

鉄筋腐食に伴う地中構造物の構造性能低下に関する解析的検討

坂下 克之^{*1}・畑 明仁^{*1}・小野 祐輔^{*2}

Keywords : reinforcement corrosion, underground structure, pushover analysis, parametric study

鋼材腐食, 地中構造物, プッシュオーバー解析, パラメータスタディ

1. はじめに

高経年化構造物の合理的な補修・補強計画策定や新設構造物の供用期間中の維持管理計画策定においては、構造物の保有性能を合理的に評価することが必要である。とりわけ材料の経年劣化がもたらす構造性能低下を物理化学的知見に基づいて推定するとともに、その推定値が持つ不確実性を合理的に取り込むことが重要である。

本研究では材料の経年劣化の不確実性として、

- ・鉄筋腐食の空間的ばらつき（腐食箇所の差異）
- ・鉄筋腐食の時間的ばらつき（腐食箇所の拡大や腐食量の増大）

を想定し、それらが地中構造物の構造性能低下に与える影響について検討を実施した。具体的には、RC ボックスカルバートを対象として、鉄筋の腐食箇所・腐食領域の長さ・腐食量を変化させたパラメータスタディを実施し、構造物の変形特性に与える影響を解析的に評価した。

松尾らによる既往の研究^{1),2)}では、地中構造物を対象として同様にパラメトリックな検討を行っているが、腐食箇所等のパラメータを変化させるケース数は比較的少数にとどめている。本検討においては検討ケースを多数設定して、鉄筋腐食が構造に与える影響についてプッシュオーバー解析による検討を実施した。

2. 基本的な検討条件

検討の対象は、原子力発電所屋外重要土木構造物を想定した 2 連ボックスカルバートの横断面とする。図-

1 に検討対象構造物の各種寸法を、図-2 に配筋条件を示す。構造物の条件は、参考文献 3), 4)等を参考として設

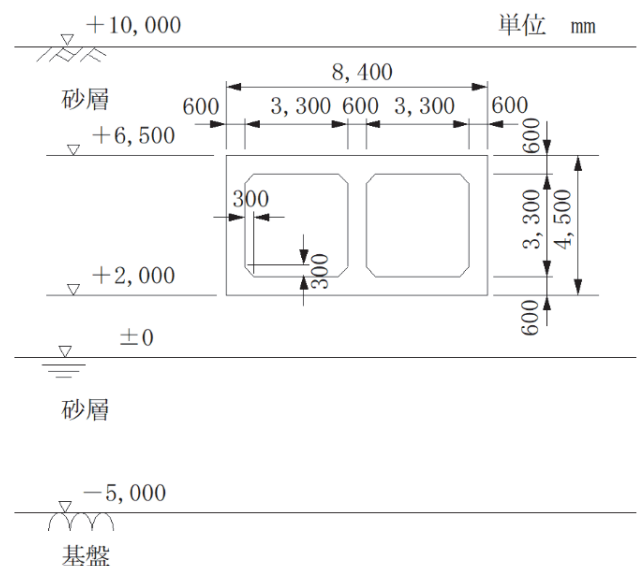


図-1 検討対象構造物
Fig.1 Underground structure

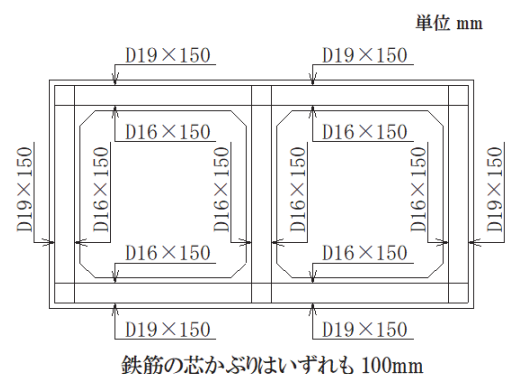


図-2 配筋図
Fig.2 Bar arrangement drawing

* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 先端構造研究室

* 2 鳥取大学

表-1 構造物物性

Table 1 Conditions of structure

コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)	24.0
	引張強度 (N/mm ²)	0.0
	ポアソン比	0.20
鉄筋	単位体積重量 (kN/m ³)	23.0
	降伏強度 (N/mm ²)	345.0
	ヤング係数 (kN/mm ²)	200.0
	ポアソン比	0.30
	単位体積重量 (kN/m ³)	77.0

