

広島市平和記念公園レストハウスの耐震改修計画における建物調査

Examinations for Seismic Retrofit Design in Hiroshima City Peace Memorial Park Rest House

東 健二*1、森本 敬久*2、佐藤 大輔*3

1. はじめに

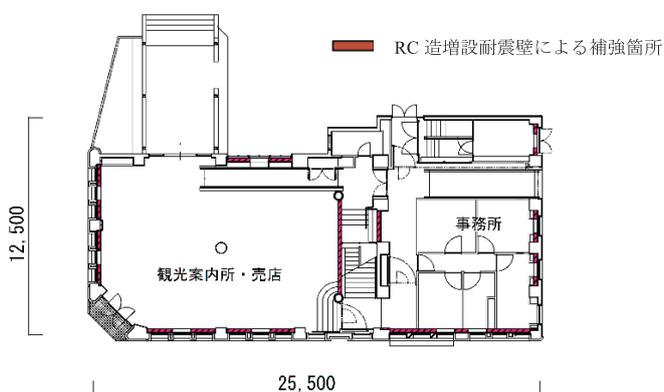
本建物は、1929年（昭和4年）に大正呉服店として建設された。設計者は、大阪を中心に活躍した建築家の増田清氏である。1945年8月6日に上空600mで炸裂した原子爆弾により、RC造の屋根は大破した。建設地の中島本町は爆心地より水平距離で170mであり、現存する建物としては原爆ドーム（160m）に次いで爆心地に近い建物である。被爆後、市の東部地域の復興拠点として活用され、1982年からは平和記念公園レストハウスとして公園を訪れる人々の憩いの場として活用されてきた。老朽化が目立つため、2015年より被爆の歴史や平和への願いを共用する場として改修計画がすすめられ、2018年2月より着手した改修工事は2020年7月に竣工し、リニューアルオープンしている。

本事業は、耐震診断業務としてまず既存建物の耐震性

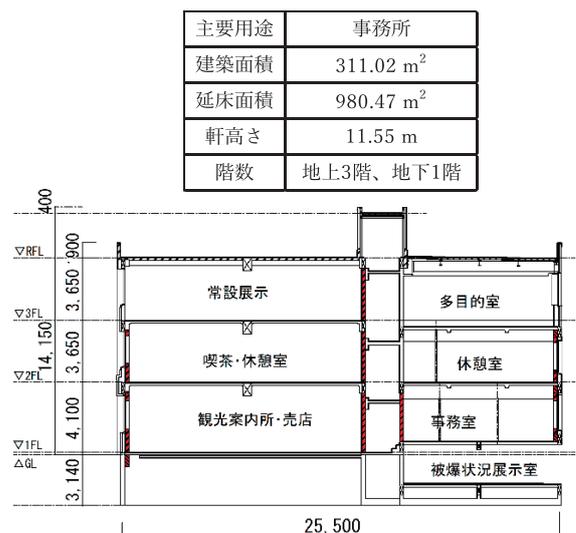
能と補強による継続使用の可能性について把握し、この結果を基に補強計画立案、耐震改修実施設計、改修工事と進められた。耐震診断業務においてコンクリートコアの採取により、躯体のコンクリートに局所的な空洞・欠損、ひび割れ、豆板などの不具合が見られることは判明していたが、その原因については不明であった。本報告は、補強計画立案から改修工事の準備期間に、補強量の策定とその妥当性の確認を目的として行った調査結果について示すものである。

2. 建物概要と耐震補強

建物と補強計画の概要を図-1に示す。建物は、鉄筋



(a) 1階平面図



(b) 断面図

図-1 建物概要

*1 AZUMA Kenji : (株) 新井組建築本部統括技術部 (旧 (株) URリンケージ西日本支社 都市再生本部)

*2 MORIMOTO Takahisa : (株) URリンケージ西日本支社 都市再生本部

*3 SATO Daisuke : (株) コンステック 調査診断技術本部

コンクリート造で地上3階、部分的に存在する地下1階の事務所建築である。補強前の I_s 値は、0.10~0.46であり、いずれの階も目標値の0.75を下回っていた。特に3階は、屋根の小屋組が木造となっており剛床仮定が成立しない。また、柱頭部で大梁に拘束されていない柱が存在し、これらは3階床からの突出柱として評価されるため I_s 値が著しく低い結果となった。補強前の建物は、XY両方向とも壁が多く概ねルート1の壁量を満足しているため、補強工法は強度型のRC造耐震壁の増設とした。建物外周の増設耐震壁は、建物の外観に影響がないように室内側に設置し、複数ある既存開口の1つを採光として残すようにして、残りの開口は外部からは飾り窓として見えるように閉塞した。補強箇所は、合計23構面である。最上階については、被爆により木造の小屋組となっていたが、剛床仮定を成立させることと耐火性能の確保のために、RC造の床を設置する計画とした。補強により I_s 値は0.79~1.35となり、目標の耐震性能を確保した。

