

論文 端島 65 号棟南棟の劣化状況と構造性能の評価

中原 健渡*1・栢山 健二*2

要旨：長崎市端島の鉄筋コンクリート造建築物は、経年による材料劣化が進行しており、維持・保全のために劣化を考慮した構造安全性能の評価が求められている。そこで、端島 65 号棟南棟を対象として、まずは調査によって劣化状況を把握した。次に、構造部材の劣化が建物全体の構造性能に及ぼす影響の評価を目指して、耐震診断を活用した方法と立体フレームモデルの静的増分解析による方法を提案・検証した。

キーワード：鉄筋コンクリート、劣化、端島、構造性能、耐震診断、静的増分解析

1. はじめに

建築物の長寿命化が求められている現在、想定された耐用年数を超えて継続使用される建築物が増加している。継続使用される建築物は、経年劣化によって構造材料がダメージを受け、建物全体の構造安全性が低下する危険が潜んでいる。過酷な環境下で著しく劣化した実例として長崎市端島(通称：軍艦島)の建築物群が挙げられる。この島内に残存する建築物の多くは鉄筋コンクリート造で、様々な程度で劣化が進行しており、一部で構造性能の低下による崩壊が危惧されている。そこで、歴史的価値の高い端島の建築物の現状を把握し、維持・保全の方策を探るために、日本コンクリート工学会と日本建築学会の合同調査が実施された¹⁾²⁾。調査が行われた建物のうち、景観的・歴史的・技術的・経済的な観点から、劣化の進行抑制を図るため、優先して構造安全性を評価すべき建物として、3 号棟、16 号棟、65 号棟の南棟が挙げられた¹⁾。図-1 に端島における各建物の位置を示す。3 号棟と 16 号棟は文献³⁾⁴⁾にて既に検討が成された。本報では、65 号棟の南棟を対象として、調査によって劣化状況を把握し、構造部材の劣化が建物全体の構造性能に及ぼす影響の評価方法を提案・検証する。

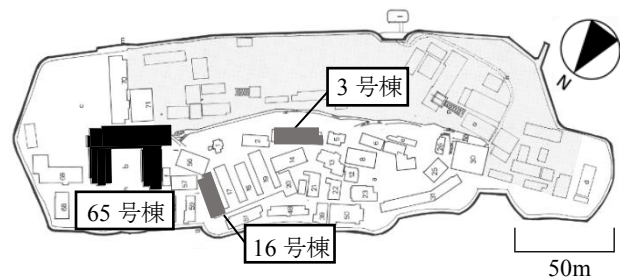


図-1 端島における各棟の位置

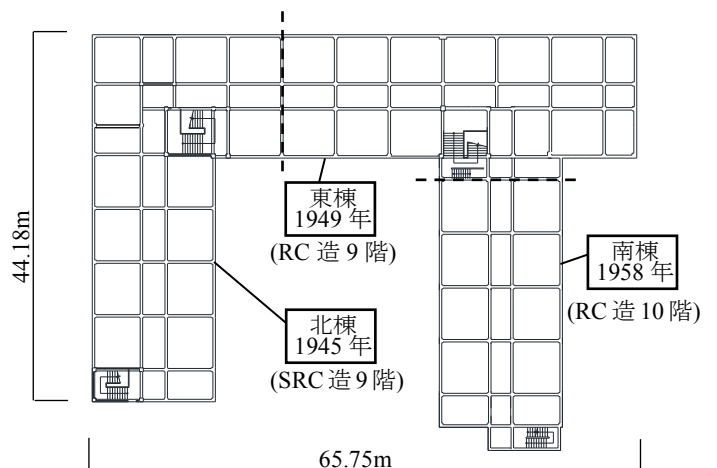


図-2 65 号棟全体の平面と建設年

2. 対象建物

図-2 に 65 号棟全体の平面と各棟の建設年を、図-3 に 65 号棟北西側の外観を示す。65 号棟は 9 階建ての北棟と東棟、10 階建ての南棟の 3 棟がコの字形で連結しており、各棟間にはエキスパンションジョイントは設けられていない。対象とする建物は 3 棟の中で最も新しく、比較的に設計図書が残っており、保存の優先順位が高い南棟である。65 号棟南棟の建物概要を表-1 に示す。当時の設計図面と実測調査に基づき、伏図および架構図を作成した。図-4,5 に 65 号棟南棟の 2 階平面と桁行方向の架構を示す。桁行方向は雑壁のあるラーメン構造で、1



