広島で被爆したRC造建築物における材齢70年のコンクリートの諸物性 PHYSICAL AND DYNAMIC PROPERTIES OF THE CONCRETE AT SEVENTY YEARS AGE WHICH HAD SUFFERED FROM ATOMIC BOMBING IN HIROSHIMA

大久保 孝昭*¹, 松本 慎也*², 流田 靖博*³, 沢木 大介*⁴
Takaaki OHKUBO, Shinya MATSUMOTO, Yasuhiro RYUDA
and Daisuke SAWAKI

The purpose of the experiments in this paper is to clarify the physical and dynamic properties of the concrete at seventy years age which was suffered from atomic bombing at 1945 in Hiroshima. The compressive strength and Young's modulus of the concrete by the side of an atomic bombed place showed the value lower than the other concrete specimens. The coefficient of water absorption of the concrete was very high and it became clear that there was almost no freeze dissolution resistance. And neutralization of concrete was progressing very unusually. Moreover, as concerns the concrete by the side of an atomic bombed place, neutralization from the outdoors side was higher than that of inner side. It is considered to have influenced the above-mentioned examination result greatly that especially concrete temperature rose in 500 degrees C - 750 degrees C. The necessity for performing carefully the maintenance of the RC building which was suffered from atomic bombing was shown by this research.

Keywords: RC building suffered from atomic bombing, Concrete, Neutralization of concrete, Compressive strength, Side of an atomic bombed place
被爆 RC 造建築物、コンクリート、中性化、強度、爆心地側

1. はじめに

筆者らの調査では広島市には 22 件の被爆 RC 造建築物が現存しており、これらの被爆建築物を平和モニュメントとして有効活用しながら保存するか、構造安全性の見地から解体・建替を行うかは、慎重に議論をすべきところである。戦前に建設され 60～70 年が経過した被爆建築物の多くは老朽化が進み、本報で示す広島県立広島商業高等学校本館（以下、調査建築物と記す）も生徒や職員の安全性確保の観点から一昨年に解体された。解体に当たり広島県教育委員会の協力を得てコンクリートや鉄筋の試験片を入手でき、当時の建築構造材料の物理的、化学的な品質について基礎的な試験を行うことができた。

各種試験の結果、調査建築物のコンクリートは被爆、特に高熱によるものと考えられる著しい劣化が認められ、原爆の凄まじさを改めて示すデータが得られた。この試験結果は現存する他の被爆 RC 造建築物のストック管理に有効活用できるデータであるとともに、昭和初期におけるコンクリートの品質としても貴重であり、ここに報告するものである。

2. 試験体および測定内容

2.1 調査対象建築物の概要

本研究の調査建築物の概要は以下の通りである。

名 称：広島県立広島商業高等学校
所 在 地：広島市中区舟入南 6 丁目 7 番 11 号
竣 工：1934 年（昭和 9 年）11 月
主 構 造：RC 造 3 階建（一部塔屋あり）
建築面積：1509m²
延床面積：4802m²
爆心地からの距離：2.88km

図1 調査建築物の平面図及び北立面図

*¹ 広島大学大学院工学研究科 教授・工博

*² 広島大学大学院工学研究科 助教・博士(工学)

*³ 財建材試験センター西日本試験所試験課 係長

*⁴ ㈱太平洋コンサルタント解析技術グループ
グループリーダー

Prof., Graduate School of Engineering, Hiroshima University, Dr. Eng.
Assistant Prof., Graduate School of Engineering, Hiroshima University, Dr. Eng.
Chief Engineer, Nishi-Nihon Testing Center, Japan Testing Center for Construction Materials
Group Leader, Chemical Analysis Group, Taiheiyo Consultant Co. Ltd.

