

論文 低強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす供試体の高さ/直径比と端面処理方法の影響

チョウ シハク*1・畑中重光*2・三島直生*3

要旨：低強度コンクリートに対しては、「供試体の高さ/直径比 (h/d) の影響に関する圧縮強度の補正係数」の研究はほとんど行われていない。そこで、本研究では低強度コンクリート供試体の圧縮強度に及ぼす h/d および端面処理方法の影響について検討した。その結果、圧縮強度補正係数の値は、低強度コンクリートに関しては端面処理方法によらず、JIS A 1107 の補正係数の値よりも若干小さくなり、JIS 補正係数では危険側の評価となる場合があること、また、普通強度、高強度コンクリートに対して提案されている既往の推定式は、低強度域まで適用できることなどが明らかになった。

キーワード：低強度コンクリート、圧縮強度、供試体、高さ/直径比、端面処理、強度補正係数

1. はじめに

既存鉄筋コンクリート造(RC)建築物の耐震診断および耐震補強設計を行う際に、通常は RC 構造物に用いられているコンクリートに対する圧縮強度の調査を行うが、その調査結果から、1970 年代前半の高度経済成長期におけるコンクリートの効率優先の量産体制や粗製乱造などで、圧縮強度が設計基準強度に達していない品質の悪い構造物が存在していることが明らかになってきた¹⁾。一方で、日本建築防災協会の耐震診断基準²⁾では、RC 構造物のコンクリートの最低圧縮強度を 13.5N/mm²とし、それ以下のものについては基本的には耐震補強の対象外とされている。

しかしながら、既往の研究³⁾によれば、コンクリートの最低圧縮強度を 13.5N/mm²と定めた根拠が力学的挙動から決定されたものではないことから、コンクリート強度が 13.5N/mm²以下であっても適切な補強を施せば、耐震性を確保できる可能性があると考えられる。

既存の建物を調査する際、高さ/直径比 (以下、h/d) = 2.0 を満たすようなコア抜きは難しい場合がある。これに対して、JIS A 1107 において、普通強度コンクリートの場合は供試体の h/d の影響に関する圧縮強度の補正係数が示されている。また、高強度コンクリートに対しても研究⁴⁾が進められていて一定の知見が得られているが、低強度コンクリートに対しては研究があまり行われていないのが現状である。

そこで、本研究では低強度コンクリートの供試体の圧縮強度に及ぼす h/d および端面処理方法の影響について検討する。さらに得られた結果に基づき、低強度から高強度コンクリートまでを包含する強度補正係数について

も検討する。

2. 実験概要

本実験では、h/d の異なる低強度コンクリートの供試体を作製し、低強度コンクリートに対する供試体の補正係数を求めるために、圧縮強度試験を行った。

表-1 に、実験の要因と水準を示す。

表-1 要因と水準

要因	水準
目標強度 (N/mm ²)	7, 14, 21
高さ/直径比*1	0.50, 0.75, 1.00, 1.50, 2.00
端面処理*2	セメントペーストキャッピング 硫黄キャッピング アンボンドキャッピング テフロンシート

[注] *1: 供試体の直径は 100mm で一定とする。

*2: 目標強度 7, 21(N/mm²)はセメントペーストキャッピングのみ行う。

表-2 使用材料の種類

材料	記号	特性値
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度: 3.16g/cm ³
細骨材	S	町屋川産川砂 表乾密度: 2.59g/cm ³
粗骨材	G	志摩産碎石 表乾密度: 2.66g/cm ³
混和剤	S P	高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸系)

*1 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻教授 博士(工学) (正会員)

*3 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻准教授 工博 (正会員)

表－3 コンクリートの調合とフレッシュ性状

F (N/mm ²)	SL (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					フレッシュ性状		
					W	C	S	G	SP	T _c (°C)	SL (cm)	Air (%)
7	18	4.5	120.4	54.6	202	168	990	844	0.76	20	21.0	3.2
14			94.9	54.1	197	208	970		0.94	21	20.8	3.0
21			78.4	53.6	193	247	949		1.11	20	20.8	3.1