図-3 65 号棟北西側の外観

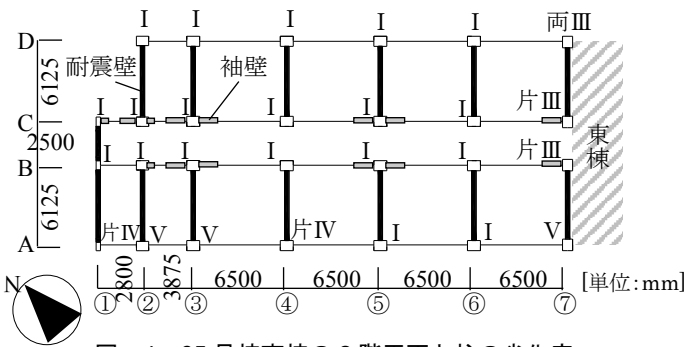
*1 芝浦工業大学 理工学研究科 修士課程 (学生会員)

*2 芝浦工業大学 建築学部 教授 (正会員)

階のみ耐震壁が配置されている。性能評価の際、B、C構面の方立壁は重量のみ考え、剛性と耐力には算入しない。梁間方向は耐震壁付きラーメン構造である。

表－1 65号棟南棟の建物概要

建設年	1958年(昭和33年)
構造種別	桁行：RC ラーメン構造
	梁間：RC 耐震壁付きラーメン構造
用途	鉾員用の集合住宅
階数	地上10階(地下なし)



