

耐震診断後のRC造建築物における構造体の経年変化に関する研究

-コンクリートの含水率と圧縮強度、中性化、鉄筋腐食の関係-

Study on Aging of Members in RC Building after Earthquake Resistance Assessment
-Relationship between Moisture Content and Compressive Strength, Carbonation, Rebar Corrosion of Concrete-

本庄 敬祐*1、木野瀬 透*2

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。2022年の文部科学省の公表¹⁾によれば、公立学校建物の耐震化率はほぼ100%に達しており、1995年の兵庫県南部地震以降、国をあげて耐震診断および耐震補強に注力してきた成果が表れていると考えられる。

しかしながら、耐震診断や耐震補強は、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。また、同じく文部科学省の公表¹⁾では、築年数45年以上の公立学校建物の面積は、2016年度から2021年度の5年間で約1.8倍に増えるなど、高度経済成長期に大量に建設された建築物は、老朽化の一途を辿っている。加えて、少子高齢化が進む日本では本来、学校規模を縮小し、現代の授業スタイルにあったコンパクトな形に移行することも考えられるが、すでに耐震補強が行われ、構造上の弱点が解消されたと考えられている校舎を解体することも難しく、これらの建築物をいつまで維持管理して継続使用するのかという課題も出てきている。

既存鉄筋コンクリート造（以下、RC造）建築物の継続使用に関連して当法人では過去に、1988年度から2014年度までの27年間に実施したRC造建築物の耐震診断において採取したコンクリートコア（以下、コア）の圧縮強度および中性化深さに関する統計分析を行った²⁾。本研究では、同統計分析の結果も踏まえ、過去に耐震診断が実施されたRC造建築物に対して、これらの建築物の耐久性の側面からの検討資料を得るための調査、検討

を行った。具体的には、中性化等の診断後の経年変化について再調査し、耐震診断時の調査結果との比較を行うとともに、鉄筋腐食における劣化因子となるコンクリート中の水分（含水率）を測定し、各調査結果との関係を整理することで、構造体の経年変化の可能性について検討した。本稿ではその結果について報告する。

2. 既往文献における統計分析²⁾

当法人では、1988（昭和63）年度から2014（平成26）年度までの27年間に実施したRC造建築物の耐震診断において採取したコアの圧縮強度および中性化深さについて、過去に統計分析を行った。本章では、その結果を概説する。その際の対象建築物の概要を表-1に、竣工年度の分布を図-1に示す。対象建築物は、1956（昭和31）年から1982（昭和57）年までに竣工した公立小中学校、高等学校および幼稚園であり、対象棟数は477棟である。ただし、これらの校舎および園舎には、増築等により1棟あたりの竣工年度が複数になる棟もあるため、図-1中のデータ数は工区数としており、計

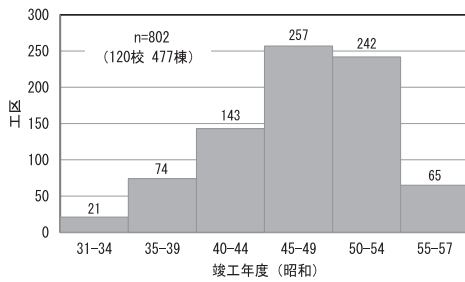
表-1 対象建築物の概要²⁾

調査対象建物	大阪府内 学校施設
学校数	120校
調査建物棟数	477棟（802工区）
建物階数	1階～4階
竣工年度	昭和31年～昭和57年
調査日	昭和63年7月～平成26年8月
建築後の年数 ^{※1}	15年～54年
採取したコア数	2636本
設計基準強度 ^{※2}	$F_c=13.5、15、18、21、24\text{N/mm}^2$