[注] 作成年月日 (目標強度 7, 21N/mm²) : 2014/10/22 温度 : 16.0℃ 湿度 : 70%

(目標強度 14N/mm²) : 2014/10/25 温度 : 16.9℃ 湿度 : 37%

F : 目標圧縮強度, SL : スランプ, Air : 空気量, W/C : 水セメント比, s/a : 細骨材率, T_c : コンクリート温度

試験体名は, F○-△-□-×の記号を付け, ○は目標強度, △は端面処理方法(セメントペーストキャッピング:セ, 硫黄キャッピング:硫, アンボンドキャッピング:ア, テフロンシート:テ), □は h/d, ×は供試体番号とする(例:F7-セ-2.0-1)。

目標圧縮強度(F)および h/d は, それぞれ 3 水準および 5 水準に変化させた。端面処理はセメントペーストキャッピングを基準とし, F = 14 N/mm² に限り端面処理を 4 水準に変化させた。コンクリートの使用材料を表－2 に, 既往の研究⁵⁾を参考として作成した低強度コンクリートの調合およびフレッシュ時の試験結果を表－3 に示す。また, 脱型後の供試体の例を写真－1 に示す。

コンクリートの練混ぜは, F = 7, 21 N/mm² の供試体は 1 バッチあたり 35L, F = 14 N/mm² の供試体は 1 バッチあたり 80L として 1 軸パン型強制練りミキサー(容量 100L)を用いた。供試体は, 各水準 3 体作成した。

供試体は, h/d = 0.5, 0.75, 1.0 のものは一層に, h/d = 1.5, 2.0 は二層に分けて, 打込みを行った。F = 7, 21 N/mm² の供試体は材齢 4 日, F = 14 N/mm² の供試体は材齢 3 日で脱型した。

圧縮試験方法は, JIS A 1108 に準じて行うこととした。なお, アンボンドキャッピングは JIS A 1108 付属書に準じて供試体の両端面に設置した。

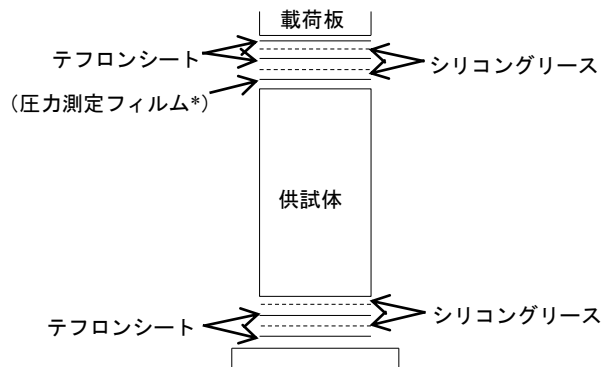
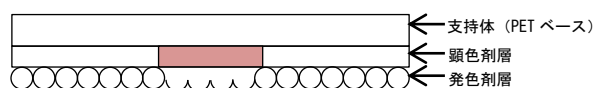
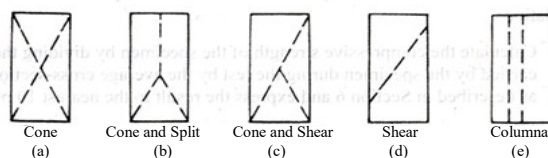
テフロンシート(減摩材)は既往の研究⁶⁾を参考に図－1 に示すように, テフロンシートの間にシリコングリースを塗り, 摩擦を極力減じた方法で圧縮強度試験を行った。

