

論文 コンクリートの圧縮強度と静弾性係数に及ぼす円柱供試体の高さ直径比の影響

守屋 健一^{*1}・因幡 芳樹^{*2}・田山 隆文^{*3}・嵩 英雄^{*4}

要旨：構造体コンクリートのコア供試体の圧縮強度と静弾性係数に及ぼす供試体の打込み方向、乾湿と高さ直径比 H/D の影響を明らかにすることを目的として実験を行った。 H/D の低下に伴う圧縮強度比の増加は既往の報告より少なく、 H/D が 0.5~0.75 に低下しても圧縮強度比は 1.5 倍程度であった。また、乾試験によって構造体のコンクリート強度を評価する場合は、コア供試体の H/D による補正だけでなく乾試験による増大を補正する必要があったが、静弾性係数は H/D の低下による影響は少ないことを確認した。

キーワード：圧縮強度、静弾性係数、打込み方向、高さ直径比、乾試験、湿試験

1. はじめに

既存構造物から採取したコア供試体の強度試験に関する JIS A 1107 (コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法) では、高さ直径比 (以下 H/D と略) を 1.0 以上としている。 H/D が 1.90 未満の場合には H/D が 2.00 の強度に換算する補正係数を H/D が 2.00~1.00 の範囲で定めているが、 H/D の 1.0 未満についての強度補正係数がない。試験時の供試体の乾湿については、JIS A 1107 の 1989 年版まで 40~48 時間水中浸漬 (湿試験) が標準であった。1993 年版以降は乾・湿試験のいずれも可とされているが、供試体の乾湿の違いによる影響を圧縮強度の差異について考慮していない。静弾性係数については、JIS A 1149 (コンクリートの静弾性係数の試験方法) で供試体の H/D が 2.00 の円柱供試体またはコア供試体と規定しており、 H/D による補正を考慮していない。

円柱供試体の H/D による強度補正係数については高強度領域を対象とした、野口ら¹⁾、片寄ら²⁾、渡邊ら³⁾などの報告があるが、普通強度領域の研究は小口径コアに関する若林ら⁴⁾の報告、打込み方向と H/D に関する筆者ら⁵⁾の報告がある程度であり、供試体の乾湿と H/D の関係に関する報告はない。また、静弾性係数に及ぼす H/D の影響に関する研究は少なく、高強度を対象とした野口ら¹⁾、四戸ら⁶⁾、最知ら⁷⁾の報告がある程度である。

本論文は、荒木ら⁸⁾の報告などのように既存構造物から採取したコア供試体の強度が 10N/mm^2 以下となる場合があり、低強度域から普通強度域のコンクリートの圧縮強度と静弾性係数に及ぼす供試体の打込み方向、乾湿と高さ直径比 H/D の影響を把握することを目的とした。

なお、本論文は筆者らが日本建築学会大会学術講演梗概集に投稿した速報⁹⁾に考察を加筆したものである。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と水準

実験の要因と水準を表-1 に示す。水セメント比は、低強度域から普通強度域の範囲を想定しており、50・65・75%の3水準とした。供試体は、 $\phi 100\text{mm}$ 円柱供試体を用い打込み方向を縦打ちと横打ちの2水準、 H/D を 2.00 から 0.50 の7水準、供試体の養生を標準水中養生と 28 日まで標準養生後 20°C 気中養生の2水準、試験時の供試体の乾湿を湿潤と乾燥の2水準とした。高さ直径比の実験の試験は、建築基準法施工令では材齢 91 日コア強度が設計基準強度以上と規定していることから、材齢 91 日で圧縮強度と静弾性係数を特性値として実施した。

2.2 コンクリートの使用材料と調合

セメントは普通ポルトランドセメントを3銘柄等量混合 (密度 3.16g/cm^3 , 比表面積 $3,305\text{cm}^2/\text{g}$) とし、細骨材は君津産山砂 (表乾密度 2.64g/cm^3 , 吸水率 1.46%) と上里産陸砂 (表乾密度 2.60g/cm^3 , 吸水率 1.86%) の容積比 7:3 の混合品、粗骨材は青梅産硬質砂岩砕石 2005 (表乾密度 2.70g/cm^3 , 吸水率 0.70%)、練混ぜ水は上水道水、化学混和剤はリグニンスルホン酸塩系の AE 減水剤標準形を使用した。