※1 調査時点における年数 ※2 S1単位に換算

*1 HONJO Keisuke：（一財）日本建築総合試験所 試験研究センター 構造部 耐震耐久性調査室 主査

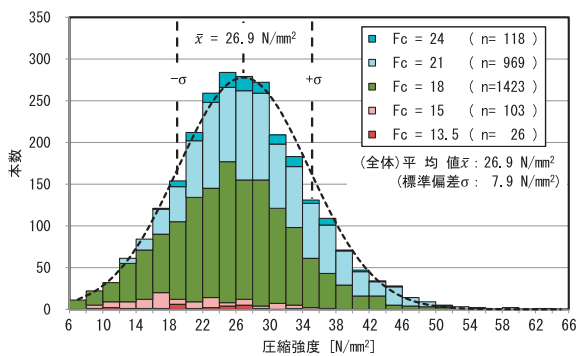
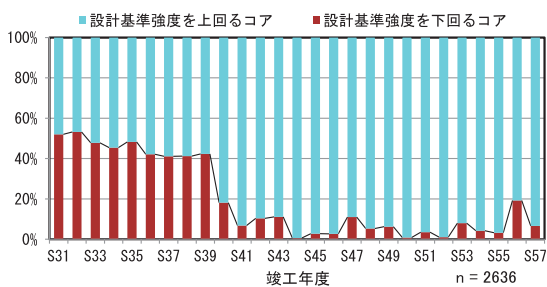
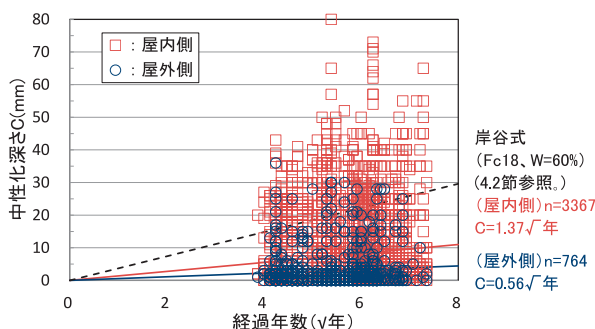
*2 KINOSE Toru：（一財）日本建築総合試験所 試験研究センター 材料部 材料試験室

図-1 竣工年度の分布²⁾

802工区となる。対象建築物からのコア採取は原則として階、工区ごととし、採取本数は計2636本である。

2.1 コンクリートの圧縮強度²⁾

計2636本のコアの圧縮強度の分布を図-2に示す。同図には、設計基準強度 F_c ごとに集計したコア本数も併記した。

図-2 圧縮強度の分布²⁾図-3 設計基準強度を下回るコアの割合²⁾図-4 中性化深さ C と経過年数 $(\sqrt{\text{年}})$ の関係(全測定値)²⁾

設計基準強度ごとのコア本数では、 F_c18 、 F_c21 の占める割合がそれぞれ1423本(53.9%)、969本(36.7%)と多いことがわかる。また、圧縮強度は正規分布しており、その平均値が 26.9N/mm^2 、最大値が 62.8N/mm^2 、最小値が 6.7N/mm^2 であった。なお、RC造耐震診断基準³⁾において、診断実施の可否を検討する必要があるとされている圧縮強度 13.5N/mm^2 を下回る強度のコアは、全体の3.9%であった。

圧縮強度が設計基準強度を下回る割合を竣工年度ごとにまとめたものを図-3に示す。

1956(昭和31)年度から1964(昭和39)年度までは設計基準強度を下回るコアの割合が40%~50%であるのに対し、1965(昭和40)年度以降ではその割合が20%以下となっている。これは、1965(昭和40)年の公共建築工事標準仕様書の改定、スランプ基準値の変更、レディーミクストコンクリートの品質指定を伴うJIS(日本産業規格)や建築工事標準仕様書・同解説JASS5(以下、JASS5)の改定、昭和30年代終盤からコンクリートのポンプ圧送が普及し始めたことなどにより、コンクリートの施工方法が改善されたためと考えられる。