目標強度 14 N/mm² の h/d = 2.0 の各種端面処理方法の供試体に限り, 圧力分布の影響を検討するため, 圧力測定フィルムを載荷板と供試体の間に挟み, 圧縮強度試験を行った。図－2 に圧力測定フィルムの構造を示す。発色の原理は発色剤層のマイクロカプセルが圧力によって破壊され, その中の発色剤が顕色剤に吸着し, 化学反応で赤く発色する⁷⁾。圧力測定フィルムの圧縮レベルは測定範囲が 10～50N/mm² のものを用いた。圧力測定フィルムは圧縮試験時における供試体端面の加圧の均一性を確認するために有効であると考えられる⁸⁾。また, 既往の研究⁶⁾から圧力測定シートはテフロンシートとほぼ同等



h/d = 0.5 0.75 1.0 1.5 2.0

写真－1 脱型後の供試体の例 (F7-セ供試体)

図－1 テフロンシートを使用した圧縮強度試験方法⁶⁾ (* : h/d = 2.0 の供試体に限る)図－2 圧力測定フィルムの構造⁷⁾図－3 破壊性状の分類¹⁰⁾

の減摩効果であると考えられる。

h/d と圧縮強度比の関係に及ぼす破壊性状の影響に関する報告⁹⁾がされている。圧縮強度比と破壊形状は密接な関係にあると考えられることから, 供試体は圧縮強度試験後, 破壊状況を写真で記録し, 既往の研究¹⁰⁾を参考にし, 図－3 に示すような分類方法を用い, 供試体の端面の亀裂の種類で分類することとした。

3. 実験結果および考察

本実験結果のうち、試験時の計測不良等と考えられる供試体 F14-セ-1.0-3, F14-テ-1.0-2, F14-テ-0.75-2, F14-テ-0.5-3 の計 4 体については棄却した。また、試験前に損傷または欠陥があり、試験結果に影響すると考えられた供試体については、試験後、測定結果から影響はないと判断し棄却せず使用することとした。

3.1 供試体の破壊状況

セメントペーストキャッピングおよび硫黄キャッピングを施した供試体の破壊形状は、 h/d が小さくなるにつれて一般的に見られる上下コーン状の破壊形状[Type(a)]から、縦方向の柱状のひび割れ[Type(e)]に移行する傾向であった。これは既往の研究¹¹⁾と同様の傾向であった。また、アンボンドキャッピングおよびテフロンシート(減摩材)を施した供試体については、F14-ア-1.5を除くいずれの h/d においても、破壊形状[type(e)]となった。これは、供試体端面の摩擦の影響の違いに起因するものと考えられる。

3.2 圧縮強度比

図-4および図-5に、供試体の圧縮強度と h/d の関係を示す。

図-4によれば、圧縮強度と h/d の関係は、値は異なるものの、概ね普通強度コンクリートと同様の傾向がある。すなわち、 h/d が小さくなるにつれて、圧縮強度の増加量が大きくなる傾向があり、特に、 $h/d = 1.0$ 以下になると、圧縮強度の増加量が急激に大きくなっていることが分かる。これは、普通強度コンクリートと同じように、圧縮強度試験時に生じる端面摩擦による拘束が影響していると考えられる。

図-5によれば、 $h/d = 2.0$ では端面処理方法の影響はあまり認められないが、 h/d が小さくなるにつれて、特に、 $h/d = 0.5$ では端面処理方法の影響が大きくなる結果となった。

図-6および図-7に、 $h/d = 2.0$ に対する圧縮強度比と h/d の関係を示す。なお、同図には、JIS A 1107の強度補正係数の逆数も併記した。

図-6によれば、低強度コンクリートにおいても h/d が小さくなるにつれ、圧縮強度比は増大しているが、その増加率は圧縮強度により異なり、圧縮強度が低くなるにつれ増加率は概ね大きくなる傾向にある。

図-7によれば、アンボンドキャッピングおよびテフロンシート(減摩材)を施した供試体は、 $h/d = 0.5 \sim 0.75$ の範囲でセメントペーストキャッピングおよび硫黄キャッピングを施した供試体に比べ、圧縮強度比の増加率は小さくなる結果となった。