調査建築物は、竣工 1934 年、解体 2004～2005 年の築 70 年の被爆 RC 造建築物であり、現在は記念モニュメントのみを残して新校舎が建築されている。竣工当時の設計資料は残っていないが、(社)広島県建築士協会・建築物耐震診断等評価委員会は本建築物の設計基準強度が 13.5N/mm^2 であったと推定している¹⁾。

立地は広島湾河口近くの天満川沿いであり、H 型の平面形状を有する地上 3 階（一部、塔屋あり）建ての建築物であった。1 階平面図を図 1 (a) に、北立面図を同図(b)に示した。西側 3 階部分が吹き抜けた講堂となっており、中央部分には突出部があり、不整形な建物である。建物の改修に関する記録としては、1984 年に外壁改修及び階段室の改修、1990 年から 1993 年にかけて内部改修が残っている。1983 年に行われた調査²⁾から、本建築物は 1984 年の外壁改修までは被爆後大規模な修繕は行われておらず、外壁には多くのひび割れや剥落が生じており、かなり老朽化が進んだ状態で使用されていたことがうかがえる。また、1984 年の外壁改修後は、本建築物は内外共に仕上げ材のひび割れや剥離がほとんど観察されず、躯体は新たな仕上げ材に保護されていた状態であったことが文献 1) に示されている。

1945 年の被爆当時の調査建築物は陸軍兵器学校広島文教所として使用されており、爆心地からは南西に 2.88km の位置であった。すなわち建築物から見て爆心地は北東の方向となる 図 1 (a) 。原爆によって、校舎本館の窓は破損し、瓦が飛び、雨天体操場は倒壊し、建物疎開作業に動員されていた生徒・教職員多数が犠牲になったとの記録が残っている³⁾。また、文献 4) には、爆心地から 3km 圏内では物質の自然発火が発生したという記録が示されており、建築物の爆心地側面（北東面）は、瞬時に非常に高い熱線を浴びていたものと推察される。さらに、原爆の熱放射線の影響に関するいくつかの記録⁵⁾によると、原爆による熱放射線に直接曝される場所にあった磨いた花崗岩の面がぼろぼろに傷んだ事実が示されている。この現象を生ずるには約 600°C の温度が必要であり、花崗岩の劣化深さから地表面での最高温度の推定が行われたとの記載がある。また、屋根に使われている瓦に火ぶくれ現象が生じた事実が示されており、この現象は、爆心地から 1.2km まで離れた場所でも見つかった。この火ぶくれ現象は、同種の瓦

を用いて実験した結果、瓦は 1800°C 以上に 4 秒よりも短い時間熱せられたと結論付けている。

2.2 試験体の採取位置と種類

試験体は階数、部位および被爆の影響に応じて、以下の採取計画とした。なお、被爆の影響については試験体を採取した部材が爆心地方向に直面しているか否かで分類しており、先の図 1 (a) 中で、網掛け部から採取した試験体を爆心地側試験体、それ以外を非爆心地側試験体と分類した。

柱…… 1～3 階について爆心地側・非爆心地側に分類して採取
梁…… 地中梁および 1～3 階について爆心地側・非爆心地側に分類して採取

壁…… 1～3 階について爆心地側・非爆心地側に分類して採取
床…… 1～3 階および屋根スラブで採取

試験体は各種実験用に直径 10 cm の円柱コアで抜き取った。表 1 に試験体種類を一括して示す。同表に示すように、非爆心地側から 5 1 本、爆心地側から 2 8 本の試験体を得ることができた。

(a) 爆心地側試験体「爆 1 梁」の外観

(b) 非爆心地側試験体「* 1 梁」の外観

写真1 採取した試験体の外観 (例)

