

論文 経年によるコンクリートの中性化と乾燥の進行が圧縮強度および臨界応力度に及ぼす影響

本庄 敬祐*1・木野瀬 透*2・新井 真*3

要旨：コンクリートの中性化や含水状態の変化が圧縮強度に影響すると言われているが、通常の圧縮強度試験では載荷時に供試体端面に摩擦拘束が生じるため、経年によるコンクリート表面からの変化を適切に評価できていない可能性がある。そこで、本研究では中性化および含水状態を変化させた供試体で摩擦拘束を低減させて圧縮強度試験を行い、それらが圧縮強度および臨界応力度に及ぼす影響を確認した。その結果、中性化や乾燥の進行に伴い、コンクリートの表層と内部で臨界応力度の分布に差が生じ、JIS で定められる圧縮強度試験では、この影響は把握できないことが確認された。

キーワード：コンクリート、中性化、圧縮強度、体積ひずみ、臨界応力度、含水率

1. はじめに

地震国である日本では、これまで耐震診断および耐震補強が積極的に行われ、既存建築物の耐震化が図られてきた。しかしながら、耐震診断は、あくまで検討時点での耐震性能を評価する手法であり、その後の構造体の経年変化等の影響は考慮されていない。

コンクリートに関しては、経年による中性化や含水状態の変化が圧縮強度に影響することが報告されている¹⁾。また、中性化進行に伴いコンクリートに微細なひび割れが生じるとの報告があるものの²⁾、経年による強度への影響は耐震診断等に考慮されていない。加えて、JIS A 1107 に規定されるコンクリートコアの圧縮強度試験においては、圧縮試験機の加圧板により供試体端面に摩擦拘束が生じることが指摘されており³⁾、コンクリート表層の中性化や乾燥した範囲が摩擦拘束域に含まれるため、これらの進行が圧縮強度に及ぼす影響を適切に評価できていない可能性が考えられる。

そこで本研究では、まず、実構造物を対象として、過去にコンクリートコア（以下、コア）を採取して圧縮強度および中性化深さを確認した部材から再度コアを採取し、それらの経年による変化を調べるとともに、含水状態との関係を確認した。

次に、新たに作製したコンクリート円柱供試体を促進中性化試験装置により端面から中性化させ、加圧板による摩擦拘束の有無が圧縮強度に及ぼす影響と、端面からの中性化および乾燥（含水率の低下）が深さごとの臨界応力度に及ぼす影響を確認した。

2. 実構造物から採取したコアを用いた実験

2.1 実験内容

本実験では、過去（本実験の11～15年前）に実施され

た耐震診断において、圧縮強度、中性化深さを確認した RC 造建築物 10 棟を対象として、以前にコアを採取した位置の近傍から再度コアを 3 本採取し、圧縮強度試験、静弾性係数試験および中性化深さ測定を行った。また、上記のコアとは別に、同位置の近傍から乾式によりコアを 1 本採取してコンクリートの含水率を測定した。含水率については、図-1 のように、コア表面から 20mm 間隔で試験片を切り出し、試験片ごとに JIS A 1476 に基づき含水率を測定した。さらに、上記とは異なる RC 造建築物 4 棟を対象として、耐震診断時に錆汁が確認された箇所に対して同様の確認を行い、全 14 棟を対象に、圧縮強度、静弾性係数および中性化深さと含水率との関係を確認した。なお、圧縮強度試験等に供するコアは直径 76mm、高さは直径の 1 倍以上とし、含水率測定に供するコアは直径 100mm とした。

対象建築物の概要を表-1 に、確認した項目と方法を表-2 にそれぞれ示す。

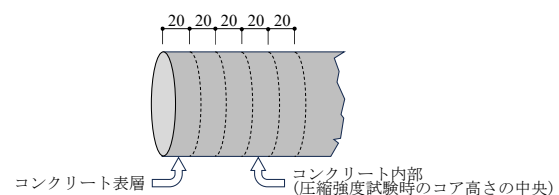


図-1 含水率測定時の試験片の切り出し方法

表-1 対象建築物の概要

	分類	棟数	建設年代	対象部材
1	耐震診断時のコア採取位置近傍での調査	10棟	昭和10年代:1棟, 昭和30年代:3棟, 昭和40年代:3棟, 昭和50年代:3棟	耐震壁 腰壁
2	耐震診断時の錆汁発生位置近傍での調査	4棟	昭和40年代:4棟	耐震壁 梁