アンボンドキャッピングを施した供試体では、 $h/d =$

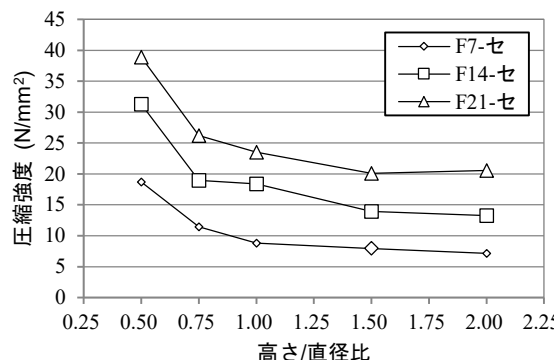


図-4 圧縮強度- h/d の関係(目標強度別)

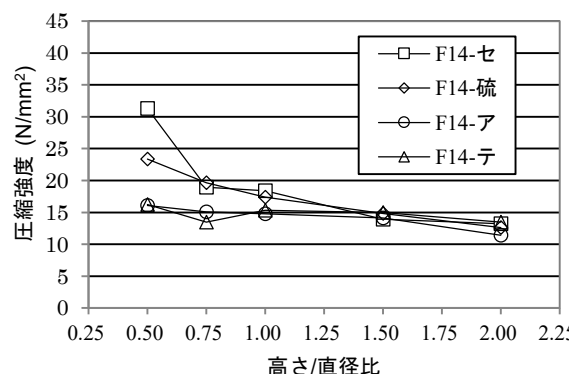


図-5 圧縮強度- h/d の関係(端面処理別)

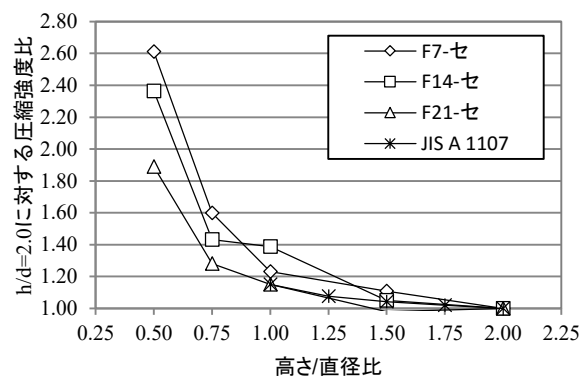


図-6 $h/d = 2.0$ に対する圧縮強度比- h/d の関係(目標強度別)

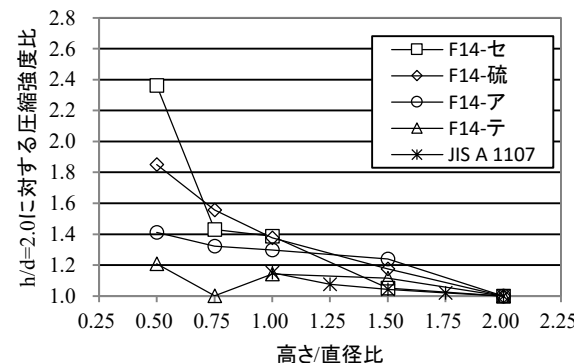


図-7 $h/d = 2.0$ に対する圧縮強度比- h/d の関係(端面処理別)



載荷後の供試体



供試体の端面

写真-2 F14-テの破壊状況

0.5～0.75の範囲で、圧縮強度試験中に、一旦破壊して荷重が低下した後に再び荷重が増加する現象が起きた。この現象はアンボンドキャッピングの鋼製型枠で供試体の端部の横膨張が拘束され、供試体が持つ本来の圧縮強度を上回ったと考えられる。以上の実験結果から、低強度コンクリートの圧縮強度試験時におけるアンボンドキャッピングは $h/d = 0.5 \sim 0.75$ の範囲では、本来の圧縮強度よりも大きな値が推定される可能性があるため、キャッピング方法として適さないと考えられる。