表-1 実験の要因と水準

要因	水準						
	1	2	3	4	5	6	7
水セメント比 (%)	50	65	75	-	-	-	-
打込み方向	縦	横	-	-	-	-	-
試験時の乾湿	乾燥	湿潤	-	-	-	-	-
高さ直径比 (H/D) ^{*1}	2.00	1.75	1.50	1.25	1.00	0.75	0.50
ひずみ検長 (mm)	100	80	60	-	-	-	-

*1 : $H/D2.00 \cdot 1.75$ は検長 100mm, $H/D1.25 \cdot 1.00 \cdot 0.75$ は検長 60mm で試験, $H/D1.50$ は検長 $100 \cdot 80 \cdot 60\text{mm}$ で試験。

*1 (株) フローリック 開発部 修士 (工学) (正会員)

*2 (株) フローリック 開発部 部長 博士 (工学) (正会員)

*3 (社) 建築研究振興協会 (正会員)

*4 (社) 建築研究振興協会 技術顧問 博士 (工学) (正会員)

調合は、目標スランプ 18.0cm、目標空気量 4.5%とし、
 試し練りによって表-2 に示すように計画調合を定めた。

2.3 供試体の成形および養生

(1) 供試体の成形

コンクリートは、室温 20℃の恒温室で 20℃に調整した材料を使用して、強制 2 軸ミキサで 1 調合 100ℓとして練混ぜ、スランプ、空気量、コンクリート温度を試験した後、縦打ち円柱供試体と横打ち円柱供試体を成形した。

縦打ち円柱供試体は、φ100×200mm の鋼製型枠を使用し、高さ 200mm、175+5mm、150+5mm、125+5mm、100+5mm (+5mm は研磨しろ) として成形した。打込みは 2 層とし、各層 8 回棒突きし木槌で型枠を軽打して締め固めた。横打ち円柱供試体は、写真-1 に示す φ100mm の横打ち鋼製型枠を使用し、型枠上部まで 1 層目の試料を詰め 8 回棒突きし型枠を揺動して締め固めた後、沈下した分の試料を追加して再度 8 回棒突きし、型枠を木槌で軽打して締め固めた。

(2) 供試体の養生

成形後の供試体は温度 20℃の恒温室で養生し、成形の翌日に脱型し、温度 20℃の標準水中養生を行った。標準養生供試体は、材齢 7、28、91 日の試験材齢まで水中養生し、標準養生後気中養生の供試体は、材齢 28 日まで水中養生した後、温度 20℃、湿度 60%の恒温恒湿室で気中養生した。

(3) 供試体の切断および研磨

供試体は、標準養生中の材齢 14 日以降に図-1 および図-2 に示す寸法に切断・研磨を行った。

2.4 試験方法

(1) 圧縮強度の試験

標準養生供試体の圧縮強度は、材齢 7、28、91 日で縦打ちの H/D が 2.0 の供試体について湿潤状態で試験し、標準養生後気中養生供試体の圧縮強度は、縦打ち・横打ち共に材齢 91 日で乾燥状態（乾試験）と湿潤状態（湿試験）で試験した。なお、湿潤状態の供試体は、材齢 89 日から水温 20℃にて 40~48 時間浸漬して湿試験を行った。圧縮試験には 2000 kN の油圧式圧縮試験機を使用し、最大荷重の約 60%まで 0.6N/mm²/sec の載荷速度で自動制御で載荷した後、手動で切り換えて最大荷重を越えて最大荷重の 90%程度に低下するまで載荷した後に除荷した。なお、試験は各 3 本の供試体で行った。

(2) 静弾性係数の試験

静弾性係数は、圧縮強度試験時にひずみゲージ変換器を取付けたコンプレッソメーターで縦ひずみを計測して、応力-ひずみ曲線を記録し、最大荷重の 1/3 の応力における割線静弾性係数を求め、JIS A1149 に準じて算定した。縦ひずみ検出の検長は供試体の H/D に応じて 100 mm、80 mm および 60 mm とし、H/D1.5 の供試体では、3 種類の検長で縦ひずみを検出した。なお、試験は各 3 本の供試体で行った。