*1 （一財）日本建築総合試験所 構造部 耐震耐久性調査室 室長代理（正会員）

*2 （一財）日本建築総合試験所 材料部 材料試験室（正会員）

*3 （一財）日本建築総合試験所 構造部 耐震耐久性調査室（正会員）

2.2 経年による中性化深さおよび圧縮強度の変化

(1) 中性化深さの変化

表-1 に示す分類 1 の建築物における耐震診断時と本実験時の中性化深さの測定結果を図-2 に示す。なお、耐震診断時は対象部材から採取した 1 本、本実験時は原則として同部材から採取した 3 本のコアの中性化深さの平均値を示す。

本実験時の 3 本のコアの中性化深さには、やや大きなばらつきが認められた。また、耐震診断時のコアが各棟 1 本であるため、部材ごとの平均的な中性化深さの測定ができていない可能性があり、経年による一様な傾向は認められなかった。

(2) 圧縮強度の変化

分類 1 の建築物における耐震診断時と本実験時の圧縮強度の試験結果を図-3 に示す。なお、耐震診断時は対象部材より採取した 1 本のコアの圧縮強度を、本実験時は同部材より採取した 3 本のコアの圧縮強度の平均値を示す。

耐震診断時と本実験時の圧縮強度の差は±20%程度となっているが、耐震診断時のコアが 1 本であり、本実験での 3 本のコアの平均値とは同列で比較できないが、経年による圧縮強度の明確な傾向は認められなかった。なお、本実験で求めたすべてのコアの静弾性係数と日本建築学会規準⁹⁾に基づく図-4 に示す算定式とは、算定式を下回る結果が多いものの、相関係数 0.75 と、一定の相関性が確認された。

2.3 含水率と中性化深さ、圧縮強度および静弾性係数との関係

コンクリート表層（表面から 0～20mm の部分）および内部（圧縮強度試験時のコア高さの中央、表面から 40～60mm、もしくは 60～80mm の部分）の含水率と中性化速度係数との関係を図-5 に、圧縮強度との関係を図-6 に、静弾性係数との関係を図-7 にそれぞれ示す。

コンクリートの中性化と乾燥は大気に曝された表面側から進行するため、図-5 のとおり、中性化速度係数はコンクリート内部に比べて表層の含水率との相関性が高かった（相関係数-0.66）。なお、分類 2 の建築物については、コンクリート内部の含水率が分類 1 の建築物と比較して高い傾向が見られた。

一方、圧縮強度については、図-6 のとおり、コンクリート表層より内部の含水率との相関性が高かった（相関係数 0.73）。圧縮強度試験は、図-8 のように加圧板とコア端面に摩擦拘束が生じ、供試体高さの中央部分で破壊域が形成されるため、破壊域となるコンクリート内部の含水率との相関性が高くなったと考えられる。一般的にコンクリートは乾燥に伴い、圧縮強度が増大するとされている⁹⁾。しかしながら、本実験では、竣工後数十年

表-2 確認した項目と方法

項目	方法	数量
中性化深さ	JIS A 1152による（コア割裂面による測定）	コア3本
圧縮強度	JIS A 1107による	
静弾性係数	JIS A 1149による	
含水率	JIS A 1476による	コア1本