図－4 65号棟南棟の2階平面と柱の劣化度

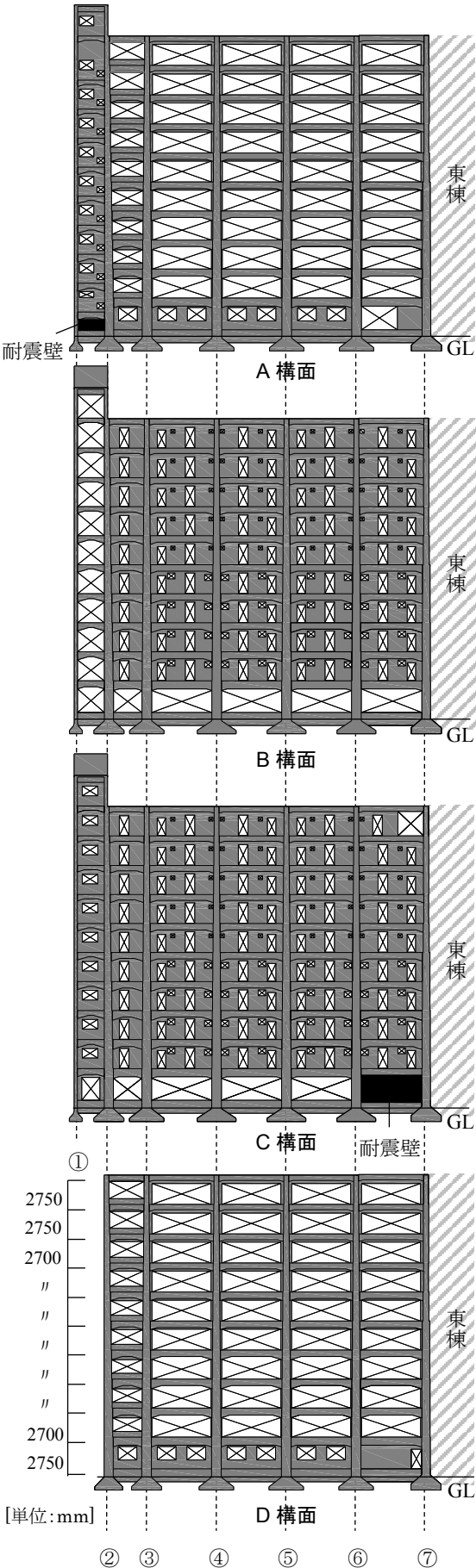
3. 劣化状況の評価

3.1 劣化度調査

2015年9月に島内の主要なRC建物について、表－2に示す劣化度の判定基準に基づいた調査が実施された²⁾。その結果と著者らの現地調査によって、65号棟南棟の部材の劣化度を定めた。柱・梁の劣化状況と断面詳細を図－6に例示する。また、図－4中に柱の劣化度を示す。

柱の例 1階 B構面 7通り		
主筋	8-Φ25, 4-Φ22	劣化度 V
帯筋	Φ9-@200	
劣化度	V	
梁の例 5階 7構面 B-C間		
主筋	6-19Φ	劣化度 III
あばら筋	Φ13-@150	
劣化度	III	

図－6 65号棟南棟の劣化状況と断面詳細の例



図－5 桁行方向の架構

表－2 部材の劣化度と耐震性能低減率（文献²⁾その2の表に加筆）

劣化度	劣化状況	耐震性能低減率 η_E
0	劣化のない状態。	1.00
I	ひび割れ幅 1mm 程度以下で付着劣化なし。	0.95
II	腐食により鉄筋とコンクリートが肌分かれし、若干の付着劣化あり。	0.80
III	かぶりコンクリートが剥落し、鉄筋のかぶり側はほぼ肌分かれているが、コア側はまだ付着があり、鉄筋は全面に浮き錆程度。（鉛直部材は片面と両面あり）	片面 0.65 両面 0.33
IV	かぶりコンクリートが剥落し、鉄筋とコンクリートが肌分かれし、付着力は殆どないが、鉄筋の断面積は 70% 程度以上、あるいは酸化鉄が表面のみと判断できる。（鉛直部材は片面と両面あり）	片面 0.25 両面 0.10
V	コア部のコンクリートも欠落するほど完全に鉄筋とコンクリートが肌分かれし、付着力がなく、鉄筋の断面積は 70% 程度未満と判断できる、あるいは鉄筋が層状に割裂している。	0.00

3.2 劣化度を考慮した耐震性能残存率 R_E の算出

文献²⁾で提案された方法に従い、劣化度を考慮した耐震性能残存率 R_E を算出した。 R_E とは初期性能に対する残存率を評価しているものであり、地震被害を対象とした残存耐震性能率 R の考え方³⁾を、経年劣化した端島の建物の構造性能の低下に準用したものである。 R_E は鉛直部材を柱、柱なし壁、柱型付壁、両側柱付壁の 4 種類に分類し、強度比をそれぞれ 1:1:2:6 として各階の方向ごとに略算する。ここで、図－7 に劣化度 I の柱 a と劣化度 II の柱 b に劣化度 V の梁が取り付く架構を例示する。 R_E 算出時には、柱 a、b の劣化度よりも、梁の劣化度の方が高いため、柱 a、b は劣化度 V として計算する。桁行方向各階の劣化度ごとに分類した鉛直部材本数と劣化度を考慮した耐震性能残存率 R_E を併せて表－3 に示す。桁行方向の R_E は、2 枚の耐震壁が劣化度 V であった 1 階の 62% で最小となった。また、文献²⁾には北棟と東棟の方向ごとの R_E の最小値が示されている。各棟における R_E の最小値を比較して表－4 に示す。建設年が比較的新しい南棟は東棟、北棟と比較して R_E が高く、劣化が軽度であることが分かる。