(3) 含水率の試験

JIS A 1107 では、試験時の供試体の乾湿については、JIS A 1107 の 1989 年版まで 40~48 時間水中浸漬（湿試験）が標準であったが、1993 年版以降は乾・湿試験のいずれも可とされている。供試体の乾湿を把握する為に、含水率を試験後の供試体で 48 時間、温度 110℃で絶乾質量を測定して求めた。試験は、W/C65 は標準養生と横打ち供試体で乾・湿試験と H/D の変化について測定し、W/C50 と W/C75 は、H/D が 2.0 の供試体で標準養生と横打ち供試体で乾・湿試験の含水率を測定した。



写真-1 φ100mm 横打ち鋼製型枠と供試体

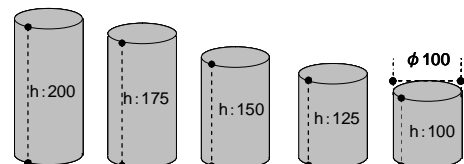


図-1 縦打ち供試体の H/D

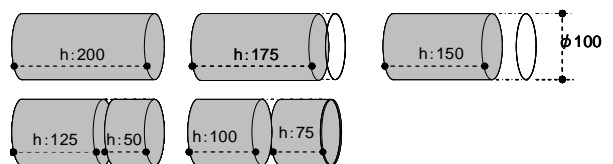


図-2 横打ち供試体の H/D と切断方法

表-2 コンクリートの調合・フレッシュ試験結果および標準養生供試体の圧縮強度および静弾性係数

記号	目標 空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				フレッシュ試験結果			圧縮強度*2 (N/mm ²)			静弾性係数*2 (kN/mm ²)	
				W	C	S	G	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	7 日	28 日	91 日	28 日	91 日
W/C50	4.5	50.0	46.0	176	352	807	975	17.3	4.5	20.0	35.4	46.0	54.4	31.2	34.6
W/C65	4.5	65.0	48.5	173	266	891	969	17.0	4.7	20.0	20.8	29.9	34.8	28.5	31.6
W/C75	4.5	75.0	49.4	173	231	920	969	17.0	4.8	20.0	18.9	22.3	25.8	27.5	27.0

*2 供試体は H/D2.00 で標準養生

3. 実験結果

3.1 供試体の含水率

110℃で48時間乾燥後に求めた含水率は図-3に示す通りであり、H/Dによる差は認められなかった。H/Dが2.0の供試体の試験時の含水率は乾試験で3.2~3.6%、湿試験で4.8~5.9%であり、乾試験時の含水率はW/Cが大きくなると小さくなった。一方湿試験はW/C増大に従い含水率は大きくなった。乾試験に比べ湿試験時の含水率は、W/C50で1.4倍、W/C65で1.5倍、W/C75で1.8倍となった。

3.2 圧縮強度

(1) 標準養生

標準養生の供試体の圧縮強度の結果を表-2に示す。圧縮強度は、W/Cが小さくなるに従い大きくなり、材齢91日まではいずれのW/Cにおいても増加傾向にあった。

(2) 打込み方向・乾湿・H/Dの異なる供試体

W/C・打込み方向・乾湿・H/Dの異なる供試体の材齢91日の圧縮強度の試験結果を図-4に示した。H/Dが2.0の供試体の圧縮強度は、縦打ちの方が横打ちより大きくなり、湿試験より乾試験の方が大きくなった。H/Dの低下に伴う圧縮強度の変化は、乾・湿試験ともにH/Dが2.00~1.00の範囲ではH/Dの低下に伴う強度増加は少なく、H/Dが1.00~0.50の範囲ではH/Dの低下に伴い強度増加傾向を示した。

3.3 静弾性係数

(1) 応力ひずみ度曲線に及ぼす縦ひずみ検長の影響

H/Dが1.5の供試体で、検長を100mm、80mm、60mmに変化させて測定した応力ひずみ度曲線の比較を図-5に示す。W/Cおよび供試体の打込み方法に関わらず、圧縮強度の50%の応力までは検長の違いによる応力ひずみ度曲線の差異は認められなかった。

(2) 応力ひずみ曲線に及ぼす供試体H/Dと乾湿の関係

打込み方向と供試体の乾湿別に応力ひずみ度曲線の比較を図-6に示す。供試体の打込み方向、乾湿ともにH/Dの低下に伴って圧縮強度が増大するが、圧縮強度の50%程度までの応力上昇域ではH/Dの低下による応力ひずみ度曲線の差異は認められなかった。また、H/Dの低