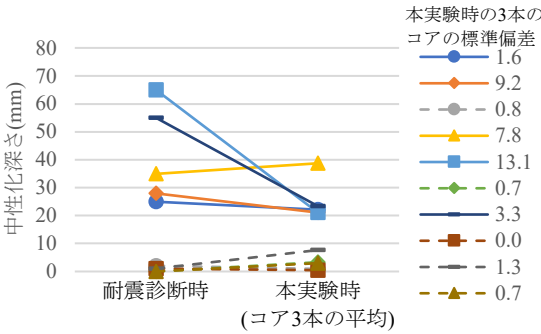


図-2 経年による中性化深さの変化

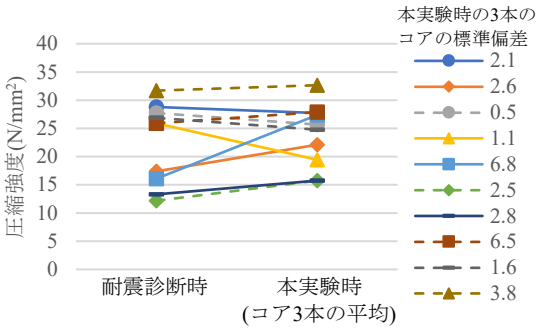


図-3 経年による圧縮強度の変化

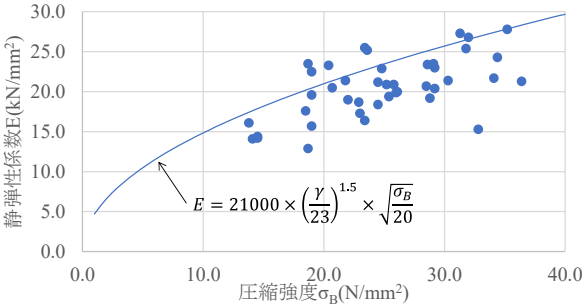


図-4 圧縮強度と静弾性係数の関係

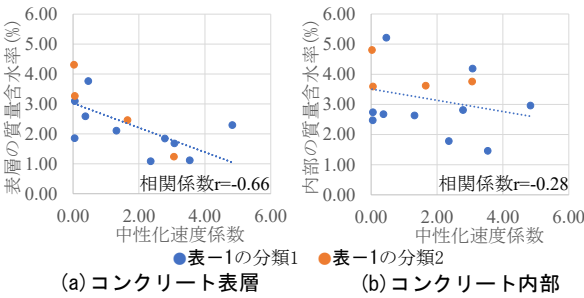


図-5 含水率と中性化速度係数との関係

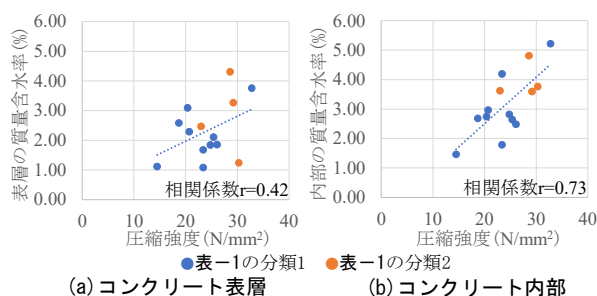


図-6 含水率と圧縮強度との関係

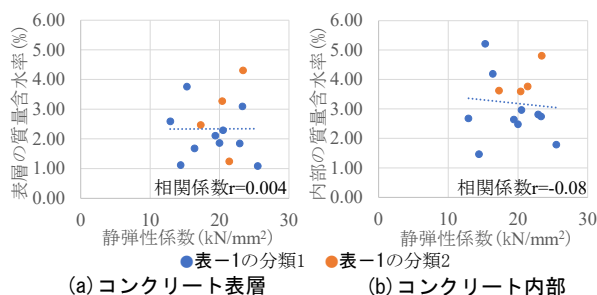


図-7 含水率と静弾性係数との関係

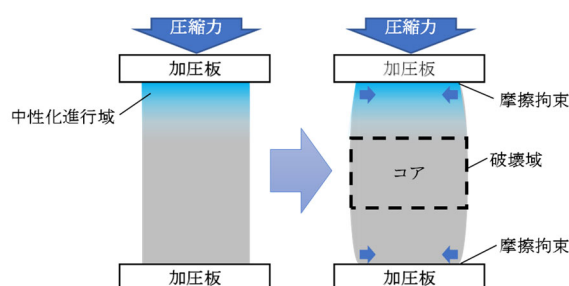


図-8 圧縮強度試験時の摩擦拘束と破壊域

経過したコンクリートを対象としており、緻密で水分が逸散しにくいコンクリートは経年による乾燥が進みづらく、その結果、圧縮強度と含水率が正の相関関係になったと推測される。なお、静弾性係数は、JISA 1149 に基づき、コア高さの中央における検長 60mm のひずみゲージでの測定により算出しているが、図-7(b)に示すとおり、コンクリート内部においても、含水率との相関性が見られなかった。

3. 円柱供試体を用いた室内実験

3.1 実験内容

(1) 供試体

本実験では、JISA 1132 に基づき、表-3 の配合のコンクリートを直径 100mm、高さ 200mm のブリキ製軽量型枠に詰め、コンクリート円柱供試体（以下、供試体）を作製した。コンクリートの使用材料を表-4 に示す。