2.2 コンクリートの中性化深さ²⁾

中性化深さの測定は、計2636本のコアについて、屋外側762面、屋内側3364面を対象として集計した。また、中性化深さ測定時のコンクリートの経過年数は、15年~54年である。中性化深さの全測定値($n=4126$)と経過年数の平方根 $(\sqrt{\text{年}})$ との関係を図-4に示す。

同図のとおり、経過年数が同じであっても、屋内側は屋外側に比べて中性化深さが大きくばらついている。これは、屋内側の方が中性化が進行している傾向があり、打放し仕上げ面が屋内側に多く存在したことや屋内の居室としての使用状況が主な要因であると考えられる。

3. 本研究の内容

2章に示す分析では、耐震診断実施時点でのコンクリートの圧縮強度および中性化深さの分布や1965(昭和40)年度を境にコンクリートの品質が改善され、設計基準強度を下回るコンクリートが減少していることがわかる。ただし、中性化がJASS5⁴⁾で規定される最小かぶり厚さ(30mm)を超えるものも複数あること、設計基準強度を下回るコンクリートが多数存在することも確認でき、また、経年による構造体の変化や中性化と鉄筋腐食の相関については把握できない。

以上を踏まえて本研究では、過去に耐震診断が実施されたRC造建築物から、調査時点における中性化の状況

や建設年代などを考慮して10棟を選定し、耐震診断時にコア1本を採取した位置の近傍からコア3本を再度採取してコンクリートの中性化深さ、圧縮強度、静弾性係数および含水率を確認し、それらの関係を調べた。また、上記10棟とは別のRC造建築物4棟を対象に、耐震診断時に鉄筋の腐食が疑われる錆汁が確認された箇所に対して同様の確認を行った。併せて、全14棟においてコア採取位置近傍でコンクリートをはつり、鉄筋の腐食状況を目視で確認することで、鉄筋の腐食状況と中性化深さ、含水率との関係を調べた。

調査対象建築物の概要を表-2に、各調査方法を表-3に、目視による鉄筋腐食度の区分を表-4にそれぞれ示す。

表-2 調査対象建築物の概要

分類	調査棟数	建設年代	調査部材
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

表-3 調査方法

調査項目	調査方法
中性化深さ測定	JIS A 1152による(コア割裂面による測定)
圧縮強度試験	JIS A 1107による
静弾性係数試験	JIS A 1149による
含水率測定	JIS A 1476による
鉄筋腐食	「コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針2022」 ⁵⁾ に基づく表3に示す区分による

表-4 目視による鉄筋腐食度の区分⁵⁾

段階の表示	腐食の目視による観察状況
0	施工時の状態を保ち、以降の腐食が認められない。
I	部分的に腐食が認められる。軽微な腐食。
II	表面の大部分が腐食している。部分的に断面が欠損している。
III	鉄筋の全周にわたり断面の欠損がある。
IV	鉄筋の断面が20%以上欠損している。

3.1 経年による各測定値の変化

3.1.1 経年による中性化深さの変化

表-2に示す分類①の建築物における耐震診断時と本研究時の中性化深さの状況を図-5に示す。なお、耐震診断時は対象部材より採取した1本のコアの中性化深さを、本研究時は原則、同部材より採取した3本のコアの中性化深さの平均値を示す。

中性化深さについては、コアごとのばらつきも見られ、また、耐震診断時のコアが各棟1本であることから、本研究では経年による一様な傾向は認められなかった。経年による傾向は、サンプル数を増やすことで把握できる可能性があるが、本調査では同一部材でも測定値のばらつきが大きかったため、コンクリートの配合計画を確認するとともに、コア採取高さ等の条件をある程度統一することで、調査精度を向上できると考える。