下に伴って最大応力時のひずみが増加し、応力下降域の曲線の負勾配が緩やかになる傾向が認められた。これは、SanghaとDhirら¹²⁾のH/Dを1.0~3.0まで変えた応力ひずみ度曲線の報告とBazantの報告¹³⁾と一致している。

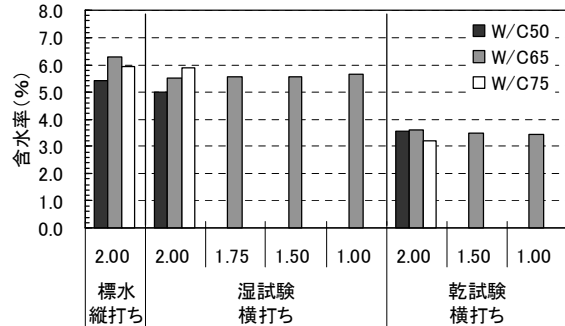


図-3 試験時の供試体の含水率

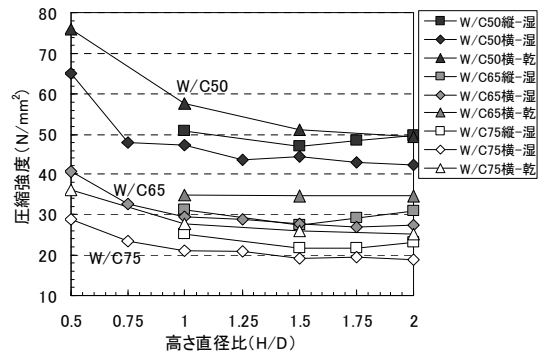


図-4 供試体の打込み方向、乾湿および高さ直径比H/Dと圧縮強度の関係(材齢91日)

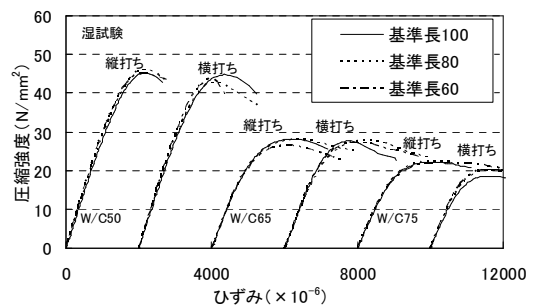


図-5 縦ひずみ検長と応力ひずみの関係 (H/D: 1.5)

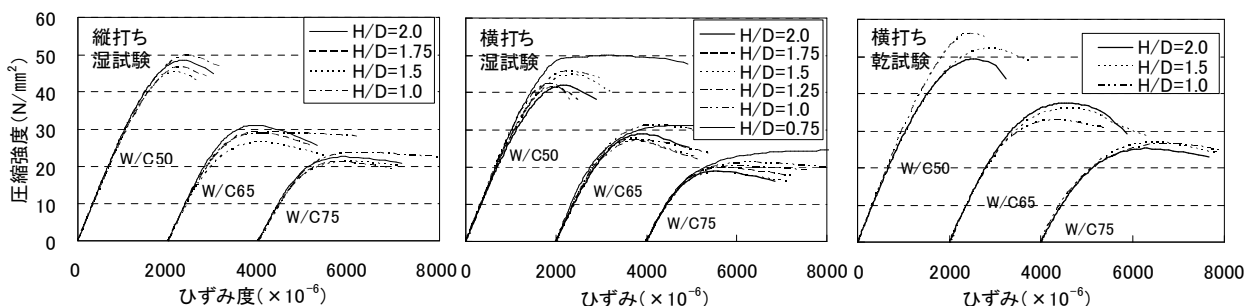


図-6 供試体の打込み方向・乾湿試験およびH/Dによる応力ひずみ曲線の比較

(3) 圧縮強度の 1/3 応力時の縦ひずみ

静弾性係数を算出する際に用いる圧縮強度の 1/3 の応力時の縦ひずみの比較を W/C 別に図-7 に示す。W/C の増加に伴い縦ひずみは減少し、ばらつきはあるが H/D の低下に伴い縦ひずみが増加する傾向となり、乾試験の縦ひずみは湿試験より大きくなる傾向が認められた。