表-2 地盤物性

Table 2 Conditions of soil

	砂層 地下水位以上	砂層 地下水位以下
せん断波速度 (m/s)	300	300
ポアソン比	0.40	0.48
単位体積重量 (kN/m ³)	18.0	20.0

定した。

構造物の物性値を表-1 に示す。コンクリートの非線形特性はコンクリート標準示方書⁵⁾に示されるコンクリートの応力-ひずみ曲線にて、鉄筋の非線形特性はバイリニアモデルにてモデル化する。

地盤の物性値を表-2 に示す。本論文における主要な検討は、構造物単体を対象としたプッシュオーバー解析により実施する。したがって後述するように、図-1あるいは表-2 に示す地盤条件は、プッシュオーバー解析を実施する際の構造物の初期状態を求める目的のみに使用するものである。

検討は微小変形理論に基づく解析コード TDAP III⁶⁾を用いる。

構造物は壁厚方向に 22 層に分割した 2 次元ファイバー要素でモデル化し、前述のコンクリートおよび鉄筋の非線形特性を適用する。横断面を対象とした 2 次元ファイバーモデルによる解析であるため、鉄筋は図-2 に示した主鉄筋のみを考慮し、せん断補強鉄筋およびトンネル軸方向の鉄筋についてはモデル化しない。隅角部（側壁と頂底版との交点および隔壁と頂底版との交点）は参考文献 7) に従い、所定の範囲を剛域要素とする。図-3 に構造物のモデル化を示す。

鉄筋腐食の効果は、当該箇所の鉄筋断面積の低減により評価する。

プッシュオーバー解析の境界条件としては、筆者らによる検討⁸⁾により合理的な境界条件として提案された図-4 に示す境界条件を適用する。この境界条件は「頂版および底版の特定の格子点に荷重が集中しない」

構造物の要素分割は、剛域長さが変則的な隔壁上下端付近を除き、全て 0.3m で分割

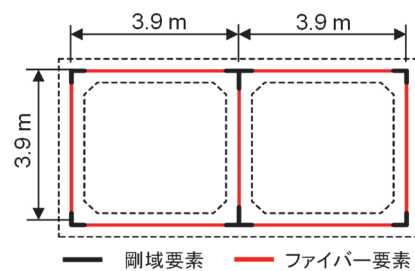


図-3 構造物のモデル化

Fig.3 Analysis model of structure

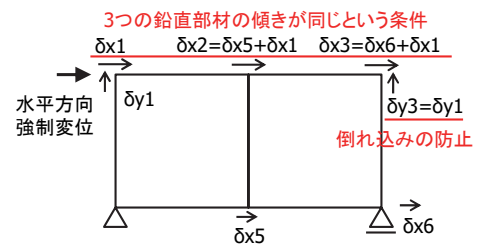


図-4 プッシュオーバー解析時の境界条件

Fig.4 Boundary condition of pushover analysis

「部材の伸縮を過度に拘束しない」ことを基本とした境界条件で、直接の加力点は頂版左端、ピン支持点は底版左端であるが、図中に併記したように、多点拘束 (MPC : Multi Points Con-straint) を活用して、3 つの鉛直部材の平均傾き（上下端の変位差）が同じになるような条件を課したものである。また倒れ込みによる側壁断面力の左右不均等を解消するために、頂版の左右の端点の鉛直変位が同じとする条件を課している。