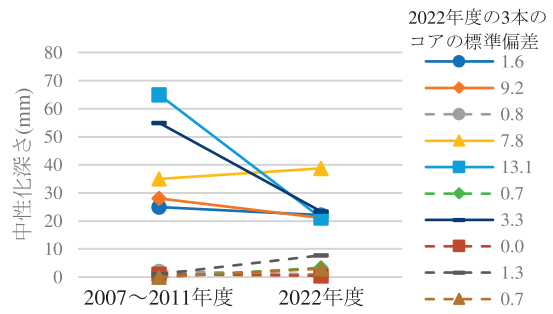


図-5 経年による中性化深さの変化

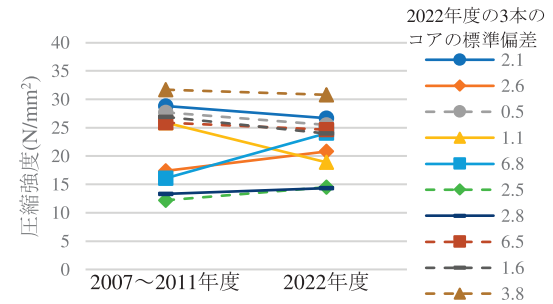


図-6 経年による圧縮強度の変化

3.1.2 経年による圧縮強度の変化

分類①の建築物における耐震診断時と本調査時の圧縮強度の状況を図-6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、本調査は同部材より採取した3本のコアの圧縮強度の平均値に標準偏差を考慮した推定強度を示す。

耐震診断時のコアが1本であり、圧縮強度はコンクリートの打込み状況により、コアの採取高さ等も影響することから、耐震診断時と本調査時の圧縮強度に±20%程度の差異が見られた。中性化深さと同様に、経年による圧縮強度の一様な傾向は認められなかったが、本調査時の3本のコアのばらつきは中性化深さに比べて小さく、サンプル数を増やすことで経年による傾向を把握できる可能性がある。なお、本調査で求めた静弾性係数については、「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」⁶⁾に示される式(1)より求めた値と高い相関性(相関係数0.75)が確認された。

$$E = 21000 \times \left(\frac{\gamma}{23}\right)^{1.5} \times \sqrt{\frac{F_c}{21}} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (F_c \leq 36 \text{ N/mm}^2) \quad \dots(1)$$

ここで、 γ ：コンクリートの気乾単位体積重量 (kN/m³)

F_c ：コンクリートの設計基準強度 (N/mm²)

3.2 含水率と各調査結果との関係

3.2.1 含水率と中性化深さ、圧縮強度の関係

コンクリート表層(表面から深さ10mm)および内部(コア高さの中央、表面から深さ約40~75mm)の含水

率と中性化速度係数との関係を図-7に、圧縮強度との関係を図-8にそれぞれ示す。

中性化はコンクリート表面から進行するため、中性化速度係数はコンクリート内部（相関係数0.28）に比べ、表層の含水率との相関性が高くなった（相関係数0.66）。なお、中性化が10mm以上進行していた7棟のコアについては、図-9(b)に代表されるように、中性化深さを境に含水率が大きく変化している傾向が認められた。

一方、圧縮強度はコンクリート表層（相関係数0.42）に比べ、内部の含水率との相関性が高くなった（相関係数0.73）。圧縮強度試験は、試験装置の加圧板との摩擦によりコア表層が拘束され、コア内部で破壊域が形成されるため、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。なお、静弾性係数と含水率については、相関性が見られなかった。