3. 調査概要

実施した調査の概要を表-1に示す。原設計図書が存在せず被爆の影響も不明であったため、補強工事時に詳細が判明し、計画した補強量に不足が生じることも考えられた。改修工事時に意匠、設備計画を含めて補強計画を再検討することは工期上困難であったため、補強計画

表-1 調査一覧

No.	調査項目	調査目的	調査結果概要
1	貫入抵抗法	躯体コンクリートの引締強度のばらつき	被爆によるコンクリート強度のばらつきへの影響が顕著でないことを確認
2	2、3階スラブ貫通コア採取	床の設計重量	一般階床の構造躯体厚および仕上げ厚を確認
3	アンカー引張およびせん断試験	アンカー設計耐力	設計耐力以上であることを確認
4	鉄筋の引張試験	使用材料の機械的性質	主筋およびせん断補強筋の材料強度を確認
5	屋内柱の開孔	躯体内部の鉄筋のさび、コンクリートの状態、仕上げ厚さおよびひび割れ	柱内部の鉄筋は腐びが少なく、コンクリートは所々に本具合が存在することを確認
6	1階スラブ	上階床の部材厚さおよび上階下部の状態等	設計時の上階に現況の上階を増し打ちしていることを確認
7	赤外線法（アクティブ法）	屋内における躯体内部の空洞等の変状	柱・梁・スラブ下面等で仕上げの浮きや躯体内部の空洞を確認
8	赤外線法（パッシブ法）	屋外における仕上げの浮き等の劣化の検出	東面、西面および南面で仕上げの浮きを確認
9	電磁波レーダ法	躯体内部の空洞等	建物の内外部で豆板や空洞を確認
10	常時微動計測	建物の振動性状	「直接基礎」または「劣化した木杭基礎等」である可能性
11	強制加振による固有振動数測定	柱、梁等の固定状況	構造的な欠陥が内在している可能性のある部材を確認
12	衝撃弾性波法および超音波法	躯体内部の空洞、ひび割れ等	構造的な欠陥が内在している可能性のある部材を確認
13	衝撃弾性波法	基礎梁の有無	想定した深さに基礎梁が存在しないことを確認
14	ドリル芯による中性化試験	コンクリートの中性化深さ	外壁面の方向により中性化深さの差がないことを確認
15	TG-BTA分析	コンクリートの受熱履歴	コンクリートの受熱履歴は、被爆時の周囲温度より低いことを確認

立案時においては、最終的に補強量が変わることがない精度が求められた。このため、建物全体のコンクリートの状態をその原因とともに把握する必要があったが、建物の歴史的価値により、調査は一部を除いて非破壊で実施することが要求された。実施した調査は表-1の1~4である。

耐震改修実施設計時において、補強部材の納まりの確認を行うために建物を閉鎖し、スパン、階高、部材寸法を詳細に計測した。また、意匠改修の実設計により仕上げを含む設計荷重の見直しを行った。改修工事の準備期間に撤去可能な仕上げを取り除いた後、補強案の最終確認を行うために躯体表面に対して非破壊試験を実施した。実施した調査は、表-1に示す5~15である。以上の結果を取りまとめて、改修設計の変更申請を行った。

4. 補強計画立案時におけるコンクリート強度のばらつきに関する調査

4.1 調査目的

補強計画を行うために建物全体のコンクリートの状況の把握を目的として、ウィンザーピン貫入抵抗法（以下、ウィンザーピン法）によるコンクリート強度調査を行った。写真-1にウィンザーピン試験機と反発速度比法によるシルバーシュミットを示す。ウィンザーピン法による強度試験は、レンガ造の歴史的建造物における目地の強度調査¹⁾等での実績を有している。非破壊試験を原則としたが、ある程度の仕上げの撤去や躯体の軽微なはつりは許容されたことと、多くの測定が必要で簡易的に計測できる手法であることにより、本調査法を選定した。