(4) 静弾性係数に及ぼす打込み方向・H/D・乾湿の影響

静弾性係数と H/D の関係を W/C ごとに図-8 に示す。なお、H/D が 1.5 の供試体の静弾性係数は検長 100mm の縦ひずみによる算定値を用いた。応力ひずみ曲線が圧縮強度の 50%程度までの応力度の範囲では同一であり、W/C50 と W/C65 の供試体の静弾性係数は、供試体の打込み方向および乾湿によってほとんど影響されなかった。W/C75 の供試体では H/D の減少に伴って供試体の乾湿の影響が大きくなり、H/D が 1.0 では乾試験の方が湿試験より 10%程度大きくなった。

4. 実験の考察

4.1 圧縮強度比に及ぼす供試体の高さ直径比の関係

H/D が 2.00 の圧縮強度を基準とした圧縮強度比と H/D の関係を、供試体の打込み方向と乾湿の条件ごとに図-9 に示した。縦打ちで湿試験の圧縮強度比は、H/D の低下に伴って減少し H/D が 1.50 のときに極小となり約 0.9 となった。これは、H/D が 2.00 の供試体はブリーディングの影響が少なくなるのに対し、H/D が 1.0 と 1.5 の供試体は、骨材の下面や供試体の上場のブリーディングなどが影響し強度が低くなると考えられる。しかし、H/D が 1.0 の供試体は、ブリーディングによる強度低下より H/D の低下による強度増加の方が大きく、強度比が 1.05 程度となったと考えられる。この傾向は、渡邊ら³⁾ 玉井ら⁵⁾ Murdock と Kesler¹⁰⁾ の報告とほぼ一致している。横打ちの供試体では、ブリーディングの影響が少なく、H/D の影響による強度の増加により、乾・湿試験ともに、H/D の低下に伴って強度比が増加傾向となった。

4.2 H/D と圧縮強度の補正係数

JIS A 1107 の 1950 年、1964~1993 年および 2002 年以降の H/D による圧縮強度の補正係数と本実験にて得られた乾湿それぞれの補正係数を表-3 に示し、打