表1 採取した試験体

試験体記号		本数	試験体記号		本数
非爆心地側 (建物内含む) から採取	*B梁	6	爆心地側から採取	爆1梁	3
	*1梁	3		爆2梁	3
	*2梁	3		爆3梁	4
	*3梁	5		爆R梁	3
	*R梁	4		爆1柱(内)	3
	*1柱	3		爆2柱	3
	*2柱	3		爆3柱	3
	*3柱	3		爆R柱(内)	3
	*1壁	4		爆1壁	3
	*2壁	3		試験体記号は、 「採取位置一階一部材」 例えば、 爆2梁:爆心地側の2階の 梁から採取した試験体 *2柱:爆心地側ではない2 階の柱から採取した試験体 なお、Bは基礎、Rは屋上ベ	
	*3壁	3			
	*R壁	1			
	*1床	3			
	*2床	3			
	*3床	3			
	*R床	1			

表2 コンクリートの組成・物理的性状に関する試験

試験	試験体及び測定内容
使用骨材の密度・吸水率	採取した試験片より、部位や部材の種類に関係なく、粗骨材を採取し、密度と吸水率を測定した。
コンクリートの単位容積質量・吸水率	爆心地側と非爆心地側から採取した試験体について単位容積質量や吸水率を測定した。
粉末 X 線回折	爆心地側と非爆心地側それぞれについて、採取した試験体において①屋外側から採取した試験体と②試験体内部(中心部)から採取した試料について、コンクリートを構成する物質の同定を行った。
TG-DTA	水和ペースト中の熱重量分析 (TG: Thermogravimetry) と示差熱分析 (DTA: Differential Thermal Analysis) により、特に、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と CaCO_3 の同定と定量分析を行った。なお、試験体は粉末 X 線回折と同様の試験体とした。
細孔径分布	水銀圧入式ポロシメータによりコンクリートの空隙径分布を測定した。試験体は爆心地側と非爆心地側から採取したものとした。
断面観察	試験体の断面について、特にペーストとコンクリートの付着部やひび割れについて、マイクロ스코プにより 25 倍程度の倍率で観察を行った。

なお試験体記号は「採取した部材の方向」「階」「部材」の列記で表すこととし、「採取した部材の方向」とは爆心地側（記号：爆）と非爆心地側（記号：*）とに分類した。例えば、「爆2梁」とは「爆心地側の2階の梁から採取した試験体」、「*3柱」とは「非爆心地側の3階の柱から採取した試験体」を表す。

試験体外観の例として、梁部材から採取した試験体の外観を写真1(a),(b)に示す。同図(a)は爆心地側の試験体であり、幅300mmのコンクリートの屋外側には約50mmのモルタルが仕上げられその上に塗装がなされていた。非爆心地側の梁（同図(b)）では、屋外側に約20mmのモルタルが施されていた。これらのモルタルはコンクリート部分よりも明らかに新しく、1984年の外壁改修時に左官工事されたものと考えられる。柱、梁および壁の屋外側には爆心地側では40～70mm厚、非爆心地側では10～30mm厚のモルタルが施工されていた。これらのモルタルは外周部位の劣化の程度に応じて施工されたことは明らかで、爆心地側の塗り厚が大きいのは被爆の影響と考えられる。すなわち躯体コンクリートは、供用期間70年のうち約20年は、これらの厚いモルタルに保護されてきたこととなる。

なお、以下の試験ではすべての試験体とも、このモルタル部分を外してコンクリート部分のみを取り出して実験に供した。

2.3 測定項目

2.3.1 使用材料およびコンクリートの組成・物理的試験

採取した試験体より、表2に示す物性の計測を行った。本節の実験は、主として被爆の影響がコンクリートの組成や物性に及ぼす影響を検討することを目的として実施した。そのため、コンクリートの吸水率、細孔径分布、粉末X線回折および水和セメントのTG-DTA(示差熱・熱重量分析)は爆心地側と非爆心地側の試験体の比較を行うとともに、図2に示すように試験体断面の屋外側(外部)から採取した試料と中央部(内部)から採取した試料の比較も行っている。

2.3.2 コンクリートおよび鉄筋の力学試験

仕上げモルタルを外したコンクリート部分で $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱試験体を作製し、コンクリートの圧縮強度、ヤング率および割裂引張強度を求めた。ただし、長さが20cmを確保できない試験体もあったため、それらについてはJIS A1107に準じて強度補正を行った。また、現存する被爆RC造建築物の非破壊検査に役立たせることを目的として、超音波伝播速度を測定してコンクリート強度との相関を検討した。

