高強度コンクリートの圧縮強度試験結果に及ぼす供試体の 上面処理方法の影響

EFFECT OF PREPARATION OF SPECIMEN ENDS ON MEASURED COMPRESSIVE STRENGTH OF HIGH STRENGTH CONCRETE

野口 貴文*, 友澤 史紀**

Takafumi NOGUCHI and Fuminori TOMOSAWA

Testing high strength concrete (HSC) is a critical issue on which no consensus has yet been reached. Among the factors which affect the measured compressive strength, the method of preparation of specimen ends plays the most significant role. The effects of capping materials and the effects of specimen end conditions before capping on the measured compressive strength as well as on the failure mode are investigated experimentally. Additionally finite element analyses are conducted to make clear the optimum end preparation concerning mechanical properties of capping materials and capping thickness. Consequently, cement paste capping with 3mm thickness allows to be applied to HSC and machine grinding is the best method of end preparation of HSC.

Keywords : *capping materials, specimen end condition before capping, failure mode, machine grinding compressive strength, finite element analysis*

キャッピング材料, キャッピング形状, 破壊形態, 機械研磨, 圧縮強度, 有限要素解析

1. はじめに

高強度コンクリートの圧縮強度の標準試験方法に関しては, 未だ合意が得られていないのが現状である^{1) 2)}。コンクリートの圧縮強度試験結果に影響を及ぼす要因としては, 供試体の作製に関することでは, 供試体の寸法, 形状, 上面処理方法などが考えられ, 試験に関することでは, 載荷速度, 圧縮試験機の諸元・性能などが考えられ, それらの影響を系統的に研究し, 明確に定量化することが高強度コンクリートの圧縮強度試験方法の標準化には不可欠である。

諸外国の中には, コンクリートの圧縮強度試験用供試体として立方供試体を用いている国もあるが, 我が国では円柱供試体を用いており, その場合には, 一般的にコンクリート打込み面(上面)が載荷面となるため, 上面を適切な方法で平滑に仕上げる必要がある。従来, 圧縮強度, ヤング係数などの力学特性に関しては, キャッピング材料の方がコンクリートよりも優れており, 上面仕上げが JIS A 1132 の規定通りに施されていれば, コン

クリートの圧縮強度試験結果に問題を生じることはなかった。しかしながら, 高強度コンクリートではコンクリートがキャッピング材料以上の力学特性を有する場合が考えられるとともに, その圧縮破壊は通常強度のコンクリートと比較してより脆性的であり, 最大耐力点近傍において不安定な挙動を示すため, 各種条件の影響を受け易く, JIS A 1132 をそのまま高強度コンクリートへ適用することには問題があり, 以下の点について確認する必要があると考えられる。すなわち, 型枠を取り外す前に行うセメントペーストによるキャッピングに関しては, その厚さおよび時期に対する検討が必要であり, 型枠を取り外した状態で行うキャッピングに関しては, JIS A 1132 に規定されている材料に対する検討が必要である。また, 今後, キャッピング材料として新たに開発される新素材もあると考えられ, その適用可能性に関する性能基準・使用規準を明確にしておくことは有用であると考えられる。

本研究では, 高強度コンクリートの圧縮強度試験用供

* 東京大学工学部建築学科 助手・博士(工学)

** 東京大学工学部建築学科 教授・工博

Research Assoc., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Dr. Eng.

試体に適した上面仕上げの方法を明確にすることを目的として、キャッピングの材料および形状を要因とした圧縮強度試験を行うとともに有限要素解析を実施した。なお、比較のため、上面に機械研磨を施した供試体に関しても、同様の試験・解析を実施した。

2. 研究方法

2.1 圧縮強度試験

高強度コンクリートの圧縮強度試験結果に及ぼすキャッピングの影響を検討するため、2つのシリーズに分けて実験を実施した。シリーズⅠではキャッピングに用いる材料の影響に対する検討を行い、シリーズⅡではキャッピングの形状・厚さの影響に対する検討を行った。両シリーズとも、検討対象のコンクリートの圧縮強度レベルは、表1に示す調査からなる40, 80, 120MPaの3種類であり、供試体寸法は10φ×20cmとした。シリーズⅠならびにシリーズⅡで検討した上面の処理方法をそれぞれ表2、表3および図1に示す。