図－7 劣化した部材の架構の例示

4. 耐震診断による性能評価

4.1 建設当初を想定した性能評価

耐震診断の手法を活用して、建設当初の健全時を想定した 65 号棟南棟の耐震性能を評価する。65 号棟全体はコ形平面であるが、ここでは南棟のみを単体として扱う。材料特性に関して、コンクリートの圧縮強度は設計基準強度の 14.7 (N/mm²) とする。一方、鉄筋については建設年から SR235 と仮定する。文献⁹⁾に従い第 2 次診断を行った。形状指標 S_D は 65 号棟全体が不整形であることを

表－3 劣化度を考慮した耐震性能残存率 R_E (桁行方向)

階	劣化度ごとの鉛直部材数						R_E
	0	I	II	III	IV	V	
10	0	9	12	5	1	0	79%
9	0	14	10	3	0	0	86%
8	0	17	5	2	1	2	84%
7	0	19	2	3	3	0	86%
6	1	17	2	3	2	2	82%
5	0	16	6	1	2	2	80%
4	0	19	3	1	3	1	81%
3	0	16	3	3	1	4	76%
2	0	14	0	4	4	5	65%
1	1	15	5	0	2	2	62%

表－4 65 号棟各棟の R_E 最小値の比較

棟名(建設年)	北棟(1945)	東棟(1949)	南棟(1958)
桁行	12%(1 階)	20%(1 階)	62%(1 階)
梁間	12%(4 階)	24%(1 階)	61%(2 階)

表－5 建設当初の第 2 次診断結果 (桁行方向)

階	F	E_0	C_{max}	I_s	I_s/I_{so}
10	1.50	1.09	1.76	0.98	204%
9	1.27	0.78	1.21	0.70	146%
8	1.20	0.54	0.90	0.49	101%
7	1.00	0.45	0.70	0.41	85%
6	1.00	0.41	0.59	0.37	77%
5	0.80	0.27	0.46	0.24	51%
4	0.80	0.28	0.44	0.26	53%
3	0.80	0.28	0.41	0.25	53%
2	0.80	0.29	0.39	0.26	54%
1	0.80	0.51	0.64	0.46	96%

F : 靱性指標 E_0 : 保有性能基本指標 I_s : 構造耐震指標

C_{max} : 建設当初の健全時を想定した強度指標の最大値

構造耐震判定指標 $I_{so}=0.48$ 形状指標 $S_D=0.90$ 経年指標 $T=1.00$

考慮して 0.90 とし、建設当初の想定から経年指標 T は 1.00 とする。表-5 に耐震性能が低かった桁行方向の第 2 次診断結果を、強度指標の最大値 $C_{\max}$ も含めて示す。当該エリアの地域係数 Z が 0.8 であり、地盤指標 G と用途指標 U を 1.0、耐震判定基本指標 E_s を 0.6 と考え、構造耐震判定指標を $I_{s0} = E_s \cdot Z \cdot G \cdot U = 0.48$ とした。 I_s/I_{s0} は 2 階から 5 階の中間層で特に低い値を示した。

4.2 劣化を考慮した性能評価

(1) 劣化考慮時の材料特性

劣化を考慮した現状における 65 号棟南棟単体での耐震性能を評価する。材料特性に関して、コンクリートの単位体積重量と圧縮強度は、表-6 に示す 65 号棟南棟のコアコンクリートの試験結果⁷⁾を活用する。診断時の圧縮強度は、各階で採取したコアの圧縮強度の標準偏差を取り、その値の 1/2 を平均値から引くことにより算出した値 σ_{BD} を用いる(ただし、上限値は 14.7N/mm^2)。ここで、文献⁸⁾に従い、圧縮強度が 13.5N/mm^2 を下回る階では部材のせん断終局強度に式(1)に示す低減係数 k を乗じる。一方、鉄筋については、劣化考慮時も SR235 と仮定する。