コンクリートは、中性化進行程度による影響を検討す

表-3 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		W	C	S1	S2	G	A
85	53.0	198	233	584	385	863	3.5

表-4 コンクリートの使用材料

材料	産地・種類（物性）
水(W)	回収水（スラッジ水）・地下水
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(S1)	福岡県北九州市石灰石砕砂 （表乾密度：2.69g/cm ³ ，粗粒率：2.50，岩種：石灰岩）
細骨材(S2)	大阪府茨木市砕砂 （表乾密度：2.66g/cm ³ ，粗粒率：2.90，岩種：砂岩）
粗骨材(G)	大阪府茨木市2005砕石 （表乾密度：2.69g/cm ³ ，実績率：58%，岩種：砂岩）
混和剤(A)	高性能AE減水剤 標準形

表-5 供試体の測定条件と供試体数

測定条件				供試体数
促進中性化	促進材齢	項目	圧縮強度試験時の減摩材有無	
有	26週	臨界応力度	有	3体
		圧縮強度	無	3体
		静弾性係数	—	1体
無	— (26週比較用)	臨界応力度	有	3体
		圧縮強度	無	3体
		静弾性係数	—	1体
有	52週	臨界応力度	有	3体
		圧縮強度	無	3体
		静弾性係数	—	1体
無	— (52週比較用)	臨界応力度	有	3体
		圧縮強度	無	3体
		静弾性係数	—	1体

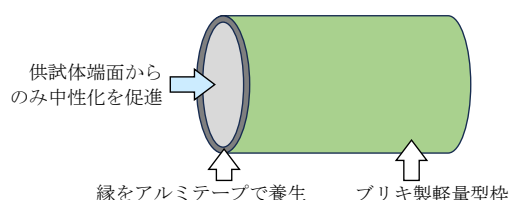


図-9 促進中性化を行う供試体

るため、水セメント比 85%とし、早期に中性化が進行しやすい配合とした。また、供試体は測定条件ごとに 3 体とし、その他に含水率を測定するための供試体 1 体を作製した。測定条件と供試体数を表-5 に示す。

(2) 供試体の中性化の促進

促進中性化を行う供試体については、材齢 4 週まで封緘養生した後、脱型せずに一面（打設面）のみを開放した状態で、促進中性化試験装置（温度 20℃，相対湿度 60%，CO₂濃度 5%の環境）に入れた。その際、供試体と型枠の界面からの CO₂の拡散を防ぐため、隙間を塞ぐようにアルミテープでシールした（図-9）。促進材齢が 26 週、もしくは 52 週経過した後、供試体を取り出し、次節に示す実験に供した。なお、比較用として促進中性化を行わな

い（以下、非促進）供試体も作製し、恒温恒湿室（温度 20℃、相対湿度 60%、CO₂濃度約 0.05%の環境）で同様に保管し、促進中性化の有無による比較を行った。

(3) 実験内容

圧縮強度と静弾性係数は、摩擦拘束が生じた状態で、JIS A 1108 および JIS A 1149 により試験した。なお、ひずみの測定には検長 60mm のひずみゲージを用いた。

図-10 に圧縮強度試験時のコンクリートの圧縮応力、縦ひずみ、横ひずみ、体積ひずみおよび臨界応力度の関係を示す。臨界応力度は、体積ひずみが増加に転じる時点の応力と定義されており⁹⁾、体積ひずみの変形特異点から求めることができる。体積ひずみは、図-11 に示すように、供試体の各深さに縦横方向に貼付したひずみゲージにより、圧縮強度試験時の縦ひずみおよび横ひずみを計測し、式(1)により算出した⁹⁾。縦ひずみには検長 20mm、横ひずみには検長 30mm のひずみゲージを用いた。臨界応力度を算出する際の圧縮強度試験については、圧縮試験機の加圧板と供試体の間に生じる摩擦拘束が中性化進行範囲（以下、中性化域）に及ぼす影響を低減させるために、供試体上下に減摩材（2 枚のテフロンシート）の間にグリースを塗布したもの）を挟んで実施した。