シリーズⅠでは、キャッピング施工面の形状の非均一性を排除するため、コンクリート上面に機械研磨を施した後、圧縮強度試験5日前に、供試体の軸とキャッピング面とを垂直に保つ装置を用いて厚さが 3 ± 1 mmと

表1. コンクリートの調査

強度 (MPa)	水灰比 (%)	単位重量 (kg/m ³)				
		水	セメント	シリカフェーダ	細骨材	粗骨材
120	25	170	612	68	524	997
80	35	170	486	-	686	997
40	55	170	309	-	834	997

表2. 供試体上面の処理方法 (シリーズⅠ)

種類	材料
機械研磨	機械研磨 (基準)
普通ペースト	普通ペースト+セメントペースト (W/C=30%)
早強ペースト	早強ペースト+シリカフェーダ (10%) ペースト (W/B=27%)
硫黄	硫黄+フライアッシュ (重量比 5:1)
合金	ウッドメタル

表3. 供試体上面の処理方法 (シリーズⅡ)

種類	コンクリート上面形状, キャッピング厚さ
機械研磨	機械研磨 (基準)
平面 (3mm)	平面, 厚さ 3mm
平面 (10mm)	平面, 厚さ 10mm
凸面	凸面, 平均厚さ 4.5mm, 曲率半径 165mm
凹面	凹面, 平均厚さ 4.5mm, 曲率半径 165mm

図1. 供試体上面の処理方法 (シリーズⅡ)

なるようにキャッピングを施し、圧縮強度試験直前まで湿空養生を行った。

シリーズⅡでは、コンクリート打込み6時間後に表3に示すような形状にコンクリート上面を処理し、水セメント比30%のセメントペースト (普通ペースト28) を用いてキャッピングを施し、その後材齢1日まで湿空養生を行った後、圧縮強度試験直前まで水中養生を行った。セメントペーストによるキャッピングを施した場合には、供試体上面が凹状に仕上がり、外縁部に作用する局部荷重が供試体上部の破壊を先行させる傾向を示すことが報告されている³⁾ため、圧縮強度試験直前に、研磨材 (300#) を用いて供試体上面を平滑に磨き上げた。

また、キャッピングに用いた材料の力学特性を調べるため、各材料について薄板供試体 (10φ×1cm) を作製し、コンクリート供試体と同様の養生を施した。

コンクリート供試体の圧縮強度試験はJIS A 1108に準じて行い、ロードセルにより圧縮荷重を測定するとともに、検長6cmのひずみゲージを供試体側面中央部に鉛直および水平に貼付し、また側面上端部 (キャッピング部分直下) にも水平に貼付して、軸方向ひずみおよび中央部・上端部の水平ひずみの測定を行った。

また、キャッピング材料の力学特性の測定は図2に示すように、直径10cmの鋼柱間に薄板供試体を挟んだ状態で載荷を行い、ロードセルにより圧縮荷重を測定するとともに、変位計およびひずみゲージを用いてキャッピング材料の軸ひずみおよび水平ひずみの測定を行った。キャッピング材料の軸ひずみ ϵ_c は、式(1)により算出される。ここで採用した薄板供試体および試験方法では、キャッピング材料の物性値そのものを測定することはできないが、実際のキャッピングが薄い状態で施され、加圧板およびコンクリート供試体により水平方向の変形が拘束された状態で載荷されていることを考慮すれば、本方法により得られる挙動は実際に施されたキャッピング材料の挙動に近いと考えられる。

$$\epsilon_c = \frac{1}{L} \left(L \cdot \epsilon_0 - \frac{L-t}{2} (\epsilon_1 + \epsilon_2) \right) \quad (1)$$

図2. キャッピング材料の力学特性試験

2.2 有限要素解析

有限要素解析で検討したコンクリートの圧縮強度レベルは、20、60、100MPaの3種類であり、それぞれの材料定数を表4に、キャッピング材料の力学特性に関する要因と水準を表5に示す。有限要素解析は図3に示すような要素分割で、供試体の1/2の部分について平面ひずみ状態による2次元弾性解析を行い、供試体の変形状体を算出した。解析に使用したプログラムは平居の開発した「パソコンによる大容量弾性解析」プログラム⁴⁾である。