調査建築物には主筋と補強筋として、それぞれ直径が約21mmと約9mmの丸鋼が使用されていたため、地中梁から採取したこれらの鉄筋の引張試験を行った。

2.3.3 コンクリートの耐久性に関する試験

コンクリートの耐久性に関する試験として中性化深さおよび凍結融解試験をおこなった。凍結融解試験は現存する被爆RC造建築物のストック管理に役立たせることを目的として、実際の供用状態に近い気中凍結—気中融解法で試験を行った。試験中の温度は基準試験体の中心部温度で管理し、冷却時は -18°C 、融解時は 6°C に管理し、1サイクルを2時間冷却、散水による1時間融解の3時間として、30サイクル繰り返した。なお、試験体は10

図2 梁・壁試験体から試料の採取

写真2 試験体のカット面から観察される骨材形状

$\phi \times 20\text{cm}$ の円柱供試体とし、5サイクルごとに縦振動により動弾性係数を測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 使用材料およびコンクリートの組成・物理的試験結果

(a) 使用骨材の密度およびコンクリートの単位容積質量・吸水率に関する試験結果

昭和初期に使用されていた粗骨材の品質を確認するため、コンクリート片から直径5mm以上の骨材を無作為に取り出した。粗骨材は川砂利で丸みを帯びているものの、写真2に示すように骨材の粒形は扁平なものも多く、直径は最大で50mmに達する骨材も使用されていた。岩質、色および形状から判断して、A～Hの8種類に骨材の種類を分類し、それぞれの密度、吸水率を測定した。試験結果を表3に示す。同表に示すように絶乾密度は $2.41 \sim 2.59\text{g/cm}^3$ 、吸水率は $0.46 \sim 1.86\%$ と材質の範囲が非常に広い骨材が使用されていた。なお、A～Hの骨材はコンクリート中でほぼ同等量が使用されていたので、同表の平均値(絶乾密度 2.49g/cm^3 、吸水率 1.73%)が粗骨材の概ねの品質を表していると考えられる。

(b) TG-DTA および X 線回折に関する試験結果

図3に爆心地側の2階梁から採取した試験体「爆2梁」のTG(熱重量分析)とDTA(示差熱分析結果)とに関する試験結果を示す。先の図2に示したように、同図(a)は試験体の中央部(内部)から採取した試料の分析結果、同図(b)は屋外側(外部)から採取した試料の分析結果を示している。紙面では観察できないが、試験体は爆心地側からは約10cm程度は赤みを帯びており、内部の灰色とは明らかに異なっていた。同図(b)の外部試験体はこの赤みを帯びた箇所、内部は灰色の箇所から採取した試料である。

表3 試験体から採取して分類した骨材の密度

種類	絶乾密度 (g/cm^3)	気乾密度 (g/cm^3)	表乾密度 (g/cm^3)	吸水率(%)
A	2.41	2.43	2.46	1.86
B	2.42	2.44	2.46	1.82
C	2.44	2.46	2.50	2.82
D	2.47	2.49	2.55	3.25
E	2.49	2.51	2.53	1.71
F	2.55	2.56	2.58	1.31
G	2.56	2.57	2.58	0.60
H	2.59	2.60	2.61	0.46