(2) 耐震性能残存率 R_E を用いた性能評価

劣化が顕著である建築物では、経年指標 T を算定するための調査が困難である。そこで、経年指標 T に替え、耐震性能残存率 R_E を使用し、文献³⁾で提案されている式(2)に示す劣化を考慮した構造耐震指標 I_{SR} を算出する。表-7 に算出した桁行方向の結果を、 R_E を用いて劣化を考慮した強度指標の最大値 $C'_{\max} \cdot R_E$ も含めて示す。 I_{SR} は 2 階で最小の 0.18 となった。なお、コンクリートの単位体積重量に表-6 の値を用いたことで、建物重量が一部で建設当初の場合よりも軽くなり、 E_0' の値が表-5 の E_0 に比べて高くなった階がある。

(3) 耐震性能低減率 η_E を用いた性能評価

表-2 に示した耐震性能低減率 η_E の数値を低減係数として、劣化度に応じて鉛直部材の曲げ降伏強度 M_Y とせん断終局強度 Q_{SU} に乗じ、耐力を割り引いて第 2 次診断を行う。この時、曲げ降伏強度 M_Y とせん断終局強度 Q_{SU} の両方に η_E を乗じることで、せん断余裕度は変化させず、靱性指標の低減は無いものとする。このように、鉛直部材 1 本ごとに強度を低減させることで、式(3)に示す劣化を考慮した構造耐震指標 R_{IS} を提案する。算出した桁行方向の結果を、 η_E を用いて劣化を考慮した強度指標の最大値 $R_{C\max}$ も含めて表-7 に併記する。 R_{IS} は 3 階で最小の 0.21 となった。また、 $C'_{\max} \cdot R_E$ と $R_{C\max}$ を比較すると、全階で $C'_{\max} \cdot R_E$ が $R_{C\max}$ を下回った。 R_E 算出時には、図-7 に示したように、梁の劣化度を取り付く鉛直部材に反映した。一方、 $R_{C\max}$ の算出時には、梁の劣化度を無視して計算したことが原因と考えられる。

せん断終局強度の低減係数 $k = 0.244 + 0.056\sigma_{BD}$ (1)

R_E 利用の構造耐震指標 $I_{SR} = E_0' \times S_D \times R_E$ (2)

E_0' : 表-6 を反映した保有性能基本指標

η_E 利用の構造耐震指標 $R_{IS} = R_{E0} \times S_D$ (3)

R_{E0} : 部材ごとに η_E を考慮した保有性能基本指標

表-6 コアコンクリートの圧縮試験結果

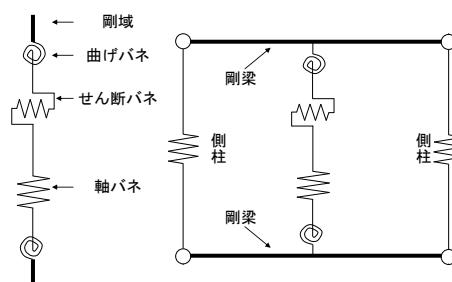
階	コア 本数	単位体積 重量(kN/m ³)	圧縮強度(N/mm ²)		
			平均値	標準偏差	診断時 σ_{BD}
10	3	21.4	10.1	3.9	8.2
9	3	20.3	16.3	2.7	14.7
8	3	20.4	12.4	1.4	11.7
7	3	19.9	12.9	2.3	11.8
6	3	21.2	12.2	1.9	11.2
5	3	22.4	20.2	4.8	14.7
4	3	21.6	18.8	4.9	14.7
3	2	21.9	16.5	3.7	14.7
2	2	22.1	15.1	0.5	14.7
1	3	21.8	15.8	3.6	14.0

表-7 劣化考慮の第 2 次診断結果 (桁行方向)

階	階ごとに R_E で劣化考慮			部材ごとに η_E で劣化考慮		
	E_0'	I_{SR}	$C'_{\max} \cdot R_E$	R_{E0}	R_{IS}	$R_{C\max}$
10	0.68	0.49	1.30	0.62	0.55	1.49
9	0.81	0.63	1.09	0.72	0.65	1.14
8	0.53	0.40	0.76	0.46	0.42	0.80
7	0.45	0.35	0.61	0.41	0.37	0.64
6	0.40	0.29	0.47	0.36	0.32	0.52
5	0.29	0.21	0.39	0.25	0.22	0.41
4	0.30	0.22	0.38	0.26	0.23	0.40
3	0.30	0.20	0.32	0.23	0.21	0.34
2	0.30	0.18	0.27	0.23	0.21	0.32
1	0.54	0.30	0.42	0.50	0.45	0.62