3. 研究結果および考察

3.1 実験結果

図2の方法により得られたキャッピング材料の応力ひずみ曲線より、各キャッピング材料の圧縮強度、ヤング係数、ポアソン比および各応力レベルにおける水平ひずみを算出した結果を表6に示す。ただし、キャッピング材料のヤング係数およびポアソン比は、載荷荷重の最大値（普通ペースト、早強ペースト、普通ペースト28は、1000kN圧縮試験機では破壊に至らなかったため、最大荷重を1000kNとした）の30%時点の応力および軸ひずみを基に算出した。表6に示すように、いずれのキャッピング材料のヤング係数もコンクリートのヤング係数より小さく、横方向の変形が加圧板で拘束された条件下に

表4. コンクリートの材料定数

強度レベル	ヤング係数 (MPa)	ポアソン比
100MPa	39700	0.20
60MPa	33500	0.18
20MPa	21300	0.16

表5. 有限要素解析の要因と水準

要因	水準
厚さ・形状	厚さ 2mm, 厚さ 5mm, 厚さ 10mm, 凸面, 凹面
ヤング係数 (MPa)	5000, 10000, 15000, 20000, 25000, 30000
ポアソン比	0.1, 0.2, 0.3

図3. 有限要素解析の要素分割の一例

おいても、硫黄および普通ペースト28の場合を除いて、高応力時の水平ひずみはかなり大きな値を示している。また、硫黄および合金は、検討対象のコンクリート強度120MPaよりも低い圧縮強度しか有していない。したがって、高強度コンクリートに普通ペースト、早強ペースト、硫黄および合金をキャッピング材料として用いた場合には、供試体上部またはキャッピング材の破壊が先行する可能性があると考えられる。ここで、普通ペーストと普通ペースト28は同一調合であるにもかかわらず、普通ペースト28の力学特性が優れているのは、材齢が長いためであり、普通ペースト28の方が供試体端部の横方向への変形に対する拘束力は強いと考えられる。

シリーズIの圧縮強度試験結果を図4に示す。図4によれば、いずれの強度レベルにおいても、機械研磨を施した供試体は高い圧縮強度を示しており、強度レベル40MPaにおいては、いずれの上面処理を施した場合でも圧縮強度試験結果に顕著な違いは認められなかった。しかしながら、強度レベル80MPaにおいては早強ペーストを用いた場合に、強度レベル120MPaにおいては機械研磨以外の上面処理を施した全ての場合に、機械研磨を施した場合よりも圧縮強度が低下する結果となった。このように、G.Wernerによる圧縮強度50MPa程度まで

表6. キャッピング材料の力学特性

		普通	早強	硫黄	合金	普通28
圧縮強度	(MPa)	126 以上	126 以上	93.8	83.9	126 以上
ヤング係数	(MPa)	9620	10500	7900	5390	23360
ポアソン比		0.15	0.23	0.03	0.23	0.28
各応力時の 水平ひずみ	20MPa	277	414	89	766	261
	40MPa	615	874	224	2794	476
	60MPa	1078	1522	520	7731	685
	80MPa	1875	2550	1077	14460	950
(10 ⁻⁶)	100MPa	4194	4317	-	-	1227
	120MPa	5746	4734	-	-	1714

図4. 圧縮強度に及ぼすキャッピング材料の影響

のコンクリートについての実験結果⁶⁾と同様に、本実験結果からも、コンクリートの圧縮強度が高いほど圧縮強度試験結果に及ぼすキャッピング材料の影響は大きくなることがわかる。また、圧縮強度試験結果の変動についても、機械研磨を施した場合には5%以下の変動係数であったのに対し、それ以外の場合には15%の変動係数を示す場合もあった。

シリーズⅡの圧縮強度試験結果を図5に示す。図5によれば、いずれの強度レベルにおいても、平面(3mm)のキャッピングを施した供試体は機械研磨を施した供試体と同等の圧縮強度を示している。しかしながら、平面(10mm)、凸面および凹面の場合には、圧縮強度レベル40、80MPaで圧縮強度の低下が認められ、特に凸面の場合その傾向が著しい。供試体上面が凸状である場合には頂部に集中荷重が作用するため、圧縮強度試験結果が低下することは周知の事実⁶⁾である。本実験では、供試体上面の凸状はキャッピングにより解消しているものの、セメントペーストのヤング係数がコンクリートよりも小さいため、依然凸部に応力が集中し、強度低下に至ったと考えられる。