4.2 調査方法

ウィンザーピン法は、直径100mm程度の仕上げを撤去し躯体面をはつり出し、このコンクリートの表面に



写真-1 ウィンザーピン法試験機およびシルバーシュミット

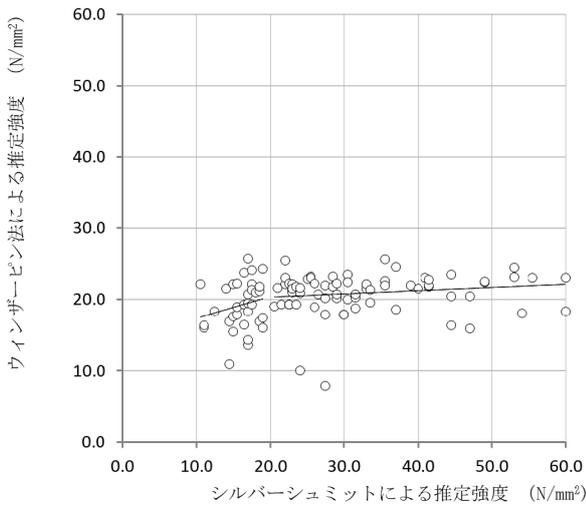


図-2 ウィンザーピン試験と
シルバーシュミット試験結果の比較

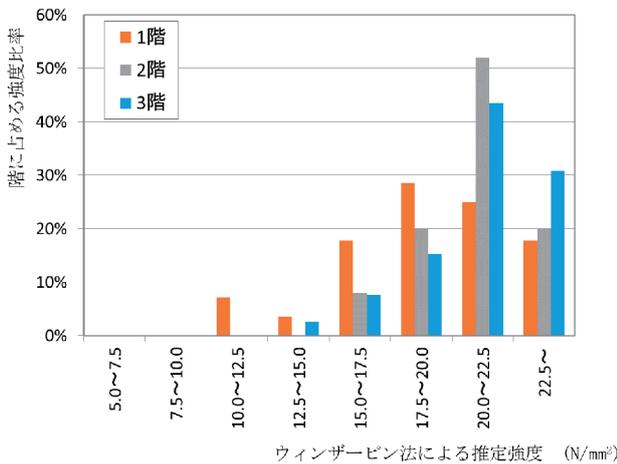


図-3 階によるコンクリート強度のばらつき

ピンを一定の力で打ち込み、その貫入深さでコンクリート強度を推定する調査方法である。貫入深さ測定に用いるマイクロメータは測定面が平滑である必要があり、測定が行えないことがあった。このため、比較的少ない平滑面で測定することが出来るシルバーシュミットによる測定を併用した。両測定とも1調査箇所当り2~3回測定し、これらの平均値を1測点とした。有効測点数は、173点でコンクリート強度の階によるばらつきと部材の高さによるばらつきについて検討した。

4.3 調査結果

シルバーシュミットとウィンザーピン法による測定結果の比較を図-2に示す。22.5 N/mm²未満においては、結果のばらつきはあるものの両推定強度に相関性が見られるが、22.5 N/mm²以上については、ウィンザーピン法によって測定される推定強度が低くなる傾向がある。しかし、本調査の目的は設計基準強度を定めることではなく、コンクリート強度のばらつきの状況を把握しその

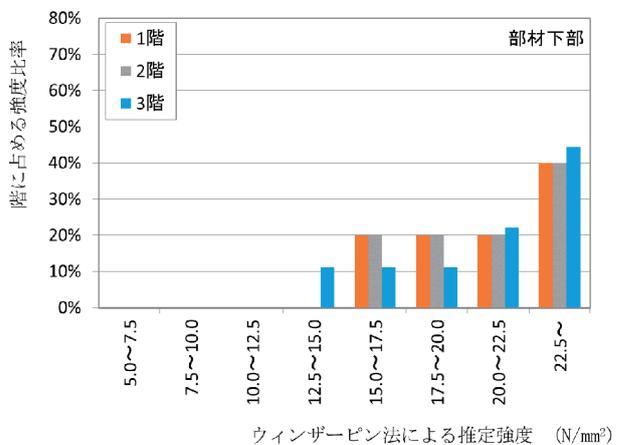
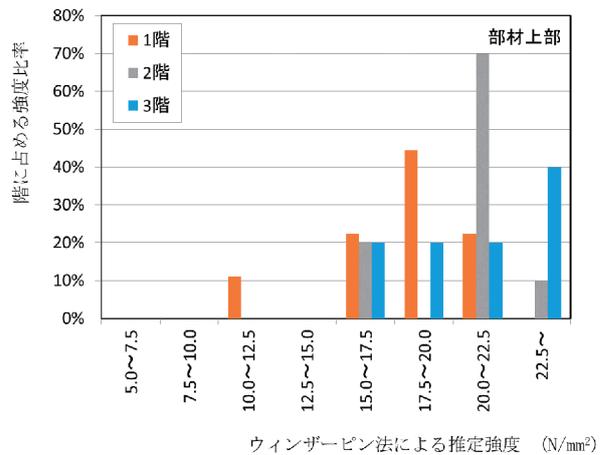