$C'_{\max} \cdot R_E$: 劣化を R_E で考慮した強度指標の最大値

$R_{C\max}$: 部材ごとに η_E で耐力低下させた強度指標の最大値



(a) 柱・梁のモデル (b) 耐震壁のモデル

図-8 部材のモデル化

5. 静的増分解析による性能評価

5.1 解析概要

解析ソフトウェア SNAP Ver.7.0.0.6((株)構造システム)を使用して、65号棟南棟を立体フレームモデルに置き換え、耐震診断で耐震性能が低かった桁行方向を対象に静的増分解析を実施し、水平抵抗性能を検討する。まずは劣化を無視した健全時の立体フレームモデル(建設当初モデル)を作成した。柱・梁部材は図-8(a)に示すように、曲げばね、せん断ばね、軸ばねの複合モデルとし、耐震壁は図-8(b)に示すように、3本柱と剛梁に置換した。曲げばねとせん断ばねの履歴特性はそれぞれ図-9に示す弾塑性(健全時)とし、軸ばねは弾性とした。強度に関して、曲げ降伏強度とせん断終局強度は文献⁹⁾より算出し、曲げひび割れ強度は曲げ降伏強度の1/3とし、せん断ひび割れ強度は文献⁹⁾より算出した。剛性に関して、初期曲げ剛性と初期せん断剛性は部材断面より決定し、曲げ降伏時剛性低下率は文献⁹⁾より算出し、曲げ降伏後の剛性は初期曲げ剛性の1/1000とした。一方、せん断ひび割れ後の剛性は初期せん断剛性の1/9とした¹⁰⁾。使用した解析ソフトでせん断破壊後の耐力低下を適切に考慮できないため、文献¹¹⁾を参考として、せん断破壊した部材を順次両端ピン部材に置換して、荷重増分解析を繰り返す方法により、耐力低下を疑似的に考慮した。外力分布はAi分布を用い、基礎はピン支持、床は剛床とし、使用材料の特性と建物重量は建設当初を想定した耐震診断に使用したものと同様とした。

5.2 劣化を考慮した解析方法

部材の劣化度をばねの履歴特性に反映する方法を提案する。部材の劣化度に応じてせん断ばねと曲げばねの各強度と初期剛性に表-2に示した耐震性能低減率 η_E を乗じることで、図-9に示すように健全時の性能を割り引く。ただし、劣化度Vの部材は水平抵抗性能に寄与しないと考え、両側の剛域端にピンを有する部材に置換した。各部材にこの方法を適用して、65号棟南棟の立体フレームモデル(劣化考慮モデル)を作成した。なお、使用材料の特性と建物重量は劣化を考慮した耐震診断に使用したものと同様とした。

5.3 静的増分解析結果

静的増分解析を実施した結果、建設当初モデルと劣化考慮モデルの両方で層間変形角が著しく増大した3階について、層せん断力係数(C_i)—層間変形角(R)関係を図-10に示す。建設当初モデルと劣化考慮モデルの層せん断力係数に着目すると、ピーク値が約84%に低下する結果となった。ここで、表-8に静的増分解析と耐震診断で劣化を考慮した時の耐力残存率を、図-11に各階における耐力残存率の分布を示す。静的増分解析による耐力残存率($R C_{i\max}/C_{i\max}$)は耐震診断の結果に比べてばらつき