以上のような、上面処理方法の違いによるコンクリート供試体の変形性状の違い、圧縮強度試験結果の違いなどは、応力増大に伴う「中央部水平ひずみ/上部水平ひずみ」で表される供試体の変形性状によって明確に説明することができる。この変形性状は、図6に示すように大別して3タイプに分類される。タイプⅠでは、供試体上部の水平方向の変形が加圧板により拘束されるため、供試体は樽状の変形を示し、供試体中央部の破壊が圧縮強度を決定する。現行のJIS A 1108で求められる圧縮強度は、タイプⅠの破壊を想定していると考えられる。タイプⅡでは、供試体上部の拘束がないため、供試体が縦割れ状の破壊を呈する。加圧板と供試体上面との間に

減摩材を挿入した場合などがタイプⅡに相当する。タイプⅢは、キャッピング材料の強度不足などによりキャッピング材料の破壊・変形が先行し、最終的に供試体上部の破壊が圧縮強度を決定する場合である。タイプⅡおよびタイプⅢの変形を呈する場合は、通常、タイプⅠより圧縮強度が低下すると考えられる。本実験における各供試体の変形性状を図7に示すとともに、それらをタイプⅠ～Ⅲに分類した結果を表7に示す。機械研磨を施した場合および普通ペースト28を厚さ3mmで施した場合(平面(3mm))は、いずれの強度レベルにおいてもタイプⅠの変形を示している。しかしながら、それら以外の上面処理を施した場合には、強度レベル40MPaではいずれの場合もタイプⅠの変形を示すが、強度レベル80MPa、120MPaのコンクリートでは、ほとんどのものがタイプⅠ以外の変形を示している。特に、脱型後に普通ペースト、早強ペーストまたは合金を用いてキャッピングを施した場合および脱型前に厚さ10mmの普通ペースト28を施した場合(平面(10mm))には、供試体端部から破壊するタイプⅢの変形を示している。キャッピング厚さが増大すると、硬化初期の収縮が大きくなり、規定値以内の平面度が得られない⁶⁾ばかりか、キャッピング材のポアソン効果による横方向の変形が拘束できなくなるため、供試体端部から破壊に至ると推測される。

表7と図4とを比較対照すると、タイプⅡおよびⅢの変形を示す場合には圧縮強度試験結果が低下していることがわかる。現行のJISで想定した圧縮破壊(タイプⅠ)を呈するには、供試体上部の拘束が十分確保されていなければならない。そのためには、キャッピング材料としては、圧縮応力を受けた場合の水平方向の変形が小さい方が望ましい。機械研磨を施した供試体の圧縮強度時における中央部水平ひずみおよび上部水平ひずみが、それぞれ $1000 \sim 1500 \times 10^{-6}$ および 500×10^{-6} 程度であることを考慮すると、供試体がタイプⅠの変形を示すためには、圧縮強度時の応力状態においてキャッピング材料の水平ひずみが 1000×10^{-6} 以下でなければならないと

図5. 圧縮強度に及ぼすキャッピング形状の影響

図6. 供試体の変形性状の分類

図7. コンクリート供試体の水平方向の変形状

考えられる。したがって、各キャッピング材料の適用可能なコンクリートの圧縮強度の上限を表6を基に算出すると、脱型後にキャッピングを行う場合には、合金で25MPa程度、早強ペーストで50MPa程度、普通ペーストで60MPa程度、硫黄で80MPa程度であり、脱型前に普通ペースト28でキャッピングを行う場合には、90MPa程度であると考えられる。以上の実験結果より、高強度コンクリートの圧縮強度試験において、通常の強度レベルと同様な破壊形態を呈し、キャッピングに起因する圧縮強度の低下を生じさせないようにするためには、供試体上面は機械研磨により処理することが最も望ましく、また、脱型前に厚さ3mmのセメントペーストキャッピングを施し、かつ水中養生を十分に行った場合も有効であるといえる。

表7. 供試体の上面処理方法別変形状の分類

供試体の 上面処理方法	変形状		
	120MPa	80MPa	40MPa
機械研磨	I	I	I
普通ペースト	III	II	I
早強ペースト	III	III	I
硫黄	II	II	I
合金	III	I	I
普通ペースト28	平面(3mm)	I	I
	平面(10mm)	III	I
	凸面	I	I
	凹面	II	I