図-4 部材の上下位置におけるコンクリート強度のばらつき

原因を明らかとすることである。補強計画立案時においては、診断時に行ったコア試験により算出した強度を設計基準強度として採用しており、この設計基準強度の範囲11.5~19.3 N/mm²での強度のばらつき状況が、ある程度推定できれば問題ないと判断し、以下、ウィンザーピン法による推定強度結果について示す。

階による推定強度のばらつきを図-3に示す。下階ほど強度が低い傾向にある。1階については、10.0 N/mm²程度の箇所も存在するが、2階以上では概ね15.0 N/mm²以上であった。本建物の建設年が1929年(昭和4年)であることから、同年に制定された日本建築学会「コンクリート及び鉄筋コンクリート標準仕様書」は運用されておらず、コンクリートの施工技術は確定していなかったと思われる。本建物について、施工が進むうちにコンクリートの品質が安定したと推察される。

部材の上下における推定強度のばらつきを図-4に示す。被爆により発生した火災の影響は部材の上方に表れてい

たことが予想される。また、被爆による損傷は、当時の記録写真より屋根スラブや上部躯体で顕著であり、3階部分のコンクリートの劣化が懸念されたが、測定結果には明確なばらつきの傾向は見られなかった。

5. 耐震改修実施時における部材内部のコンクリートの状態に関する調査

5.1 調査目的と調査方法

鉄筋の発錆補修、コンクリートの断面修復、ひび割れの充填等の補修量を把握するため、詳細な調査を行った。建設当時の仕上げを極力保存することが望ましいが、経年劣化により今後の使用に支障をきたす箇所も見られたため、これらについては撤去することが許可された。また、外壁面については、仕上げを撤去し再現することを基本としたが、本建物の象徴的な外観である南面の一部については、保存が義務付けられたため、詳細に下地等の状態を調査した。表-1の5～15の調査を行ったが、ここでは7、8、11、14、15について示す。

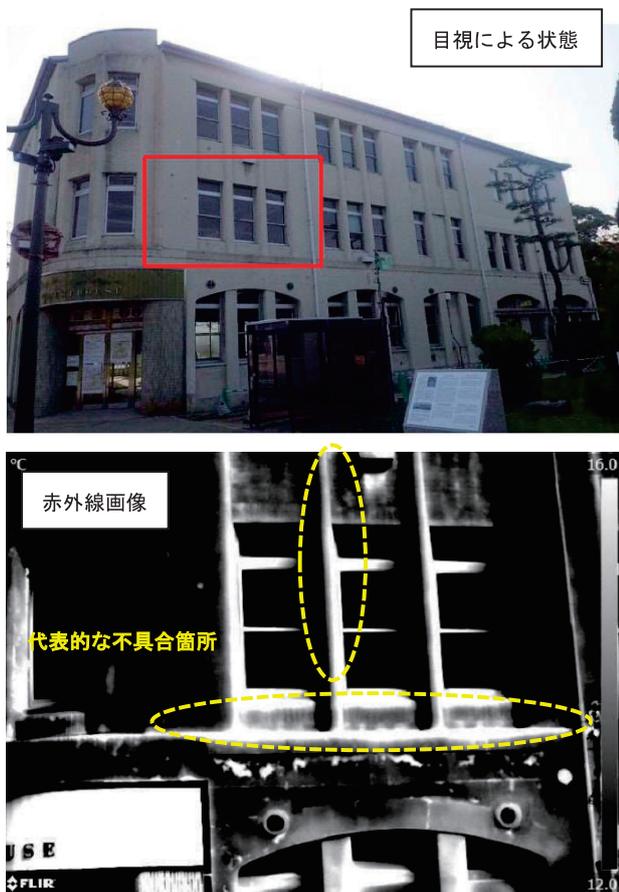


写真-3 パッシブ法による赤外線測定
(西面外壁)

5.2 赤外線調査の方法と結果

(1) 調査方法

仕上げや躯体内部の空洞を検出するため、赤外線サーモグラフィによる調査を行った。外壁面については日射受熱量が最大となる時間帯で自然発生的な熱移動や発熱による温度分布を利用したパッシブ法によった。室内については、自然発生的な熱移動が期待できないためジェットヒータにより室内温度を上昇させて測定するアクティブ法による赤外線調査を行った。室内温度は、外気温+10℃を目標とした。本赤外線調査²⁾により、外壁面ごとおよび各室内での広い範囲の状態を把握した。



写真-2 赤外線測定機器の例



写真-4 アクティブ法による赤外線測定
(室内側から東面外壁)