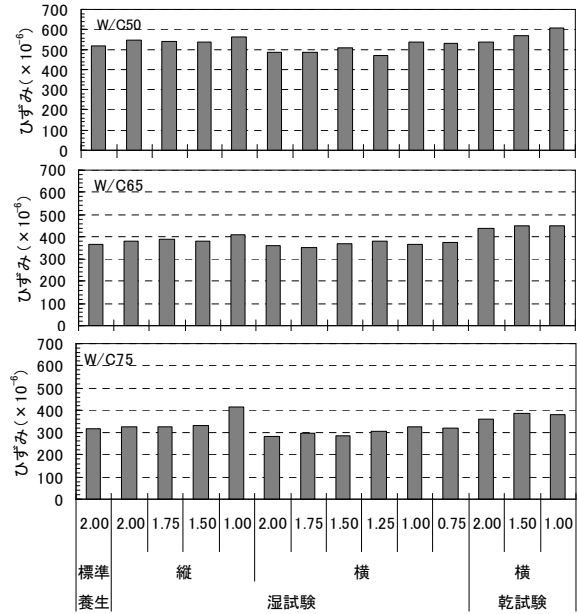


図-7 圧縮強度の 1/3 応力時の縦ひずみの比較

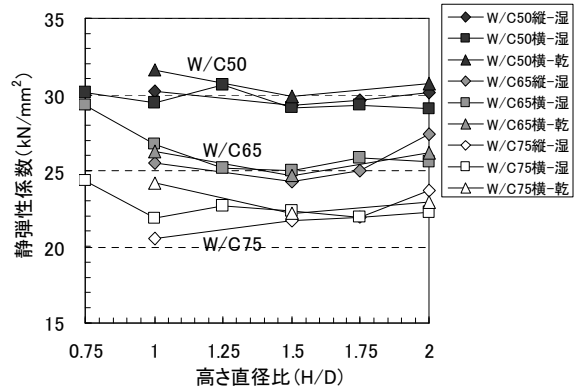


図-8 供試体の打込み方向、乾湿および高さ直径比 H/D と静弾性係数の関係

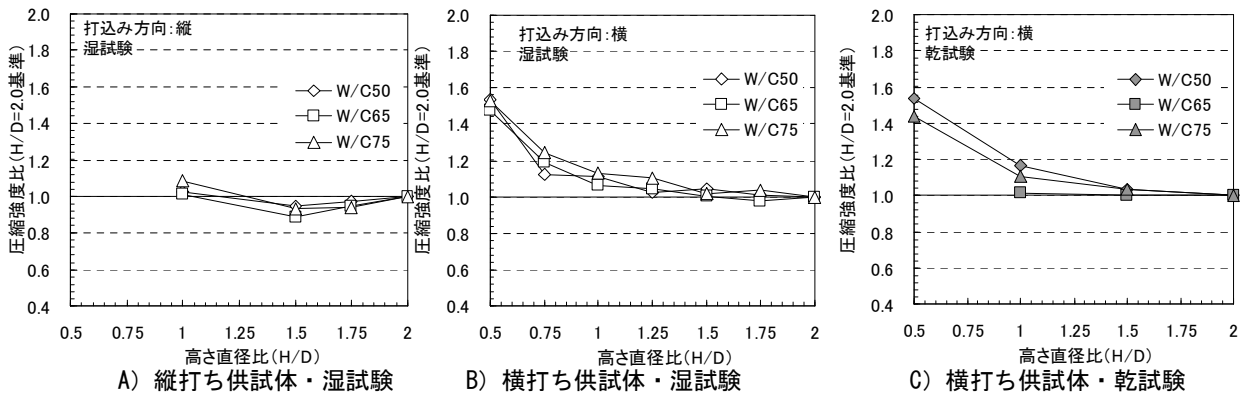


図-9 供試体の H/D と圧縮強度比の関係 (材齢 91 日)

込み方向・H/Dの異なる供試体の圧縮強度を乾湿によって比較した。乾・湿試験の圧縮強度の関係を図-10に示し、湿試験のH/Dが2.00の圧縮強度を基準とした乾試験と湿試験の圧縮強度比とH/Dの関係を図-11に示す。既往の研究をまとめた近藤ら¹¹⁾のH/Dによる補正値は、H/Dが1.00より小さくなると120~200%の大きな値となるが、本実験では110~150%程度であった。図-10に示す通り、W/Cや供試体の打込み方向・H/Dに関わらず乾試験に対する湿試験強度の低下は83%程度になった。この傾向は、J.S.Green¹⁴⁾と山根ら¹⁵⁾の研究とほぼ一致している。図-11に示す通り、湿試験のH/D2.0の供試体を基準とすると乾試験では強度比が最大で190%程度となり圧縮強度の補正値を大きくとる必要がある。

4.3 圧縮強度と静弾性係数の関係

標準養生供試体と標準養生後気中養生の湿試験および乾試験の圧縮強度と静弾性係数の関係を図-12に示した。図中の曲線は、圧縮試験時に測定した供試体の寸法と質量から算出した供試体の平均密度をRC構造計算規準の算定式に当てはめたものである。標準養生供試体の静弾性係数は、RC構造計算規準式の推定値より20%程度大きい値を示し、標準養生後気中養生の乾・湿試験ともにRC規準式の上下にほぼ均等に分布した。これは、材齢91日まで標準養生された供試体のひずみは、他の供試体に比べ変化していないが、圧縮強度が増加したことで静弾性係数が大きくなったと考えられる。

4.4 静弾性係数に及ぼす供試体の高さ直径比の関係

供試体のH/Dと静弾性係数比の関係を図-13に示す。横打ち供試体では、H/Dが1.0以上の範囲ではW/Cと供試体の乾湿およびH/Dに関わりなく静弾性係数比は1.0程度のまま一定であり、縦打ち供試体の湿試験でもW/C50ではH/Dに影響されないのに対して、W/C65とW/C75ではH/Dの減少に伴って静弾性係数比が0.85まで低下した。これは、縦打ち供試体はH/Dの低下により圧縮強度が増加しないが、図-3に示す通り縦ひずみが

増加傾向にあるため、静弾性係数が低下したと考えられる。静弾性係数に及ぼす供試体のH/Dの影響に関して、

表-3 H/Dと圧縮強度の補正係数

H/D	JIS A 1107			本実験	
	1950年	1964~1993年	2002年以降	湿試験	乾試験
2.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.75	0.98	0.98	0.98	0.99	—
1.50	0.96	0.96	0.96	0.98	0.98
1.25	0.94	0.93	0.93	0.95	—
1.10	0.90	—	—	—	—
1.00	0.85	0.89	0.87	0.91	0.91
0.75	0.70	—	—	0.84	—
0.50	0.50	—	—	0.66	0.72