テフロンシート（減摩材）を施した供試体では、供試体の端面摩擦の影響が小さくなり、端部の拘束力が弱まったため、割裂破壊および端面破壊したと考えられる。その時の様子を写真-2に示す。なお、既往の研究¹²⁾では減摩材（軟質ゴムシートとアルミ箔の間にシリコングリースを塗布したもの）を使用した圧縮強度試験において h/d が小さくなるにつれて、圧縮強度が若干下がる傾向であったが、本実験では若干増加傾向であるため異なる結果となった。

3.3 JIS A1107の強度補正係数との比較

本実験で得られた各種コンクリートの供試体における強度補正係数（以下、補正整数）を表-4および表-5に示す。なお、補正係数は、 $h/d = 2.0$ に対する圧縮強度比の逆数とした。

表-4の $F = 7, 14 \text{ N/mm}^2$ の補正係数を比較すると、本研究（低強度コンクリート）の補正係数のほうが JIS A 1107 における強度補正係数の値よりも概ね小さくなっていることが分かった。また、 $F = 21 \text{ N/mm}^2$ の供試体（普通強度コンクリート）の補正係数は $h/d = 1.0$ で JIS A 1107 における強度補正係数とほぼ同じ値を示した。

表-5の各端面処理別の補正係数を比較すると、F14-テ-1.0を除く供試体の補正係数は $h/d = 1.0 \sim 2.0$ の間でいずれも JIS A 1107 における強度補正係数より小さい結果となった。

これまでの、低強度コンクリートの推定強度を求める際に、JIS A 1107における強度補正係数を用いていたが、本研究の補正係数を用いると、推定される強度はさらに小さくなる。このことから JIS A 1107 における強度補正

表-4 強度補正係数（目標強度別）

h/d	JIS A 1107	F7-セ	F14-セ	F21-セ
2.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.75	0.98	(0.95)*	(0.98)*	(1.01)*
1.50	0.96	0.90	0.95	1.02
1.25	0.93	(0.86)*	(0.84)*	(0.95)*
1.00	0.87	0.81	0.72	0.87
0.75	—	0.63	0.70	0.78
0.50	—	0.38	0.42	0.53

[注]*: 参考のため、補間値も併示する。

表-5 強度補正係数（端面処理別）

h/d	JIS A 1107	F14-セ	F14-硫	F14-ア	F14-テ
2.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.75	0.98	(0.98)*	(0.93)*	(0.90)*	(0.95)*
1.50	0.96	0.95	0.85	0.81	0.90
1.25	0.93	(0.84)*	(0.79)*	(0.79)*	(0.89)*
1.00	0.87	0.72	0.73	0.77	0.88
0.75	—	0.70	0.64	0.76	1.00
0.50	—	0.42	0.54	0.71	0.83