$$\varepsilon_V = \varepsilon_C - 2\varepsilon_T \quad (1)$$

ここに、 ε_V :体積ひずみ、 ε_C :縦ひずみ、 ε_T :横ひずみ
中性化深さは、圧縮強度および静弾性係数試験後の供

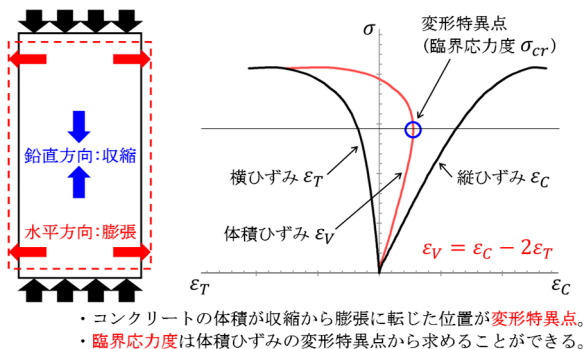


図-10 体積ひずみ曲線と臨界応力度

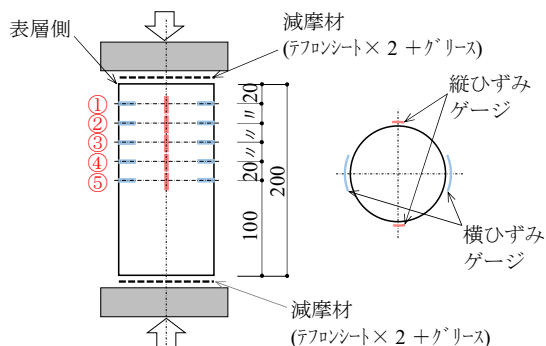


図-11 ひずみゲージの貼付位置

試体を用いて、2 章（表-2）と同様に JIS A 1152 により測定した。また、含水率についても 2 章と同様に、含水率測定用供試体を端面から 20mm 間隔で乾式により切断して得られた各試料片により JIS A 1476 に基づき測定した。

3.2 中性化が圧縮強度および静弾性係数に及ぼす影響

各供試体の測定条件、圧縮強度、静弾性係数を表-6 および表-7 に、各測定条件における圧縮強度の平均値の比較を図-12 にそれぞれ示す。

圧縮強度は、減摩材の有無に関わらず、中性化の進行により促進材齢 26 週では 3%程度、52 週では 2~6%程度大きくなった。一方、静弾性係数については、表-6 お

表-6 促進材齢 26 週の測定条件、圧縮強度、静弾性係数

供試体 記号 ^{*1}	測定条件			圧縮強度 (N/mm ²)	平均強度 (N/mm ²)	静弾性 係数 (kN/mm ²)
	項目	促進中性化 (平均中性化 深さ)	減摩材 の使用			
26w-1-1	臨界応力度 ^{*2}	有 (45～50mm)	有	18.9	19.3	—
26w-1-2				19.1		
26w-1-3				20.0		
26w-2-1	圧縮強度 静弾性係数		無	20.7	20.8	23.2
26w-2-2				21.0		25.9
26w-2-3				20.7		23.7
A-1-1	臨界応力度 ^{*2}	無 (5～6mm)	有	18.4	18.8	—
A-1-2				20.1		
A-1-3				17.8		
A-2-1	圧縮強度 静弾性係数		無	19.5	20.2	23.0
A-2-2				20.7		23.6
A-2-3				20.3		24.0

*1: 26w: 促進材齢 26 週, A: 非促進(促進材齢 26 週比較)。

○-1-○: 臨界応力度確認用, ○-2-○: 圧縮強度・静弾性係数確認用

*2: 摩擦拘束を減じた状態での圧縮強度を併せて確認した。

表-7 促進材齢 52 週の測定条件、圧縮強度、静弾性係数

供試体 記号 ^{*1}	測定条件			圧縮強度 (N/mm ²)	平均強度 (N/mm ²)	静弾性 係数 (kN/mm ²)
	項目	促進中性化 (平均中性化 深さ)	減摩材 の使用			
52w-1-1	臨界応力度 ^{*2}	有 (70～79mm)	有	20.7	19.5	—
52w-1-2				18.4		
52w-1-3				19.3		
52w-2-1			無	22.1	21.3	26.0
52w-2-2				20.6		22.9
52w-2-3				21.3		24.1
B-1-1	臨界応力度 ^{*2}	無 (8～10mm)	有	18.7	19.1	—
B-1-2				18.9		
B-1-3				19.7		
B-2-1			無	20.5	20.0	24.6
B-2-2				19.3		25.4
B-2-3				20.1		23.1