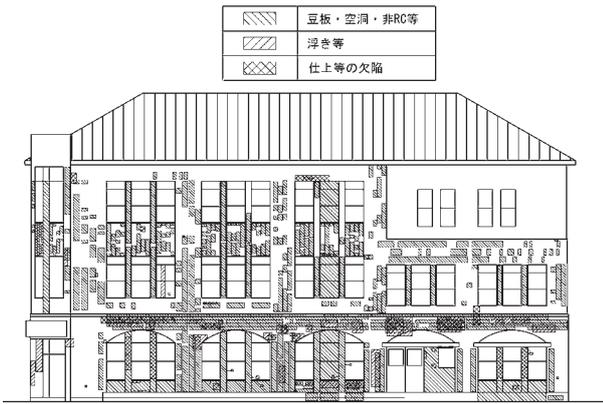


図-5 西面の外壁の劣化状況

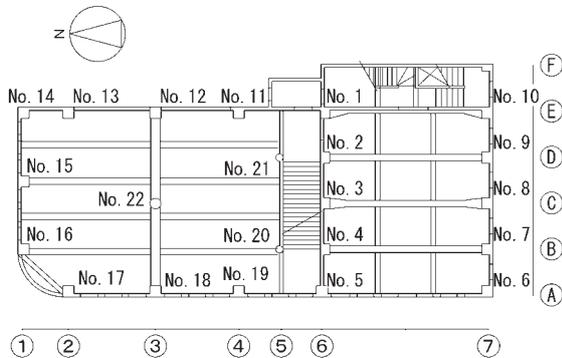


図-6 調査位置

(2) 調査結果

赤外線による調査状況を写真-3、4に示す。西面外壁には梁部に打継ぎと思われる水平ひび割れが、半円柱の飾り柱においては仕上げの浮きと思われる箇所が多く見られた。室内から測定した東面外壁においては、コンクリートの不具合と思われる箇所が多く見られた。写真-4に示すように、2m程度のせん断ひび割れもしくは豆板と思われる箇所も見られた。室内においては、壁面、床下、梁底面など局所的に仕上げが浮いていると思われる箇所が所々に見られた。これらについては、目視、打診および電磁波レーダーによる探査を併用して図-5に示すように劣化図を作成し、補修の方法を定めた。

5.2 強制加振による固有振動数測定調査

(1) 調査方法

重量5kgのボールを長さ750mmの振り子の先につけ、これを調査する柱に衝突させて衝撃を与え、両端固定条件における1次振動モードを加速度計により200Hzサンプリングで測定した。柱の固有振動数は、FFT解析およびリサージュから推定した。FFT解析に用いるデータ点数は64点とし、データ補正およびスペクトルの平

表-2 柱の固有振動数

(a) 南北方向

柱	2階		3階		
	固有振動数 (Hz)	固有振動数比	固有振動数 (Hz)	固有振動数比	
A通	No.17	54.69	0.78	70.31	0.69
	No.18	70.31	1.00	101.56	1.00
	No.19	70.31	1.00	70.31	0.69
	No.5	109.39	1.00	-	-
	No.6	109.39	1.00	-	-
E通	No.14	109.38	1.00	78.13	0.77
	No.13	109.38	1.00	101.56	1.00
	No.12	101.56	0.93	78.13	0.77
	No.11	93.75	0.86	85.94	0.85
	No.1	109.38	0.93	-	-
No.10	117.19	1.00	-	-	

(b) 東西方向

柱	2階		3階		
	固有振動数 (Hz)	固有振動数比	固有振動数 (Hz)	固有振動数比	
1通	No.14	85.94	0.52	140.63	1.00
	No.15	164.06	1.00	132.81	0.94
	No.16	93.75	0.57	101.56	0.72
3通	No.18	54.69	0.58	39.06	0.56
	No.22	93.75	1.00	70.31	1.00
	No.12	31.25	0.33	39.06	0.56
6通	No.5	78.13	0.67	-	-
	No.4	117.19	1.00	-	-
	No.3	93.75	0.80	-	-
	No.2	93.75	0.80	-	-
7通	No.1	78.13	0.67	-	-
	No.6	132.81	1.00	-	-
	No.7	132.81	1.00	-	-
	No.8	125.00	0.94	-	-
	No.9	117.19	0.88	-	-
No.10	132.81	1.00	-	-	

滑化は行わない。各柱の固有振動数を中心周波数帯としたバンド幅10Hzのバンドパスフィルタとした。調査位置を図-6に示す。測定した柱は、1階12カ所、2階22カ所、3階3カ所の合計37カ所である。

(2) 調査結果

表-2に、2階および3階について方向別に調査結果を示す。柱に対する梁の取り付け方も影響していると考えられるが、南北方向について、A通、E通とも固有振動数のばらつきは小さく、柱に構造的な大きな影響を及ぼす局所的な損傷が内在する可能性は低い。東西方向に