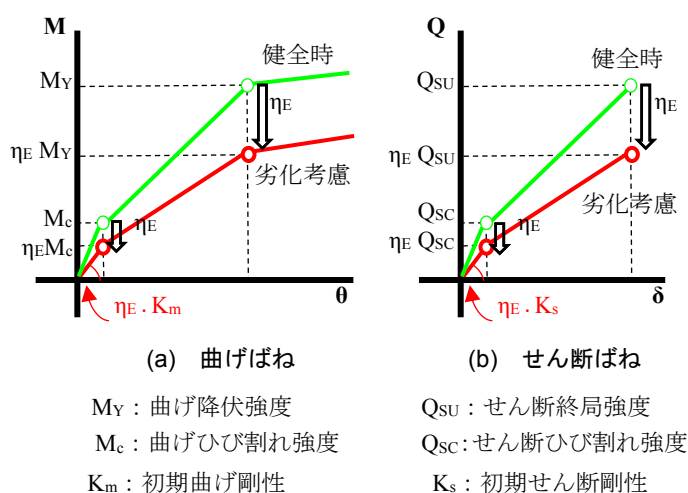
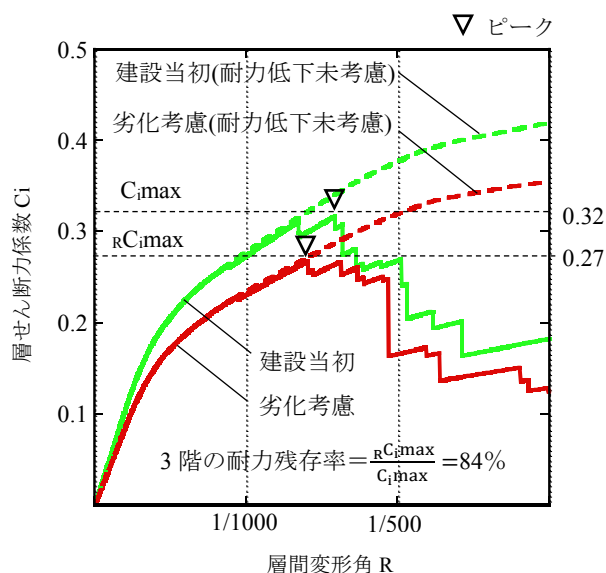


図-9 劣化度を反映したばねの履歴特性



$C_{i\max}$: 建設当初の解析による最大層せん断力係数
 $R C_{i\max}$: 劣化考慮の解析による最大層せん断力係数

図-10 3階の C_i - R 関係

表-8 劣化考慮による耐力残存率の比較

階	静的増分解析	耐震診断	
	$R C_{i\max}/C_{i\max}$	$C'_{i\max} \cdot R_E/C_{i\max}$	$R C_{i\max}/C_{i\max}$
10	82%	74%	85%
9	85%	90%	94%
8	86%	85%	89%
7	87%	86%	91%
6	86%	81%	88%
5	86%	85%	91%
4	85%	85%	91%
3	84%	80%	82%
2	84%	68%	81%
1	84%	65%	97%

が小さい。この点は今後の検討課題である。 R_E を用いて劣化を考慮した耐震診断の耐力残存率($C'_{max} \cdot R_E / C_{max}$)は、静的増分解析の結果に比べて、4階と9階を除き低くなった。劣化考慮時の静的増分解析は鉛直部材と梁それぞれの劣化度に応じてばねの履歴特性を変化させたのに対し、 R_E 算出時には梁の劣化度が鉛直部材の劣化度より高い場合、鉛直部材の劣化度を梁の劣化度を読み替えて劣化を考慮したため、耐力を過小評価するケースが多いと考えられる。一方、 η_E を用いて劣化を考慮した耐震診断の耐力残存率は、静的増分解析の結果に比べて、2階と3階を除き高くなった。 η_E を用いて劣化を考慮した耐震診断では、梁の劣化度を無視し、鉛直部材の性能のみを劣化度に応じて低下させたことが原因と考えられる。したがって、ここで提案した2つの手法とも改良の余地があり、耐震診断において、梁の劣化による架構の性能低下をより適切に評価する手法の開発が必要である。