*1: 52w: 促進材齢 52 週, B: 非促進(促進材齢 52 週比較)。

○-1-○: 臨界応力度確認用, ○-2-○: 圧縮強度・静弾性係数確認用

*2: 摩擦拘束を減じた状態での圧縮強度を併せて確認した。

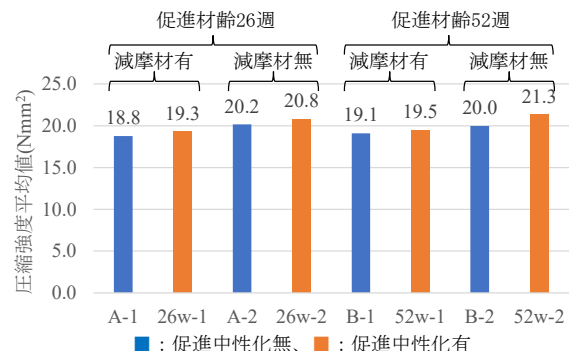
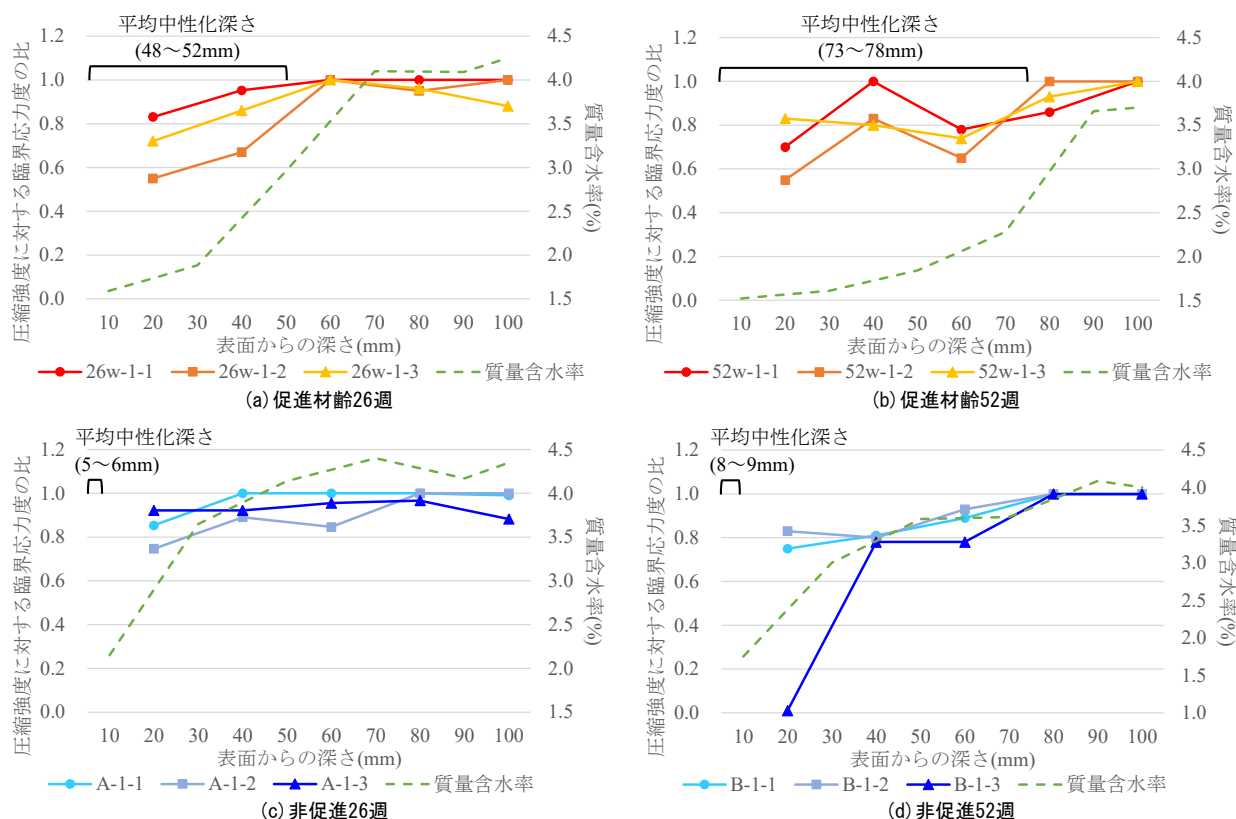