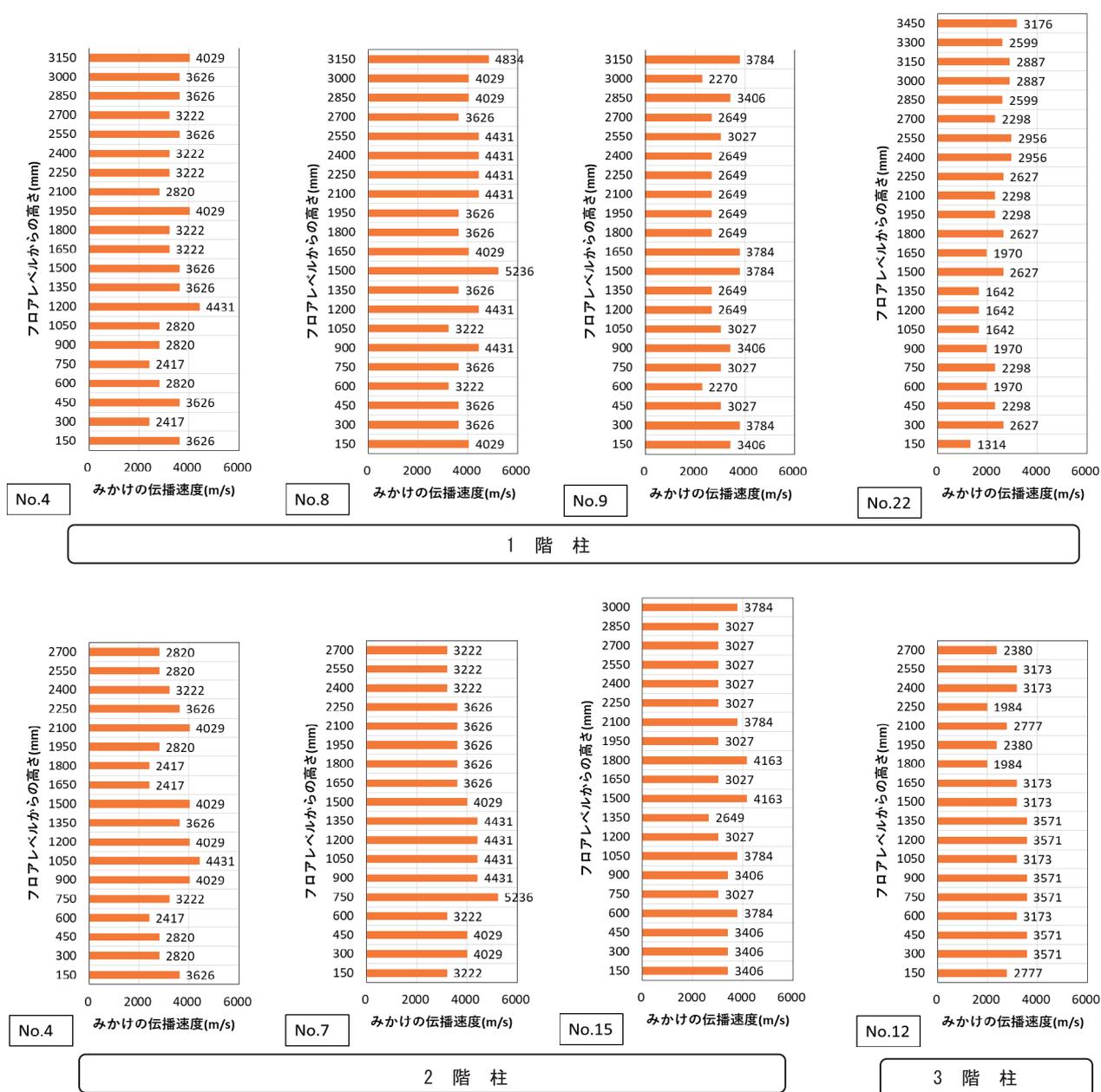


図-7 衝撃弾性波調査によるみかけの伝播速度の分布

については、内柱に比べて外柱の固有振動数が小さい傾向にある。爆心の位置は建物の東西方向であること、東西方向に配置されている階段室周囲の耐震壁に一方のせん断ひび割れが生じていたことから、南北方向より東西方向の水平力が大きかったと推察される。

5.3 衝撃弾性波法による伝播速度測定調査

(1) 調査方法

調査は仕上げの撤去等により調査箇所のコンクリート表面が平滑でなく、超音波法の適用が困難と判断されたため、一軸加速度計およびデジタルオシロスコープを使用した衝撃弾性波法を用いた。鋼球の打撃により発生した弾性波を、コンクリート表面または内部の振動として

一軸加速度計により測定した。得られた時刻歴波形のFFT解析によって、打撃面と対向する面との間で生じている弾性波の多重反射の卓越周波数を求め、この周波数と入力面から対向する面までの距離を用いてみかけの伝播速度を算出した。固有振動数測定の結果より建物の外周部に損傷が内在する可能性が高い柱が多いことから、これらを中心にさらに調査を行うこととした。