[注]*: 参考のため、補間値も併示する。

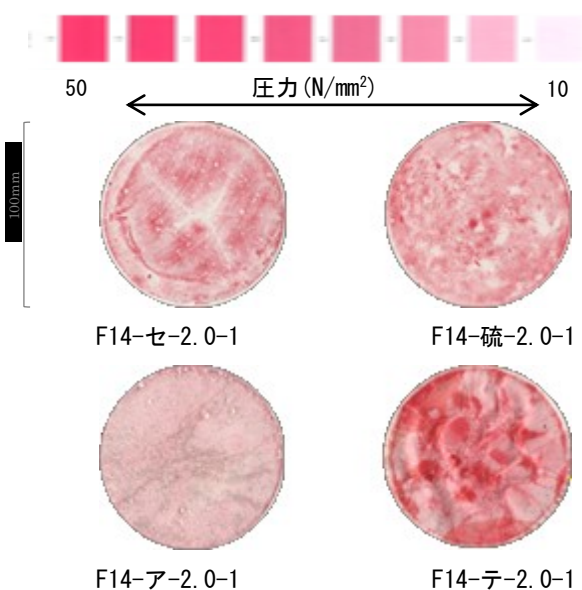


図-8 圧力分布の例

係数は、低強度コンクリートの推定強度を過大に評価していることが分かった。この結果は、既往の研究¹¹⁾と一致する。

3.4 供試体端面の圧力分布の状況

図-8に、各端面処理方法における圧力フィルムにより計測した圧縮試験時の供試体端面の圧力分布を示す。なお、目標強度 14 N/mm^2 の $h/d = 2.0$ の各端面処理方法

における供試体に限る。

図－８によれば、セメントペーストキャッピングおよび硫黄キャッピングを施した供試体の圧力測定フィルムは、供試体の円周の外縁部に圧力の大きい領域（色が濃い部分）が、中心部に圧力の小さい（色が薄い）領域が認められる。これは、供試体の端面の摩擦が存在し、外縁部において拘束が働いているためと考えられる。この結果は、既往の研究¹³⁾と一致する。

また、アンボンドキャッピングを施した供試体の圧力測定フィルムは、全体的に圧力の大きさ（色の濃さ）が均等である。

テフロンシート（摩擦減）を施した供試体の圧力測定フィルムは、供試体の円周の外縁部に圧力の小さい（色が薄い）領域が認められる。これは、供試体の端面摩擦による拘束力の減少により、円周の外縁部の圧力が低下していることを表している。この結果は、既往の研究¹³⁾と一致する。

3.5 低強度から高強度まで表現できるコンクリートの圧縮強度補正係数推定式の提案

野口ら⁴⁾は、圧縮強度 20～120N/mm² のコンクリートを対象として、 $h/d = 0.5 \sim 2.0$ の範囲の圧縮強度の補正係数に関する実験を行っている。実験の結果、圧縮強度補正係数は、コンクリートの圧縮強度レベルの影響を受け、以下の式で表すことができるとしている。

$$n = \frac{F_c}{F_{c(h/d=2.0)}} \quad (1)$$

$$n = k \left\{ \ln \left(2 \frac{d}{h} \right) \right\}^2 + 1 \quad (2)$$

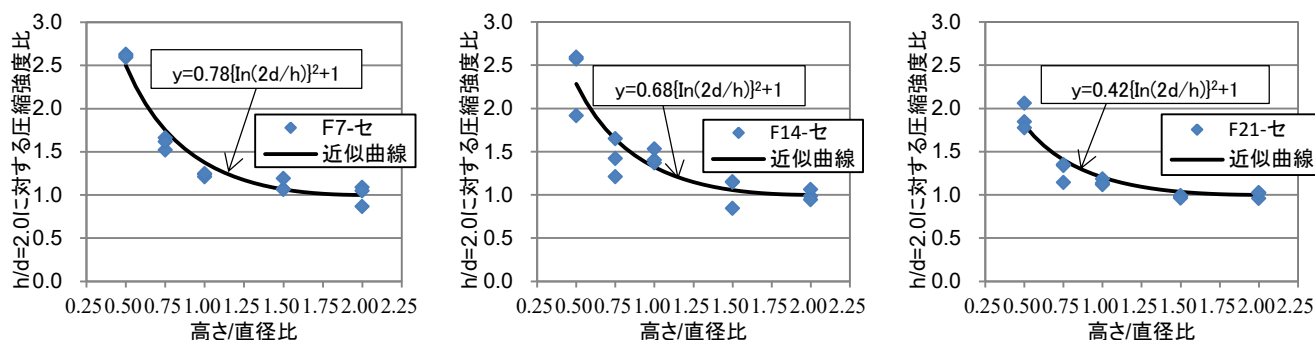
$$k = \frac{4.84}{F_{c(h/d=2.0)}} + 0.165 \quad (3)$$