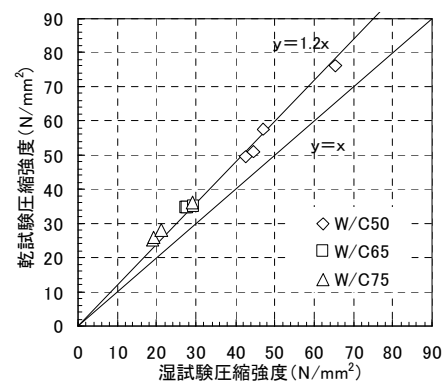


図-10 湿試験と乾試験の圧縮強度の関係

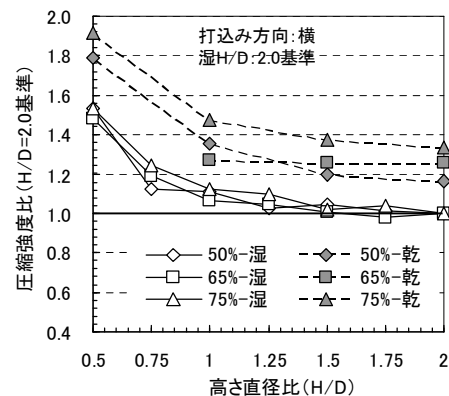


図-11 H/Dと圧縮強度比の関係（横打ち）

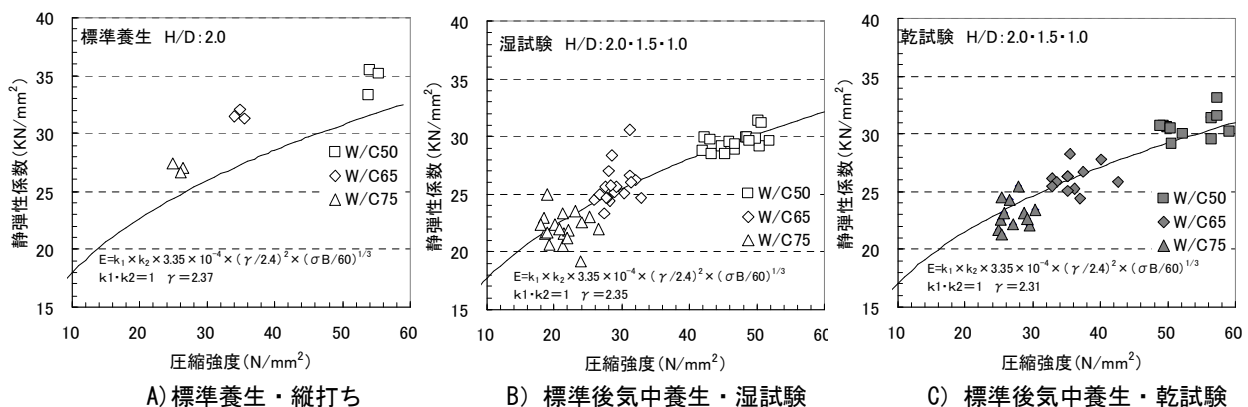


図-12 コンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係（材齢91日）

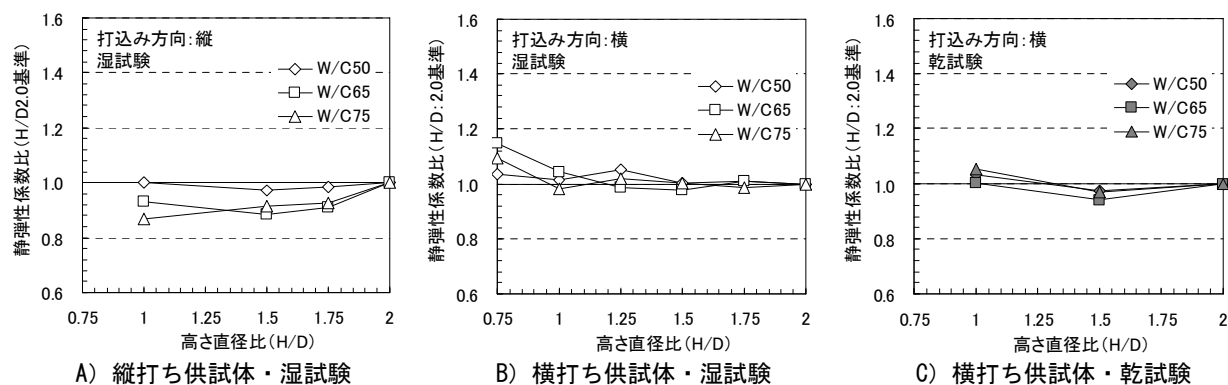


図-13 供試体の H/D と静弾性係数比の関係

野口・友澤¹⁾は高強度コンクリートを対象とした実験から H/D が 2.0 以下では H/D の低下に伴って低下することとしている。これに対して、四戸・最知⁷⁾は W/C60 のコンクリートの実験から H/D の低下に伴う静弾性係数の変化はないとしている。また、片寄・西田²⁾は、H/D が 1.0 に近づくと静弾性係数は若干低下することとしている。

5. まとめ

- 1) 乾燥状態のコンクリートの圧縮強度は試験の乾湿によって異なり、湿試験強度は乾試験の約 80% である。
- 2) H/D の低下に伴う圧縮強度比の増加は既往の報告より少なく、H/D が 0.5~0.75 に低下しても圧縮強度比は 1.5 倍程度である。
- 3) 乾試験によって構造体のコンクリート強度を評価する場合はコア供試体の H/D による補正だけでなく、乾試験による強度の増大を補正する必要がある。
- 4) H/D の低下に伴う圧縮強度の増大に関わらず、静弾性係数は H/D の低下による影響は少ない。

参考文献

- 1) 野口貴文, 友澤史紀: 高強度コンクリートの圧縮力学特性に及ぼす供試体寸法・形状の影響, 日本建築学会構造系論文集, No.473, pp.19-28, 1995.7
- 2) 片寄哲務, 西田浩和: 高強度コンクリート供試体の高さ直径比が圧縮強度に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp.479-480, 2004.8
- 3) 渡邊英樹, 玉井孝幸, 嵩英雄: 高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす供試体寸法の影響に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.385-386, 2006.9
- 4) 若林信太郎, 谷川恭雄, 寺田謙一: 小径コアによる構造体コンクリート強度推定法に関する実験的研究(その1~その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.705-708, 1999.9