(2) 調査結果

図-7に各柱のみかけの伝播速度の分布を示す。コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書³⁾による判定指標によると、コンクリートの品質は、伝播速度が2100 m/s以下では「不可」、2100~3100 m/sでは「不

良」とされる。1階について比較的ばらつきが大きく、No.9のように全体的に値が低い柱が存在するが、これに近接するNo.8の値は良好である。2100m/sを下回ったのは、No.22であるが、これは仕上げ撤去やドリル削孔により、柱主筋の過密によるコンクリートの充填不足が原因であることを確認している。

2階について、高さ方向に局部的に値が小さい柱が存在するが全体的なばらつきは比較的小さい。1階と同様にNo.4の柱に値が低い箇所が見られた。階段室の耐震壁付きの柱であるが、仕上げ撤去により耐震壁にせん断ひび割れが生じていることを確認しており、この影響と思われる。3階については、No.12の柱頭部で2100 m/sの値を下回る箇所が見られた。同位置は被爆により解体した屋根スラブを支えた柱であり、接続する梁においても大きな損傷が見られた。柱においても大きな損傷を受けていると考えられる。仕上げ撤去やアンカー打設時の削孔によりコンクリートの状態を確認することを原則としているが、アンカーを打設しない箇所については衝撃弾性波による測定結果を参考にドリル削孔を行い、コンクリートの状態を確認して断面の補修方法を定めた。

5.4 受熱温度とその影響に関する調査

(1) 調査方法

改修により撤去される前に外壁面からコンクリートコ

アを採取し、コンクリートコアの屋外側0~20mm程度の深さを分析試料として、示差熱・熱重量分析TG-DTAにより受熱温度の推定を行った。また、コンクリートに直径10mmのドリルビットで削孔し、フェノールフタレイン1%水溶液を浸した濾紙の呈色反応によって中性化深さを測定⁴⁾した。調査箇所は、図-8に示すようにTG-DTAのサンプリング2カ所と、中性化深さ9カ所である。以上によりコンクリートが被爆時に受けた温度とその影響について考察する。

(2) 調査結果

図-9に各外壁面の中性化試験結果を示す。爆心点は、本建物の水平で約170m、上空600mの仰角74度とほぼ真上からの被爆であり、外壁面の中性化深さは方位による明確な傾向は見られない。過度に中性化が進行している箇所と全く中性化していない箇所に2分化されており、施工品質の影響も考えられる。4章で示した室内側の調査に加え、外壁面でウィンザーピン法によるコンクリートの推定強度の状況を確認した。図-10にウィンザーピン法による推定強度の結果を示す。1階については、コンクリートの推定強度が低い傾向にあるが最低で14.7N/mm²と耐震補強計画立案時の設計基準強度11.7N/mm²を上回っている。2、3階については、概ね20.0N/mm²と良好であった。これらは、4章で行った

