、(6)式が成立する。

$$du_T = \frac{dP}{K} + \left(\frac{\partial u}{\partial a} \right)_P da + \left(\frac{\partial u}{\partial P} \right)_a dP = 0 \quad (6)$$

したがって、(5)式および(6)式より、 $(\partial W'_{app}/\partial a)_{u_T}$ は(7)式のように表される。

$$\left(\frac{\partial W'_{app}}{\partial a} \right)_{u_T} = \left(\frac{\partial W'_{app}}{\partial a} \right)_P - \left(\frac{\partial W'_{app}}{\partial P} \right)_a \left(\frac{\partial u}{\partial a} \right)_P \left[\frac{1}{K} + \left(\frac{\partial u}{\partial P} \right)_a \right]^{-1} \quad (7)$$

(7)式より、剛性 K が低下すると $(\partial W'_{app}/\partial a)_{u_T}$ は増大し、損傷の不安定増大を生じやすくなる。すなわち、図11の右図に示すように、低剛性試験機(K_L)で供試体を圧縮した場合、荷重 P_1 において点Aで損傷の不安定増大が生じ破壊に至るが、高剛性試験機(K_H)の場合、荷重 P_1 では損傷を増大させるにはさらに負荷荷重を必要とし、荷重 P_2 において点Bで破壊に至る。

5. まとめ

本研究の結果、試験機の縦方向剛性はコンクリートの圧縮強度試験結果に影響を及ぼし、その程度は高強度になるほど顕著であることが明らかとなった。図12に示すように、コンクリートの破壊形態は(I)分散型(II)集中型(III)断面欠損型に分類され、(I)型の場合、試験機剛性の影響は小さいが、(II)(III)型の場合、試験機剛性は圧縮強度に影響を及ぼし、剛性を低下させていくと、得られる圧縮強度は臨界応力度に近づくことが予想される。実用上は、圧縮強度の低下を生じず、かつ破壊形態による差が認められない試験機剛性の範囲を明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) 友澤史紀ほか：高強度コンクリートの圧縮強度試験方法の標準化に関する研究(その1~3)、日本建築学会大会学術講演梗概集A、1989、pp.505~510
- 2) W.F.Chen(色部誠ほか監訳)：コンクリート構造物の塑性解析、昭和60年、丸善、p.22
- 3) 神田 亨、山田 守：セメント量、混和剤添加量を抑えた高強度コンクリートの物性、コンクリート工学年次論文報告集 11-1、1989、pp.277~282
- 4) O.T.Sigvaldason: The influence of testing machine characteristics upon the cube and cylinder strength of concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.18, No.57, 1966, pp.197~206
- 5) J.Glucklich, L.J.Cohen: Strain-Energy and Size Effects in a Brittle Material, MATERIALS RESEARCH & STANDARDS, ASTM, Vol.8, Oct. 1968, pp.17~22
- 6) 町田 進：延性破壊力学、昭和59年、日刊工業新聞社、pp.141~143