※気乾密度は 20°C 60%RHの気中で安定させたときの密度

試験体内部(同図(a))は 110℃程度で、セメント中の水和物の結合水の脱離が明確に認められ、また 500℃付近の温度で $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の結晶水の脱離が明確に認められる。このことは、試験体内部では $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が十分に存在していたことを示すものであり、試験体内部はアルカリ性が確保されていたことを示す。一方、爆心地に面する外部の試験体(同図(b))では、100℃前後での水和物からの結合水脱離の反応がほとんど認められない。このことはこの試料の部分が 100℃以上の高熱を受けたこと意味し、恐らく被爆による熱線が影響したものと考えられる。また、同図では、内部試料で認められた $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の結晶水の脱離反応が全く認められず、 CaCO_3 の CO_2 脱離反応が明確に認められた。このことから、外部では試験体の炭酸화가進行していたことが明らかであり、またこの試料が 750℃程度における CaCO_3 の CO_2 脱離の反応が大きいことは 750℃までの温度上昇を経験していないことを表している。これらの試験結果に加え、後述する中性化の異常な進行を考慮した上で、岸谷博士らの受熱温度推定手法⁶⁾に基づき考察すると、調査建築物のコンクリート表面は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の結晶水の脱水温度である約 500℃と上記の 750℃との中間の温度に達したことが推察される。なお、図示はしていないが、この傾向は非爆心地側の梁から採取した試験体(*1 梁)の外部でも同様の傾向であり、熱線は非爆心地側まで回り込んでいたことも併せて推察された。

図 4(a)、(b)には試験体「*1 梁」から採取した試料の粉末 X 線回折結果を示す。図 4(a)は梁試験体の内部、同図(b)は外部の測定結果である。同図 (b) から試験体の屋外側部分から採取した試料では $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が同定されず、 CaCO_3 は内部に比べて多量に認められた。この結果から、非爆心地側においても試験体の外気側では炭酸化が進んでいたことが明確である。

図5 被爆側試験体「爆2梁」の細孔径分布

図3 被爆側試験体「爆2梁」のTG-DTA

図4 非爆心地側試験体「*1 梁」のX線回折試験結果

(c) 細孔径分布および断面観察試験結果

図5に爆心地側試験体「爆2梁」に関して水銀圧入法で得られた細孔径分布を示す。図中、点線で示した細孔径分布は比較用として、健全な AE コンクリートの試験結果を示したものである。比較用の試験体は平均空隙径が $0.003 \sim 0.03 \mu\text{m}$ の細孔が多く存在するのにに対し、試験体「爆2梁」はその10倍程度の平均径の細孔が多く分布している。これは調査対象のコンクリートが近年使用されている AE コンクリートよりもかなりポーラスであり、凍結融解抵抗性や強度が小さく、また中性化も進みやすい組織であることを示唆している。

また、採取したコンクリート試験体の断面を観察すると、特に粗骨材とモルタル部分との層間に空隙がある箇所が目立ち、粗骨材とモルタルとの付着一体性が確保されていない部分が多い。写真3にこの一例を示すが、このような空隙はほとんどの試験体断面で観察された。

写真3 粗骨材とモルタルとの隙間(例)

は 16.2 N/mm^2 であった。非爆心地側の1階から採取した試験体は、 26 N/mm^2 程度の高い強度を示し、平均強度は 20.6 N/mm^2 の値を示した。同図の強度分布の傾向から、圧縮強度の平均値の差 4.4 N/mm^2 は有意差と判断され、爆心地側のコンクリートは非爆心地側のコンクリートよりも強度が小さいと言える。この傾向を確認するため、図7で同一階から採取した梁、柱ごとに爆心地側と非爆心地側の平均強度を比較した。同図より爆心地側のコンクリート強度は非爆心地側に比べて強度が小さくなっていることが明らかと言える。また、図8は爆心地側の柱、非爆心地側の梁から採取した試験体について、強度の階数分布を示している。1階と塔屋階との強度差は約 10 N/mm^2 もあり、上階になるほど強度が低下している傾向が明白である。

3.2 コンクリートおよび鉄筋の力学試験結果

(a) コンクリートの力学試験結果

調査対象の建築物の様々な部位から採取したコンクリート試験体の圧縮試験結果を図6に示す。同図は爆心地側から採取した試験体と非爆心地側の試験体を分けて圧縮強度を示している。爆心地側の試験体強度は $10 \sim 27 \text{ N/mm}^2$ の広い範囲に分布し、平均値