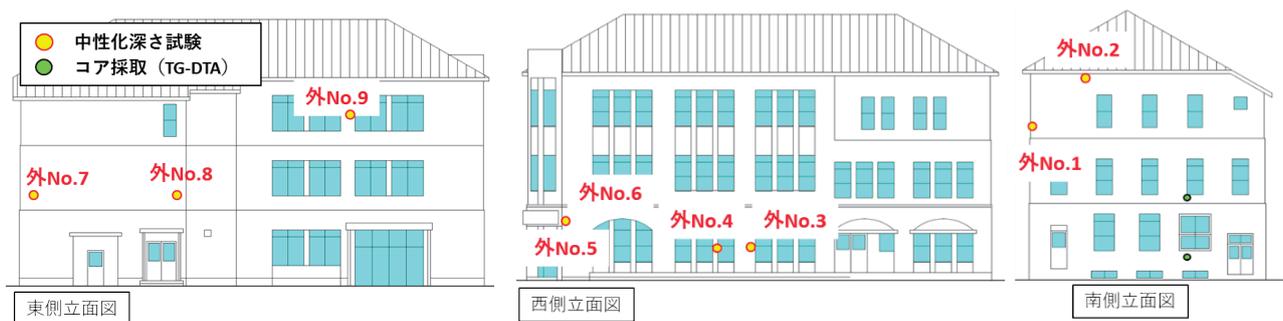


図-8 中性化深さ試験およびコア採取 (TG-DTA分析) 位置



図-9 躯体屋外側のコンクリートの中性化深さ

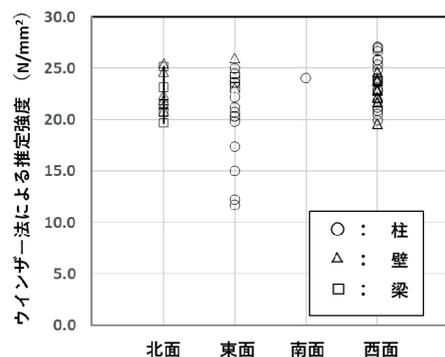


図-10 躯体屋外側のコンクリートの推定強度の分布

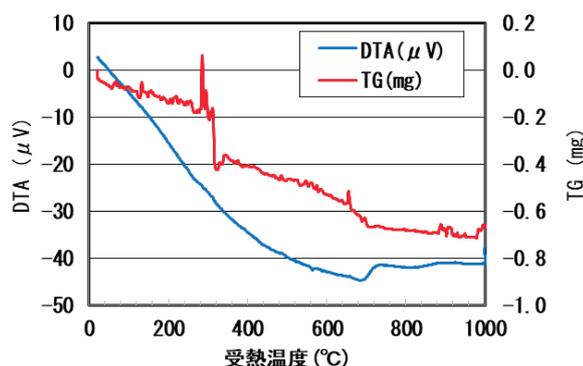


図-11 TG-DTA分析結果(2階)

室内側の測定結果と同様の傾向である。

2階についてTG(熱重量分析)とDTA(示差熱分析結果)に関する試験結果を図-11に示す。試料の質量変化をTG曲線、熱挙動をDTA曲線で示している。両者とも100°C程度でセメント中の水和物の結合水の脱離反応、500°C程度での水酸化カルシウムの結合水の脱離反応によるTGおよびDTAの低下は認められなかった。一方、750°C程度での炭酸カルシウムの二酸化炭素の脱離反応によるこれらの低下が認められた。以上より、屋外側0~20mm程度におけるコンクリートの受熱温度は、500°C以上、750°C未満であったと推察される。コンクリート躯体の受熱温度は、被爆時の周囲の推定温度3000~4000°C⁵⁾より低い。これは、屋外側の仕上げが30mm程度であったことと被爆による熱が瞬間であったために、躯体の温度上昇が小さかったと考えられる。

6. まとめ

本建物の継続使用を目的として、補強計画立案時および耐震改修実施時において行った詳細調査により以下の結果を得た。

- 1) ウィンザーピン法によるコンクリート強度の分布調査より、コンクリートの推定強度が低い箇所は存在するが、被爆や火災によると考えられる特定の傾向は見られない。室内の部材及び外壁とも同様の傾向であり1階の強度のばらつきが大きく、著しくコンクリートの推定強度が低い箇所が存在する。2、3階については、比較的コンクリートの推定強度は高く、局所的なコンクリートの不具合は、当時の施工技術に起因するものと考えられる。
- 2) 赤外線による調査より、室内外で仕上げの浮きやコンクリートの不具合が確認された。これらについては、打診等でその範囲を再確認し、撤去や樹脂注入等適切な補修を行った。
- 3) 強制加振及び衝撃弾性波法による試験結果より、柱

内部にコンクリートの不具合が存在することを確認した。特に1階柱に多く観測されたが、保持している軸力が大きく、断面の補修のための仮設計画が困難な部材については、内圧充填接合補強工法を用いるなど、適切な方法により補修を行った。

4) コンクリートコアのTG-DTA分析により、躯体のコンクリートの温度は被爆により750°C程度まで上昇したと推定される。しかし、コンクリートの強度や中性化に対する被爆の影響は明確ではなかった。

【謝辞】

本調査は、広島市都市整備局営繕部営繕課による事業の一環として行った。関係各位に心よりお礼申し上げます。また、コンクリートコアのTG-DTA分析は芝浦工業大学濱崎仁教授の協力を得て実施した。ここに記し謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 宮部喬司, 谷川恭雄, 森博嗣, 黒川善幸: ウィンザーピン法によるモルタルの強度推定に関する基礎的研究. コンクリート工学年次論文集, Vol26, No.1, pp.1833~1838, 2004.7
- 2) (一社)日本非破壊検査協会: 赤外線サーモグラフィによる設備診断・非破壊評価ハンドブック, 2004.6
- 3) 谷川恭雄: コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告, 1992年
- 4) (一社)日本非破壊検査協会: NDIS3419 ドリル削孔粉を用いたコンクリート構造物の中性化深さ試験方法, 2011
- 5) 平成25年度外務省委託「核兵器使用の多方面における影響に関する調査研究」報告書, 平成26年3月

【執筆者】



*1 東 健二
(AZUMA Kenji)



*2 森本 敬久
(MORIMOTO Takahisa)



*3 佐藤 大輔
(SATO Daisuke)