ここに、 n : $h/d=2.0$ に対する圧縮強度比

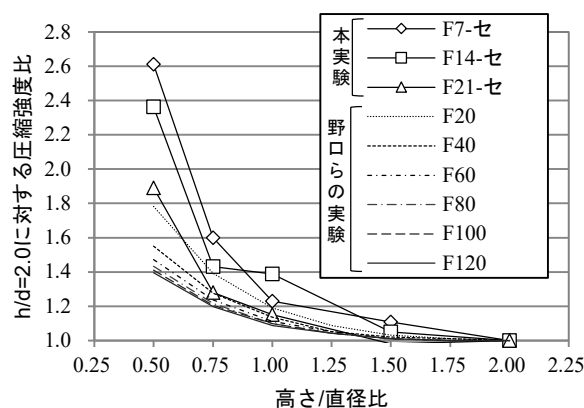
F_c : 各供試体の圧縮強度 (N/mm²)

$F_{c(h/d=2.0)}$: $h/d=2.0$ の供試体の圧縮強度 (N/mm²)

文献⁴⁾の高強度コンクリートに関する研究結果と本研究結果の両データを追加した圧縮強度比— h/d の関係を



図－１０ 本実験結果と近似式の関係



図－９ 野口ら⁴⁾の推定式と本実験結果

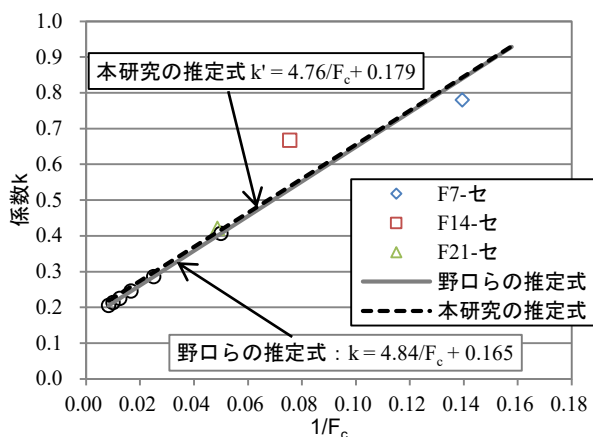
図－９に示す。ここでは、 $h/d = 0.5, 0.75$ における供試体のデータは推定式(2)から算出した。なお、補正係数の推定式は、端面を機械研磨した供試体の実験データから提案されている。既往の研究⁴⁾において、低強度コンクリートに機械研磨を施した場合、骨材の付着が弱く供試体の端面が崩れることが報告されているため、本研究では機械研磨を施した端面の摩擦係数と比較的近いと思われるセメントペーストキャッピングを施した供試体の実験データを用いて検討を行う。

図－９によれば、文献⁴⁾の研究結果において、普通強度から高強度までの範囲では、圧縮強度が低下するほど、圧縮強度比の値は大きくなる傾向が見られる。また、ばらつきはあるものの、低強度コンクリートに関する本実験結果は、文献⁴⁾の研究における普通強度で得られたものの上方に位置しており、低強度コンクリートの圧縮強度比の値は、文献⁴⁾の研究の延長線上にあると見ることができる。

推定式(3)において、圧縮強度がパラメーターとして考慮されているのは、係数 k のみである。このため、低強度コンクリートに関する本実験結果に対する k の値を算定する。