図6 コンクリート試験体の圧縮試験結果

図7 爆心地側と非爆心地側のコンクリート強度の比較

図8 階数の違いによりコンクリート強度分布

図 9 には各部位から採取した試験体のヤング率を示す。圧縮強度同様に、爆心地側から採取したコンクリートのヤング率は明らかに非爆心地側から採取した試験体よりも値が小さい。圧縮強度の試験結果を合わせて鑑みると、爆心地方向からの爆風あるいは熱風等の作用がコンクリートの強度低下を生じさせたものと考えるのが妥当である。

図 10 にはコンクリート試験体の気乾単位容積質量と圧縮強度との関係を示した。コンクリートの単位容積質量は $2.16 \sim 2.39 \text{ t/m}^3$ の範囲に分布している。単位容積質量・強度ともに著しく小さな爆心地側の 2 つの試験体を除くと、爆心地側、非爆心地側ともに、気乾単位容積質量は圧縮強度に無関係に 2.3 t/m^3 程度の値であると言える。

超音波伝播速度と圧縮強度との関係を図 11 に示した。超音波伝播速度は爆心地側、非爆心地側に関係なく、強度が高くなるほど早くなる傾向を示している。両者の関係を直線で近似すると(1)式で表された。(1)式は圧縮強度 20N/mm² のときの超音波伝播速度を 4000m/s として無次元化して表示したもので、近似の相関係数 0.724 であった。

$$F/F_0 = 2.32V/V_0 - 1.32 \quad (1)$$

F:コンクリートの圧縮強度 N/mm^2

Fo:基準強度 20N/mm²

V:コンクリートの超音波伝播速度 m/s

V_0 : 基準速度 4000m/s

図 11 および(1)式で示した圧縮強度と超音波伝播速度との関係

は、広島市あるいは長崎市に現存する被爆 RC 造建築物の診断での非破壊試験による強度推定に役立つものである。

なお、図では示していないがコンクリートの引張強度は5カ所の部材のコンクリートについて試験を行い、 $0.52 \sim 2.92 \text{ N/mm}^2$ の範囲に分布した。平均値は 1.8 N/mm^2 であり、圧縮強度の約 1/10 の値を示した。

(b) 鉄筋の引張強度試験

本調査建築物に使用されていた鉄筋はすべて丸鋼であった。地中梁から採取した 2 種類の径の鉄筋について、表 4 に引張試験結果、図 12 に応力-ひずみ曲線の測定例を示す。表 4 に示すように、 $\phi 9$ 鉄筋のほうが、強度、ヤング率および降伏点ともに大きな値を示した。現在の JIS 規格品と比較すると、概ね $\phi 21$ の丸鋼は SR245、 $\phi 9$ の丸鋼は SR295 と同程度の力学性状を有していることが分かる。図 12 に示した応力-ひずみ曲線も弾性範囲、明確な降伏棚およびひずみ硬化の挙動などは近年の鋼材と同様の傾向を示している。

3.3 コンクリートの耐久性に関する試験結果

(a) 中性化深さ

図 13 および図 14 に中性化試験結果を示す。中性化試験は各部材から仕上げモルタルを外し、コンクリート部分の屋外側表面と室内表面側から測定した。図 13 は屋外側からの中性化深さ、図 14 は室内側からの中性化深さを示しており、ともに(a)爆心地側

試験体と(b)非爆心地側試験体に分けて示している。両図から本建築物の中性化深さはそのほとんどが 50mm～150mm の範囲に分布し、全体の平均値は 100mm 以上に達しており、中には 200mm に達する部位も存在した。本調査建築物の数年前に建設された同潤会アパートでは、中性化深さは 30～40mm の範囲に分布しており、屋外側の中性化係数が 1.2～3.5mm/年¹²程度であったことが報告されている⁷⁾。本調査建築物の屋外側の中性化係数は平均値で 16.0 mm/年¹²に達しており、同時期の建築物のコンクリートと比較しても明らかに異常と言える。しかも先の 2.2 節に示したように、これらのコンクリートは内外ともにかなり厚い左官モルタルでこの数十年間は保護されていたことを考慮すると、この異常な中性化は被爆の影響であることを示唆している。