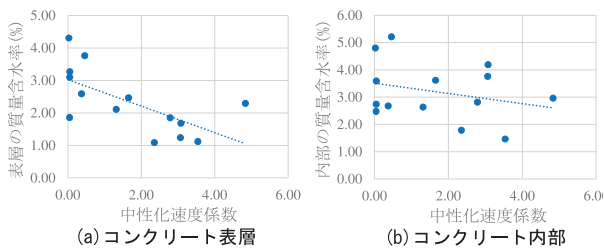


図-7 含水率と中性化速度係数との関係

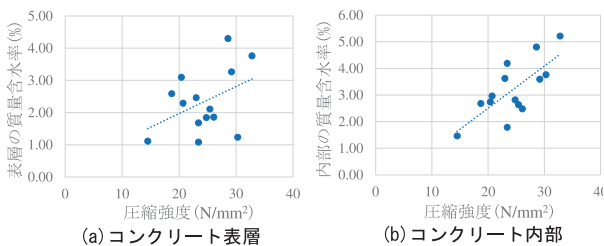


図-8 含水率と圧縮強度との関係

3. 2. 2 含水率と鉄筋腐食の関係

全14棟のうち、鉄筋腐食度の区分Ⅳ（鉄筋の断面が20%以上欠損している）が1棟、区分Ⅲ（鉄筋の全集にわたり断面の欠損がある）が1棟確認された。区分Ⅳおよび区分Ⅲが確認された箇所の概要を表-5に、鉄筋の腐食状況を写真-1に、含水率と中性化深さおよび鉄筋位置との関係を図-9にそれぞれ示す。

区分Ⅳの箇所は、雨掛りのない屋内で他の建築物と比べて含水率が著しく高い状況ではないが、塔屋直下の壁で乾燥収縮ひび割れの周囲に錆汁を伴う漏水跡が見られたため、屋上から雨水の浸入があった可能性が考えられる。

表-5 鉄筋腐食が進行している箇所の概要

鉄筋腐食度の区分	築年数	調査箇所	かぶり厚さ	近傍コアの中性化深さ	鉄筋位置近傍の質量含水率
Ⅳ	50年	屋内耐震壁	26mm+仕上げモルタル15mm	0.2mm	3.83%
Ⅲ	85年	屋外耐震壁	13mm+仕上げモルタル20mm	44.6mm	2.29%

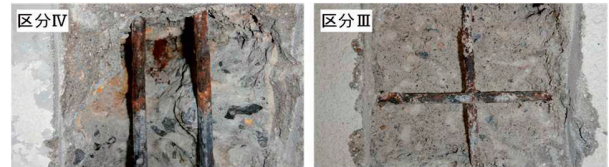


写真-1 鉄筋の腐食状況

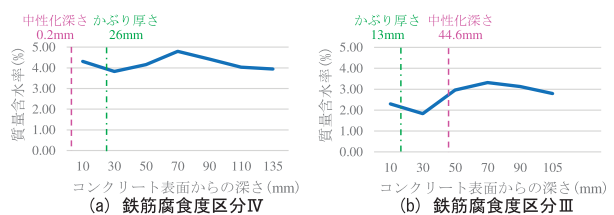


図-9 含水率と中性化深さおよび鉄筋位置の関係

一方、区分Ⅲの箇所は、躯体に顕著なひび割れは認められなかったが、かぶり厚さが小さく中性化が鉄筋位置を超えて進行しており、屋外で雨掛りがあることが鉄筋の腐食を及ぼしたと考えられる。

4. 本研究のまとめ

本研究では、以下の知見を得ることができた。

- ・本研究の調査範囲では、コンクリートの中性化および圧縮強度の経年変化による一様な傾向は認められなかった。ただし、比較対象としたサンプル数が少ないことに留意する必要がある。
- ・上記については、サンプル数を増やすことで、経年変化による傾向を把握できる可能性がある。その際、可能な場合はコンクリートの配合計画を確認するとともに、コア採取高さ等の条件をある程度統一することで、調査精度を向上できると考える。
- ・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かった。
- ・本研究の調査範囲では、鉄筋の腐食の程度と含水率との相関性は認められなかった。

既往の研究⁷⁾では、セメント系材料が炭酸化（中性化）することで生じる炭酸化収縮によって、ペーストやペーストと骨材の境界に微細なひび割れが発生する可能性が示唆されている。しかしながら、JIS A 1108⁸⁾で規定されているコンクリートの圧縮強度試験では、試験