図-12 各測定条件における圧縮強度平均値の比較



注) 圧縮強度まで臨界応力度に達しなかった箇所は、圧縮強度に対する臨界応力度の比1.0として示した。

図-13 各測定条件における各深さの圧縮強度に対する臨界応力度の比、含水率および中性化深さ

よび表-7 に示すように明瞭な差はなく、中性化の進行による一様な傾向は認められなかった。静弾性係数は、JISA 1149 に基づき、供試体高さの中央で測定しており、中性化域がひずみ測定範囲に含まれない、もしくは若干含まれる程度であることが起因していると考えられる。

3.3 臨界応力度、含水率および中性化深さの関係

各測定条件におけるコンクリート表面からの各深さの臨界応力度、含水率および中性化深さの関係を図-13 に示す。臨界応力度については、圧縮強度に対する中性化域での低下の程度を把握するために、ここでは圧縮強度に対する比で示した。

図-13 に示すように、促進中性化を行った供試体においては、ばらつきはあるものの、中性化域は未中性化域に比べて臨界応力度が低い傾向であった。また、含水率も類似した傾向が見られ、中性化域においては、表面に近いほど含水率が小さくなっており、中性化の進行だけでなく、コンクリートの乾燥も臨界応力度に影響していると考えられる。次に、非促進の供試体については、多少のばらつきがあるものの、表層と内部で臨界応力度に大きな差異は見られなかった。ただし、臨界応力度の測定時に図-11 のようにひずみゲージを貼付する都合上、ごく表層では臨界応力度が低下している可能性が考えられる。なお、供試体記号 B-1-3 は、深さ 20mm における臨界応力度が著しく低いが、供試体表層のひび割れなど

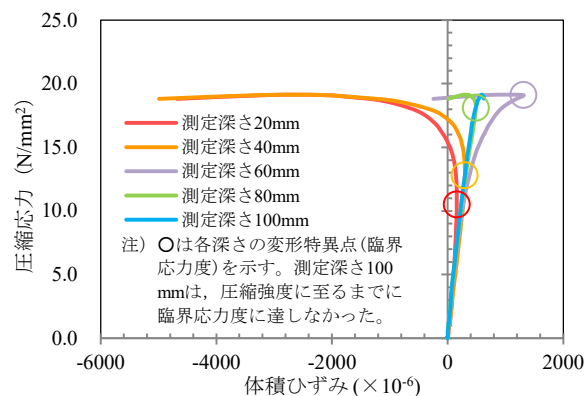


図-14 圧縮応力と体積ひずみの関係
(供試体記号：26w-1-2)

の局所的な影響により、载荷初期の段階から体積ひずみが膨張の挙動を示したと推測される。

図-14 に供試体記号 26w-1-2 を一例として、圧縮応力と体積ひずみの関係を示す。深さ 20mm, 40mm の順に臨界応力度に達し、中性化が進行していない 60mm 以深の範囲では、臨界応力度に大きな差異は認められなかった。

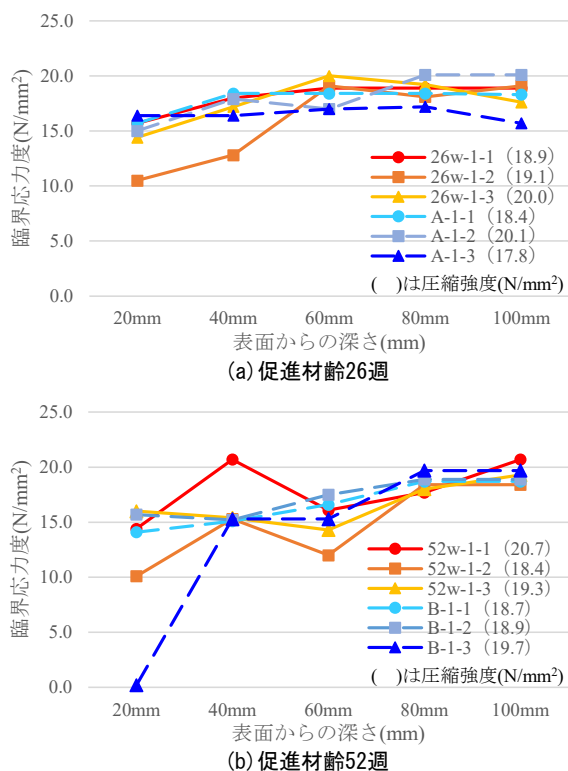
3.4 中性化および乾燥によるコンクリート強度への影響

多孔体であるコンクリートは、内部の空隙の量が圧縮強度に大きく影響するが、経年により中性化が進行すると、コンクリート中の水酸化カルシウムがより体積の大きい炭酸カルシウムに変化することで空隙を埋め、圧縮