図 13、図 14 において爆心地側と非爆心地側の部材の中性化を比較すると、爆心地側のコンクリートの中性化が大きくなっている。また、屋外側と室内側を平均値で比較すると爆心地側では、屋外側(図 13(a))の方が室内側(図 14(a))よりも中性化深さは大きな値を示している。本調査建築物が長年にわたって学校の教室として使用されてきたこと、および屋外側の左官モルタルは室内側に比べて 50～70mm と厚かったことを考慮すると、室内側の中性化が大きいことが当然であるが、実際の計測値は逆の傾向を示している。以上の結果に、先の図 3 に示した TG-DTA 示差熱・熱重量分析結果および本調査建築物の外壁側に戦後左官モルタル仕上げが施されていることを合わせて考えると、この異常な中性化には被爆が影響していることを示している。すなわち、先の図 3 で示した 500℃付近における水酸化カルシウム結晶水の脱離が被爆時に既に生じたものと考えられる。この症状は非爆心地側、建築物内部まで及んでおり、原爆に伴う熱風、火災さらには放射線が影響していることを強く示唆するものである。

また先に示した外壁補修前年 1983 年の調査²⁾では、南面・西面(非爆心地側)の外壁のひび割れや剥落は北面・東面(爆心地側)よりも著しいことが示されている。このため大規模外壁改修の 1984 年までは、南面・西面(非爆心地側)の外壁仕上げ材はひび割れや剥離が著しく、内部の躯体コンクリートを保護する能力は北面・東面(爆心地側)よりも劣っていたと考えられる。しかし、これまでの実験結果に示すように、北面・東面(爆心地側)の外壁におけるコンクリートは南面・西面(非爆心地側)に比べて強度が低く、中性化深さは大きいという実験結果が得られている。このことも北面・東面(爆心地側)のコンクリートの劣化には原爆による熱風等の影響が大きかったことを示す。

表4 鉄筋の引張試験結果

試験体	φ21丸鋼		平均値	φ9丸鋼			平均値
	a	b		c	d	e	
鉄筋径(mm)	21.7	21.4	21.6	9	9.2	8.6	8.9
引張強度(N/mm ²)	454	389	422	498	480	461	480
ヤング係数(N/mm ²) (×10 ⁵)	2.03	2.13	2.08	2.12	2.24	2.20	2.19
降伏点(N/mm ²)	284	265	275	334	331	337	334
降伏比	0.625	0.682	0.654	0.671	0.687	0.690	0.682
絞り(%)	63.8	65.8	64.8	59.4	56	64.1	59.8

図12 応力-ひずみ曲線の測定例

(b) 凍結融解試験結果

図 15 および図 16 に凍結融解試験結果を示す。図 15 は凍結融解サイクルの増加にともなう相対動弾性係数の変化を示した。図中○印で示した実験値は比較用試験体(現行 JIS 規格に適合する呼び強度 18 の AE コンクリート)の試験結果を示す。図 15 においてこの比較試験体は動弾性係数の低下はほとんど認められないが、本調査建築物のコンクリートは凍結融解の数サイクルで動弾性係数は低下し、10 サイクルで爆心地側コンクリートは 70%、非爆心地側コンクリートは 80%まで低下している。爆心地側のコ