装置の加圧板によるコアへの摩擦拘束の影響から、コンクリート表層の中性化が圧縮強度に与える影響が確認できていない可能性が示唆された。そのため、摩擦拘束を低減した形で圧縮強度試験を実施することで、中性化(経年変化)が圧縮強度に与える影響を把握できる可能性があると考えられる。

5. 懸案事項と今後の計画

本研究においては、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ことが確認された。これは前述したとおり、中性化がコンクリート表層から進行する現象である一方、JIS A 1108⁸⁾で規定されるコンクリートの圧縮強度試験は、試験装置の加圧板との摩擦によりコア端面の表層が拘束され、コア内部で破壊域が形成されることが一因であると考えられる。既往の研究⁷⁾では、セメント系材料が炭酸化(中性化)することで生じる炭酸化収縮によって、ペーストやペーストと骨材の境界に微細なひび割れが発生する可能性が示唆されているが、従来の圧縮強度試験では、この微細なひび割れが圧縮強度に及ぼす影響を評価できていない可能性が考えられる。

試験装置の加圧板との摩擦による圧縮強度への影響は従来より指摘されてきたが、一般的なコンクリートであれば、表面と内部の性質に大きな差異はなく、加圧板との摩擦による影響は少ない。しかしながら、外的因子により表面から劣化が及んだコンクリートでは、表面と内部の性状に差異が生じ、従来の圧縮強度試験で求められる圧縮強度で影響の程度を評価することは、劣化の影響を受けた表面が加圧板との摩擦で拘束され、劣化が影響していないコンクリート内部で破壊域が形成されるため、圧縮強度を危険側に評価される恐れがある。本研究では、中性化においても同様に、従来の圧縮強度試験では中性化進行がコンクリートの圧縮強度に与える影響を考慮できず、危険側の評価となっている可能性に着目し、今後、以下に示す試験の実施を検討している。

5.1 加圧板による摩擦を低減した圧縮強度試験

圧縮強度試験における試験装置の加圧板による摩擦拘束については、コアと加圧板との間に減摩材を挟むことでその影響を低減でき、火災等によるコンクリート表面の性能の変化による圧縮強度への影響の程度を確認できることが、これまでの研究で把握されている⁹⁾。本研究では、中性化促進試験装置を用いて、表面より中性化を進行させた供試体に対して同様に、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用いて圧

縮強度試験を行うことで、中性化の進行が圧縮強度に与える影響を把握することを計画している。

5.2 各深さにおける臨界応力度の測定

5.2.1 コンクリートの臨界応力度

5.1節の方法で求めた圧縮強度では、供試体ごとのコンクリートのばらつきにより、中性化の進行による圧縮強度への影響の程度が確認できない恐れがある。そのため、5.1節の方法に加え、圧縮強度試験に際して供試体の深さごとの臨界応力度を測定することで、中性化が進行している部分とそれ以降での性状の差異を把握することを計画している。

図-10に、コンクリートの圧縮強度試験時における圧縮応力と縦ひずみ、横ひずみ、体積ひずみおよび変形特異点の関係を示す。なお、体積ひずみは縦ひずみと横ひずみから式(2)により算出する¹⁰⁾。変形特異点はコンクリートの体積が収縮から膨張に転じる時点を示し、その時の応力は臨界応力度と定義されている。臨界応力度は、クリープ限界応力や端面摩擦を減じた圧縮強度試験で得られる最大荷重にほぼ相当する¹¹⁾。

$$\varepsilon_V = \varepsilon_C - 2\varepsilon_T \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