強度が増大すると考えられている⁷⁾。

一方で、中性化に伴うセメント硬化体の炭酸化収縮により、セメントペースト自体やペーストと骨材との境界に微細なひび割れや²⁾、経年での乾燥によるひび割れが生じる。なお、圧縮強度試験においては、載荷初期段階で生じる微細なひび割れが圧縮応力の上昇に伴い連結し、大きなひび割れを形成してコンクリートの体積が収縮から膨張に転じることで臨界応力度に達するとされている⁹⁾。そのため、前節の結果より、中性化や乾燥が進行した範囲では圧縮強度試験前から微細なひび割れが生じていた可能性があり、進行していない範囲よりも早期に臨界応力度に達したと推測される。図-15に示すように、促進中性化を行った供試体は、中性化や乾燥が進行した範囲で臨界応力度が低下した。しかしながら、非促進の供試体に比べて促進中性化を行った供試体の圧縮強度は高くなったため、両供試体の表層の臨界応力度は同程度となった。

以上より、圧縮強度試験時の摩擦拘束を低減させ、各深さの臨界応力度を求めることで、中性化や乾燥の進行に伴い、コンクリート表層と内部での臨界応力度の分布が生じることが認められた。ただし、本実験で認められた各深さの臨界応力度の差は微小であり、JISで定められる圧縮強度試験では、供試体内の臨界応力度の分布の差が圧縮強度に与える影響は認められなかった。



注) 圧縮強度まで臨界応力度に達しなかった箇所は、圧縮強度を臨界応力度として示した。

図-15 各供試体の臨界応力度

4. まとめ

本稿では、中性化および乾燥による圧縮強度への影響に関して、実構造物および供試体を用いた実験から以下の知見を得た。

- (1) 中性化速度係数はコンクリート表層、圧縮強度はコンクリート内部の含水率との相関性が高い。
- (2) 摩擦拘束の有無に関わらず、中性化の進行に伴い圧縮強度は増大した。
- (3) 中性化や乾燥の進行に伴い、コンクリートの表層と内部で臨界応力度の分布に差が生じるが、JISで定められる圧縮強度試験では、この影響は認められない。上記(3)に関しては、耐震診断など、経年したコンクリートから採取したコアでの圧縮強度試験において、中性化や乾燥に伴うひび割れ発生範囲が摩擦拘束を受ける場合の影響が懸念される。そのため、中性化や乾燥の進行程度に応じて、構造計算においてはある程度の余裕度を見込むなど、圧縮強度の扱いに留意する必要があると考えられる。

また、上記(2)、(3)は、促進中性化を行った供試体による結果であることに留意する必要がある。実構造物においては、乾湿繰り返しの影響があり、コンクリート表層のひび割れの状態なども本実験と異なると考えられる。そのため、実構造物より採取したコアにより、臨界応力度に影響を及ぼす要因として、中性化と乾燥のどちらがより支配的かなど、今後検証する必要がある。

参考文献

- 1) 尼崎省二：コンクリートの諸特性に及ぼす炭酸化の影響に関する研究，第6回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.197-200，1984
- 2) 中田清史，野口貴文：セメント硬化体の炭酸化過程における体積変化に関する考察，日本コンクリート工業年次論文集，Vol.40，No.1，pp.459-464，2018
- 3) 梶田建夫，秋元昌胤，川本朧万：円柱状ぜい性材料供試体の一軸圧縮試験における加圧面拘束が変形状態および圧縮強度におよぼす影響について，土木学会論文報告集，No.166，pp.27-38，1969.6
- 4) 日本建築学会，鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，p.56，2018
- 5) 谷川恭雄 監修：硬化コンクリートの性質，セメントジャーナル社，P.11，2004
- 6) 日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧，技報堂出版，P.78，1976
- 7) 佐伯竜彦，大賀宏行，長滝重義：コンクリートの中性化の機構解明と進行予測，土木学会論文集，No.414，V-12，pp.99-108，1990.2