図－１０は、セメントペーストキャッピングを施した供試体の圧縮強度比をプロットし、式(3)の形式の曲線で近似した結果である。

図－１１に、セメントペーストキャッピングを施した供試体の実験結果から直線回帰で求めた係数 k' と $h/d =$



図－１１ 本実験結果と近似曲線の関係

2.0 の供試体の圧縮強度の逆数の関係を示す。なお、同図には、推定式(3)の圧縮強度の係数 k も併記した。

図－１１によれば、本研究の推定式 k' はばらつきはあるものの、係数 k の推定式(3)とほぼ一致し、推定式(1)(2)は端面処理にセメントペーストキャッピングを用いた場合に、低強度域まで適用できると考えられる。ただし、適用範囲は端面処理に機械研磨またはセメントペーストキャッピングを採用した $h/d = 0.5 \sim 2.0$, $F_c = 7.17 \sim 120$ (N/mm^2) である。

4. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

- 1) 圧縮強度比と h/d の関係に関して、 $h/d = 1.0 \sim 2.0$ では端面処理方法の影響はほとんど見受けられないが、 h/d が 1.0 以下になると、その影響は顕著に現れた。
- 2) アンボンドキャッピングおよびテフロンシート（減摩材）を施した供試体は $h/d = 0.5 \sim 0.75$ の範囲で圧縮強度比は h/d が小さくなるにつれて、多少の増加はあるものの、増加率は小さい結果となった。
- 3) 低強度コンクリートの圧縮強度試験時におけるアンボンドキャッピングは $h/d = 0.5 \sim 0.75$ の範囲では、本来の圧縮強度を求めることができない可能性がある。
- 4) 圧縮強度補正係数に関して、JIS A 1107 の補正係数を用いた場合、低強度コンクリートに関しては端面処理方法によらず、JIS A 1107 の補正係数の値よりも概ね小さくなり、危険側の評価となる。
- 5) 野口ら⁴⁾の推定式(1)(2)は低強度域まで適用できると考えられる。ただし、適用範囲は端面処理方法に機械研磨またはセメントペーストキャッピングを採用した $h/d = 0.5 \sim 2.0$, $F_c = 7.17 \sim 120$ (N/mm^2) である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、和藤浩氏（三重大学技術

専門員）、田中準一氏（三重大学大学院修了生）、千枝信隆氏（三重大学卒業生）の助力を得た。ここに付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 中濱貴生，畑中重光：三重県内における既存 RC 造学校施設のコンクリート強度の分布に関する調査研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2，pp.635-636，2005.9
- 2) （財）日本建築防災協会「2001 年改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準 同解説」
- 3) 市橋重勝，山本泰稔，片桐太一，秋山友昭，ジム・トムプソン：低強度コンクリートに装着した接着系あと施工アンカー筋の挙動に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2，pp.397-407，2000.9
- 4) 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，第 473 号，pp.19-28,1995
- 5) 外山貴彦，秋山友昭，斎藤隆典，趙衍剛：コア採取による構造体コンクリート強度の推定，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），pp.747-750,2012.9
- 6) 小阪義夫，谷川恭雄，太田福男：各種の減摩材を用いた場合の圧縮供試体端面の応力分布について，コンクリート工学年次講演会講演論文集（2），pp.121-124，1980.5
- 7) FUJIFILM 圧力測定フィルム製品取扱説明書
- 8) 松村仁夫，黒井登起雄：コンクリートの圧力解析における圧力測定フィルムの画像解析方法，セメント・コンクリート論文集，vol35，pp.397-402，2013
- 9) 林亮介，鬼頭真一，瀬古繁喜，山田和夫：高さ直径比が異なる高強度コンクリートコア供試体の圧縮破壊性状と強度比の関係，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），pp.9-12,2011.2
- 10) WSDOT FOP for AASHTO T 22(Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens-2009)
- 11) 田中準一，畑中重光，三島直生：低強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす供試体の高さ/直径比の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），pp.315-316，2013.8
- 12) 小阪義夫，谷川恭雄：各種骨材コンクリートの圧縮強度におよぼす試験体寸法と載荷面の摩擦の影響について(第 2 報)，日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)，pp.35-36，1968.10
- 13) 松村仁夫，黒井登起雄：供試体の表面仕上げ方法がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集 64(1)，pp.169-176，2010