6. まとめ

劣化したRC造建築物の構造性能を把握するために、長崎市端島65号棟南棟を対象として劣化度調査、耐震診断、静的増分解析を実施し、以下の知見を得た。

- 1) 劣化度を考慮した耐震性能残存率 R_E を算出した。建設年の新しい端島65号棟南棟は東棟、北棟と比較して、劣化が軽度であった。
- 2) 部材ごとに劣化度に応じて耐力を耐震性能低減率 η_E で割り引いた耐震診断を行い、劣化したRC造建築物の耐震性能を評価する手法として提案した。端島65号棟南棟の桁行方向では、本手法で算出した耐震診断の強度指標は劣化を R_E で考慮した耐震診断の値よりも高くなった。
- 3) 部材の劣化度をばねの履歴特性に反映する手法を提案し、静的増分解析に適用した。端島65号棟南棟の桁行方向では、劣化考慮時の静的増分解析の耐力残存率は、 R_E を用いて劣化を考慮する耐震診断の耐力残存率よりも高く、 η_E を用いて劣化を考慮する耐震診断の耐力残存率よりも低い傾向が見られた。

謝辞

本研究における調査は本会「供用不可まで劣化破損が進行したコンクリート構造物の補修・補強工法に関する研究委員会」(JCI-TC156C, 野口貴文委員長)の活動の一環で実施した。関係各位に心より感謝いたします。

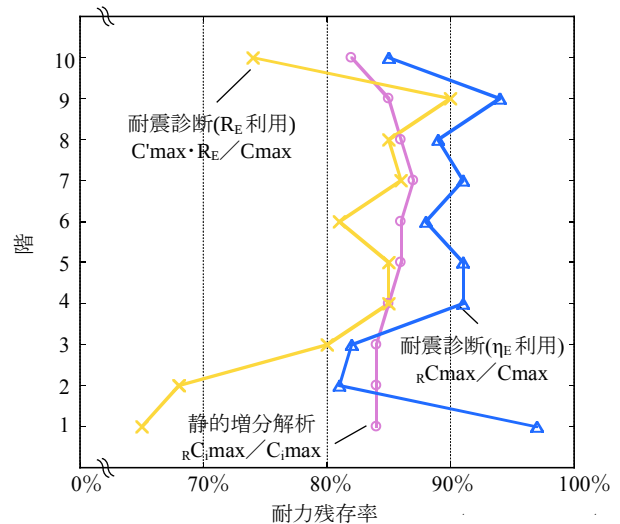


図-11 劣化考慮による耐力残存率の比較

参考文献

- 1) 野口貴文：供用不可まで劣化した軍艦島の鉄筋コンクリート造建築物の補修・補強・保存，コンクリート工学，Vol.56，NO.3，pp.218-226，2018
- 2) 岸本一蔵，他：端島の建物の劣化による構造性能低減に関する研究(その1～9)，日本建築学会学術講演梗概集，pp515～532，2016
- 3) 園山博士，他：劣化したRC造建築物の構造性能評価，コンクリート工学年次論文集，vol.40，pp1015～1020，2018
- 4) 竹村更紗，他：長崎県軍艦島(端島)に現存するRC造建物の構造性能評価に関する研究，日本建築学会学術講演梗概集，pp221～222，2013
- 5) 日本建築防災協会：2015年改訂版 再使用の可能性を判定し、復旧するための震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，2016
- 6) 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物の耐震診断基準 同解説，2001
- 7) 日本建築学会 軍艦島コンクリート系建築物の健全度調査小委員会：端島炭坑跡居住施設現況調査報告書(平成28年度)，2017
- 8) 山本泰稔：低強度コンクリート構造に関する調査・研究資料，第30回建築士事務所全国大会(埼玉)，2005
- 9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2010
- 10) 広沢雅也，他：1983年日本海中部地震による浪岡町立病院の被害とその解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.12，pp.117-133，1985
- 11) 片谷陽子，他：せん断破壊を考慮したRC造建物の弾塑性解析，コンクリート工学年次論文集，vol.26，pp1195～1200，2004