ε_V : 体積ひずみ、 ε_C : 縦ひずみ、 ε_T : 横ひずみ

火災の影響を受けたコンクリートでは、火災時の高熱により細骨材および粗骨材の周辺またはセメントペースト間に生じたひび割れが内在し、加熱面側と内部側で性状の差が生じる。コアの圧縮強度試験時における体積ひずみは、加熱面近傍では荷重初期の段階から膨張に進展し、その後、加熱面から内部(コアの軸方向)に向かって徐々に収縮から膨張に転じて臨界応力度に達すると推測される。コンクリート表面から進行する現象である中性化においても同様の現象が生じると考え、臨界応力度の測定を引用したいと考えている。

5.2.2 各深さの臨界応力度の測定方法

臨界応力度の測定においては、JIS A 1149¹³⁾を参考に、

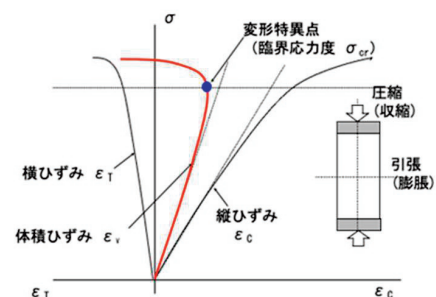


図-10 体積ひずみと臨界応力度¹²⁾

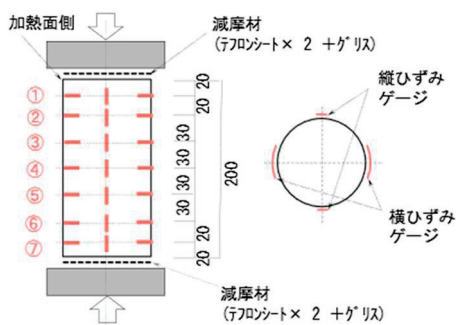


図-11 コンクリートコアのゲージ添付位置¹²⁾

図-11に示す①～⑦の位置に縦ひずみゲージを、その縦ひずみ計測位置から円周方向に90度回転させた軸方向と平行かつ対称な二つの線上に横ひずみゲージを、合計28枚貼付する。この①～⑦のゲージにより圧縮強度試験開始からコアが破壊に至るまでの各縦ひずみおよび横ひずみを測定し、式(2)により体積ひずみを算出して臨界応力度を求めることにより、中性化の進行がコンクリートの機械的性質に与える影響を把握することを計画している。

6. おわりに

本研究においては、サンプル数が少ないこともあり、経年変化によるコンクリートの中性化および圧縮強度の傾向は認められなかった。一方で、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ことが認められ、JIS A 1108⁸⁾で規定されているコンクリートの圧縮強度試験では、試験装置の加圧板によるコアへの摩擦拘束の影響から、コンクリート表層の中性化が圧縮強度に与える影響が確認できていない可能性が示唆された。

この点については、5章に示す内容により、中性化の進行と圧縮強度の関係について、引き続き検討を進めたいと考える。

【参考文献】

- 1) https://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/2022/attach/1419963_00001.html (2024年2月閲覧)
- 2) 小宮敏明ほか：コンクリート工学年次論文集, Vol.39 No.2, pp.1249-1254, 2017.
- 3) (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
- 4) (一社)日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2022」
- 5) (公社)日本コンクリート工学会「コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針2022」

- 6) (一社)日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」
- 7) 中田清史ほか：コンクリート工学年次論文集, Vol.40 No.1, pp.459-464, 2018.
- 8) JIS A 1108：2018「コンクリートの圧縮強度試験方法」
- 9) 春畑仁一ほか：日本建築学会構造系論文集 Vol.84, No.765, pp.1497-1502, Nov 2019.
- 10) 日本コンクリート工学会：コンクリート便覧, 技報堂出版, p78, 1976.2
- 11) 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, 2004.10
- 12) 春畑仁一ほか：GBRC, Vol.47, No.2, 2202.4
- 13) JIS A 1149：2017「コンクリートの静弾性係数試験方法」

【執筆者】



*1 本庄 敬祐
(HONJO Keisuke)



*2 木野 瀬透
(KINOSE Toru)