- 5) 玉井孝幸ほか: 打込み方向の違うコンクリートにおける圧縮強度に及ぼす高さ直径の影響に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.307-308, 2007.8
- 6) 四戸英男, 最知正芳: コンクリート供試体の高さ/直径比と静弾性係数測定値の関係について, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.107-108, 1980.9
- 7) 最知正芳, 四戸英男: コンクリート供試体の高さ/直径比による Secant Modulus と Chord Modulus の算定値の相違について, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.483-484, 1983.9
- 8) 荒木秀夫, 八十島章: 既存建築物の低強度コンクリートの力学特性, 日本建築学会技術報告集, No.32, pp.11-16, 2010.2
- 9) 因幡芳樹, 守屋健一ほか: コンクリートの圧縮強度と静弾性係数に及ぼす円柱供試体の高さ直径比および乾湿の影響(その1~その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.869-877, 2009.8
- 10) J.M.Murdock, G.E.Kesler: Effect of Length to diameter Ratio of Specimen on the Apparent Compressive Strength of Concrete, ASTM Bul., pp.68-71, 1957.4
- 11) 近藤泰夫, 坂静雄: コンクリート工学ハンドブック(朝倉書店) pp.377, 1981.11
- 12) C.M.Sangha & R.K.Dhir: Strength and complete stress-strain relationships for concrete tested in uniaxial compression under different test conditions, Mate.et. Const., 5-39, 1972
- 13) Z.P.Bazent: Instability, ductility, and size effect in stain-softening concrete, J. of EM Div. ASCE, 102-2, 1976.4
- 14) J.S.Green: Curing Concrete, Concrete & Construction Engineering, 21-12, 1926
- 15) 山根昭, 嵩英雄, 奥野亨: コンクリート強度におよぼす供試体, 養生および試験方法の影響, セメントコンクリート, No.313, pp.31-37, 1973.3