図13 コンクリートの屋外側からの中性化深さ

図14 コンクリートの室内側からの中性化深さ

図15 凍結融解試験における試験体の相対動弾性係数の変化

ンクリートは20サイクルで相対動弾性係数は20%以下まで低下し、試験体はほぼ崩壊した。また、爆心地側の方が凍結融解に対する抵抗性は小さいことが同図より分かる。図16ではこの間の質量変化率を示しているが、調査建築物のコンクリートは凍結融解試験により吸水で質量が増加し、最後にはポップアウトしていることが分かる。図17に試験体の吸水率を示したが、この値は約40年前に作製されて屋外暴露されていた人工軽量骨材コンクリートよりも大きな吸水率⁸⁾を示している。この吸水率の大きさと図5に示した細孔径分布が凍結融解抵抗性の低さの主要因と考える。

4. まとめ

本調査研究は広島で被爆したRC造建築物における材齢70年のコンクリートの諸物性を試験したものである。調査建築物のコンクリートに及ぼす被爆の影響は、爆心地側の試験体と非爆心地側・コンクリート内部の試験体との比較から以下のようにまとめられる。

爆心地側のコンクリートの圧縮強度、ヤング率は非爆心地側よりも低い値を示し、また階数が高くなるほど強度は低下する傾向を示した。調査建築物のコンクリートは爆心地側、非爆心地側に関わらず、非常にポーラスで吸水率も高く、凍結融解抵抗性がほとんど無いことが明らかとなった。

コンクリートにはかなり厚い左官モルタルが施されていたが、中性化は異常に進んでおり、同時期に建設された同潤会アパートの中性化速度係数の10倍程度の値を示した。また、学校の教室として使用されていたにも関わらず、爆心地側のコンクリートは屋外側が室内側よりも中性化が進行していた。また、TG-DTAおよびX線回折試験より、コンクリート表面には $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が同定されず、 CaCO_3 は内部に比べて多量に認められた。

これらの試験結果は被爆の影響が大きいことを示すもので、特にコンクリート温度が被爆時に概ね $500^{\circ}\text{C} \sim 750^{\circ}\text{C}$ 間に上昇したと考えられる。本報で示した実験は被爆の凄まじさを改めて示す結果であり、また、現存する被爆RC造建築物の維持管理を慎重に行うことの必要性を示すものである。

図16 凍結融解試験における試験体の質量変化

図17 コンクリートの吸水率

〔謝辞〕本研究に用いた試験体は広島県教育委員会より快く提供いただいた。試験体の採取・加工に当たっては菅野俊介広島大学名誉教授、(財)建材試験センター西日本試験所 岸賢蔵所長、同 白木良一上級専門職のご指導と協力を得た。データの整理に当たっては広島大学卒論生の山下真季さんの協力を得た。末尾ながら記して謝意を表す。

参考文献

- 1) (社)広島県建築士協会・建築物耐震診断等評価委員会：建築物耐震診断等評価書(広島商業高等学校・校舎(1号棟)耐震診断、p 評-1, 2004.11)
- 2) 島津孝之：広島県教育委員会委託 県立広島商業高等学校校舎の耐力度調査報告書、1983.12
- 3) 広島市：被爆50周年ヒロシマの被爆建築物は語る—未来への記憶、広島平和記念資料館、1996.3
- 4) 日本学術会議原子爆弾災害調査報告書刊行委員会編、原子爆弾災害調査報告集 第一分冊・理工学編、日本学術振興会刊、1953.3
- 5) 米国国防省及び米国原子力委員会、原子爆弾の効果、マックグロウーヒル書籍会社、1950
- 6) 岸谷孝一、森実：火害を受けた鉄筋コンクリート建物の受熱温度の推定、セメント・コンクリート No302, 1972.4, pp13-22
- 7) 古賀一八、吉岡昌洋：同潤会アパートの躯体と仕上げ技術を探る、セメント・コンクリート No686, 2004.4, pp26-35
- 8) 大久保孝昭 他6名：長期間屋外暴露された人工軽量骨材コンクリートの諸性状、日本建築学会構造系論文集 第561号、2002.11, pp23-29

(2007年7月10日原稿受理、2007年10月3日採用決定)