3.2 有限要素解析結果

有限要素解析で得られた「中央部水平ひずみ/上部水平ひずみ」の結果の一例を、コンクリートの強度レベルごとに図8～図10に示す。ここで、上部水平ひずみは供試体上面より1cm下部における水平方向のひずみを表す。図8～図10によれば、キャッピング材料の水平方向への変形がコンクリートの水平方向への変形よりも小さい場合（キャッピング材料のポアソン比0.1、ヤング係数25000または30000MPaの場合）を除いて、キャッピング厚さが増加するに伴い、コンクリート供試体の「中央部水平ひずみ/上部水平ひずみ」が小さくなっている。その傾向は、キャッピング材料のポアソン比が大きいほど、キャッピング材料のヤング係数が小さいほど顕著である。また、コンクリート上面が凸状である場合には、キャッピング材料の性質に関わらず「中央部水平ひずみ/上部水平ひずみ」は1.5～2.0程度の値を示し、図6で分類したタイプIの変形状を示しているが、凹状である場合には、キャッピング材料のヤング係数が小さいほど、またキャッピング材料のポアソン比が大きいほど、「中央部水平ひずみ/上部水平ひずみ」が小さくなっている。キャッピング材料の性質およびキャッピングの形状にかかわらず、コンクリートが高強度であるほど、同一条件下での「中央部水平ひずみ/上部水平ひずみ」は

小さくなる。

〔中央部水平ひずみ／上部水平ひずみ〕が1程度以下の場合、供試体上面の水平方向の変形に対する拘束力が不十分であり、圧縮強度試験結果の低下を引き起こす可能性がある。したがって、高強度コンクリートに用いるキャッピング材料には、高い剛性が要求されるとともに、ポアソン効果による水平方向の変形が小さいことが望まれる。有限要素解析結果はシリーズⅠおよびシリーズⅡの実験結果と一致しており、本解析結果からも、高強度コンクリートの圧縮強度試験用供試体の上面処理方法としては、機械研磨が最適であり、また、脱型前にセメントペーストキャッピングを行い十分な養生を施した場合

も有効であることがわかる。

供試体の変形性状の分類に従い、キャッピング材料として必要とされるヤング係数およびポアソン比を強度レベルごとに評価した。ここでは、〔中央部水平ひずみ／上部水平ひずみ〕が1.4以上の場合にタイプⅠの変形性状を示すものとし、1.0～1.4の場合にタイプⅡ、1.0以下の場合にタイプⅢの変形性状を示すものとしてキャッピング材料を評価した。評価結果を強度レベルごとに表8(a)～(c)に示す。平板状に施されたキャッピング材料の破壊応力度がコンクリートの圧縮強度よりも低い場合には、変形性状がタイプⅠ～タイプⅢのいずれの場合でも、圧縮強度の低下を生じるが、キャッピング材料

(a) キャッピング材料のポアソン比 0.1

(b) キャッピング材料のポアソン比 0.3

図8. 供試体の水平方向の変形に及ぼすキャッピングの影響に関するFEM解析（コンクリート強度 100MPa）

(a) キャッピング材料のポアソン比 0.1

(b) キャッピング材料のポアソン比 0.3

図9. 供試体の水平方向の変形に及ぼすキャッピングの影響に関するFEM解析（コンクリート強度 60MPa）

(a) キャッピング材料のポアソン比 0.1

(b) キャッピング材料のポアソン比 0.3

図10. 供試体の水平方向の変形に及ぼすキャッピングの影響に関するFEM解析（コンクリート強度 20MPa）

の破壊応力度が高い場合には、変形性状の分類がタイプⅠとなるヤング係数およびポアソン比を有するキャッピング材料であれば、圧縮強度の低下を生じることはないと考えられる。

表8(a). キャッピング材料の評価(強度レベル100MPa)

形状 ポアソン比 ヤング係数	平面 2mm			平面 5mm			平面 10mm		
	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3
5000	I	I	II	II	II	II	II	III	III
10000	I	I	I	I	II	II	II	II	III
15000	I	I	I	I	I	II	I	II	II
20000	I	I	I	I	I	I	I	II	II
25000	I	I	I	I	I	I	I	I	II
30000	I	I	I	I	I	I	I	I	II

表8(b). キャッピング材料の評価(強度レベル60MPa)

形状 ポアソン比 ヤング係数	平面 2mm			平面 5mm			平面 10mm		
	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3
5000	I	I	II	II	II	II	II	III	III
10000	I	I	I	I	II	II	II	II	III
15000	I	I	I	I	I	II	I	II	II
20000	I	I	I	I	I	I	I	II	II
25000	I	I	I	I	I	I	I	I	II
30000	I	I	I	I	I	I	I	I	II

表8(c). キャッピング材料の評価(強度レベル20MPa)

形状 ポアソン比 ヤング係数	平面 2mm			平面 5mm			平面 10mm		
	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3
5000	I	I	I	I	II	II	II	II	III
10000	I	I	I	I	I	I	I	II	II
15000	I	I	I	I	I	I	I	I	II
20000	I	I	I	I	I	I	I	I	II
25000	I	I	I	I	I	I	I	I	I
30000	I	I	I	I	I	I	I	I	I

4. まとめ

圧縮強度試験用供試体の上面処理方法が高強度コンクリートの圧縮強度試験結果および変形性状に及ぼす影響について実験および有限要素解析により検討した結果、以下の知見が得られた。

(1) 応力の増大に伴い「中央部水平ひずみ/上部水平ひずみ」が増大する場合は、供試体端部の水平方向の変形が十分拘束されており、供試体は JIS A 1108 で想定している樽状の変形・破壊形態を示すが、「中央部水平ひずみ/上部水平ひずみ」の値が1近傍で一定もしくは1以下に減少する場合には、供試体は割裂破壊もしくは端部破壊の状態となり、圧縮強度が低下する。

(2) 圧縮強度レベル 40MPa のコンクリートでは、圧縮強度試験結果に及ぼすキャッピング材料・形状の違いの影響はほとんど認められないが、コンクリートが高強度になるほどそれらの影響が大きく現れるようになり、供試

体は割裂破壊または端部破壊を呈するようになり、キャッピングに起因する圧縮強度の低下を生じる。

(3) コンクリート供試体上面に機械研磨を施した供試体は、いずれの強度レベルにおいても樽状の変形・破壊形態を呈し、高い圧縮強度を示すとともに、変動係数が小さく安定した試験結果が得られる。

(4) キャッピング材料の厚さが増加するに伴い、コンクリート供試体の「中央部水平ひずみ/上部水平ひずみ」は小さくなる。この傾向は、キャッピング材料のポアソン比が大きいほど、キャッピング材料のヤング係数が小さいほど顕著である。

(5) 型枠脱型前に水セメント比 30% のセメントペーストを用いてキャッピングを施す場合、その厚さが 3mm 程度であれば、90MPa 以下の圧縮強度のコンクリートでは、機械研磨の場合と同様に安定した圧縮強度が得られる。

(6) キャッピングを脱型後に施す場合、各キャッピング材料の適用可能なコンクリートの圧縮強度の上限値は、合金を用いる場合には 25MPa、セメントペーストを用いる場合には 50～60MPa、硫黄を用いる場合には 80MPa である。

以上のことから、高強度コンクリートの圧縮強度試験用供試体の上面処理方法としては、機械研磨が最も適切であると考えられる。

謝辞 本論文の一部は、建設省総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」(委員長: 青山博之)の研究の一環として実施したものである。委員各位に紙面を借りて謝意を表す。また、実験に際して多大なご協力を頂いた小野山貫造氏(現㈱フジタ)に紙面を借りて謝意を表す。

参考文献

- 1) ACI 363 Committee : Research Needs for High-Strength Concrete, ACI Materials Journal, Vol.84, No.6, pp.559-561, 1987
- 2) FIP-CEB Working Group on High Strength Concrete : High Strength Concrete - State of the Art Report, FIP, 1990
- 3) 吉兼 亨: キャッピングの迅速化に向けて、セメント・コンクリート, No.540, pp.8-17, 1992
- 4) 平居孝之: 有限要素法と境界要素法, 共立出版, 1988
- 5) G. Werner : The Effect of Type of Capping Material on the Compressive Strength of Concrete Cylinders, Proceedings of ASTM, Vol.58, pp.1166-1186, 1958
- 6) 岡田 清, 六車 熙編: コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, pp.379-380, 1981

(1995年4月5日原稿受理, 1995年6月15日採用決定)