プッシュオーバー解析においてはコンクリートおよび鉄筋の非線形特性を考慮するため、その初期ひずみ・初期応力が必要となる。そこで解析は、自重解析を実施した後に、その応力・ひずみ等を初期条件としてプッシュオーバー解析を実施する。自重解析は、図-1および表-2 に示した条件に基づき、地盤を平面ひずみ要素でモデル化した地盤-構造物一体 2 次元解析により行う。解析モデル図はここでは割愛する。

本論文においては、部材は断面の平面保持を前提としたファイバー要素でモデル化するため、材料非線形解析のようにせん断破壊を直接的に評価することはできない。したがって曲げ降伏による剛性低下のみに着眼した検討となる。

参考文献 1), 2) では、RC ボックスカルバートを対象とした場合の鉄筋の腐食箇所としては、

- ・腐食の要因となる先行ひび割れが入りやすいこと

腐食箇所数	0	1	2	4	6	10
検討ケース ○ 腐食想定箇所	Case01	Case02 Case03 Case04 Case05	Case06 Case07 Case08 Case09 Case10	Case11 Case12 Case13 Case14 Case15	Case16 Case17 Case18 Case19 Case20	Case21

図-5 検討ケース
Fig.5 Analysis cases

・鉄筋腐食が構造に与える影響が大きいことから、隅角部（側壁あるいは隔壁と頂底板との交点）近傍を想定している事例が多い。そこで本検討においても、鉄筋腐食箇所は隅角部近傍に生じることを基本としてパラメータスタディのケースを設定した。

3. 腐食箇所のパラメータスタディ

3.1 解析条件

本章では、腐食箇所の異なるいくつかのケースを設定したパラメータスタディを実施する。

腐食箇所数が同程度で腐食位置の異なるケースは「腐食の空間的なばらつき」に対応し、腐食箇所の増大は「腐食の時間的なばらつき」の検討に対応すると考えられる。

図-5に検討ケースを示す。2章で言及したように、腐食を想定する箇所は隅角部近傍すなわち各部材の端部としている。全ての部材端部で腐食の有無を考えた組み合わせケース数は膨大になり、結果の整理も困難となるため、図で示すように、代表的な腐食箇所数（0, 1, 2, 4, 6, 10）および代表的な腐食箇所を選択した全 21 ケースを設定した。

図-6 に解析モデルにおける鉄筋断面積の低減方法として、Case02 の頂版の例を示す。図-5 で赤丸を付けた腐食箇所に相当する部分の鉄筋断面積低減率は、剛域

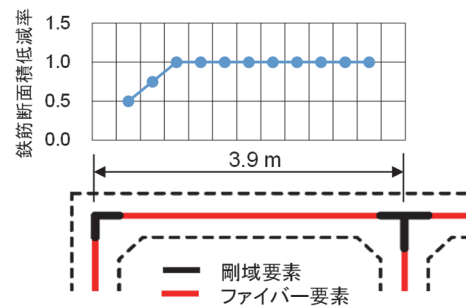


図-6 腐食箇所の鉄筋断面積低減 Case02の頂版の例
Fig.6 Reduction of reinforcement cross-sectional area by corrosion (Top wall in Case02)

隣接要素で 0.5、その隣の要素で 0.75 とし、内側鉄筋と外側鉄筋（隔壁では左右の鉄筋）で同じとする。横断面を対象とした 2 次元解析であるので、奥行方向（トンネル軸方向）には同じ鉄筋低減率が連続する仮定となる。

3.2 解析結果

全 21 ケースの荷重～層間変形角関係を、腐食箇所数毎にまとめて図-7 に示す。

全体的に見れば、腐食箇所数の増加に伴い荷重が低下していく様子が見える。ただし同じ腐食箇所数の中でケース毎に荷重のばらつきがあり、腐食箇所数間での大小の逆転もある。たとえば腐食箇所数 4 の Case14 よりも腐食箇所数 6 の Case17 の方が荷重は大きくなっ

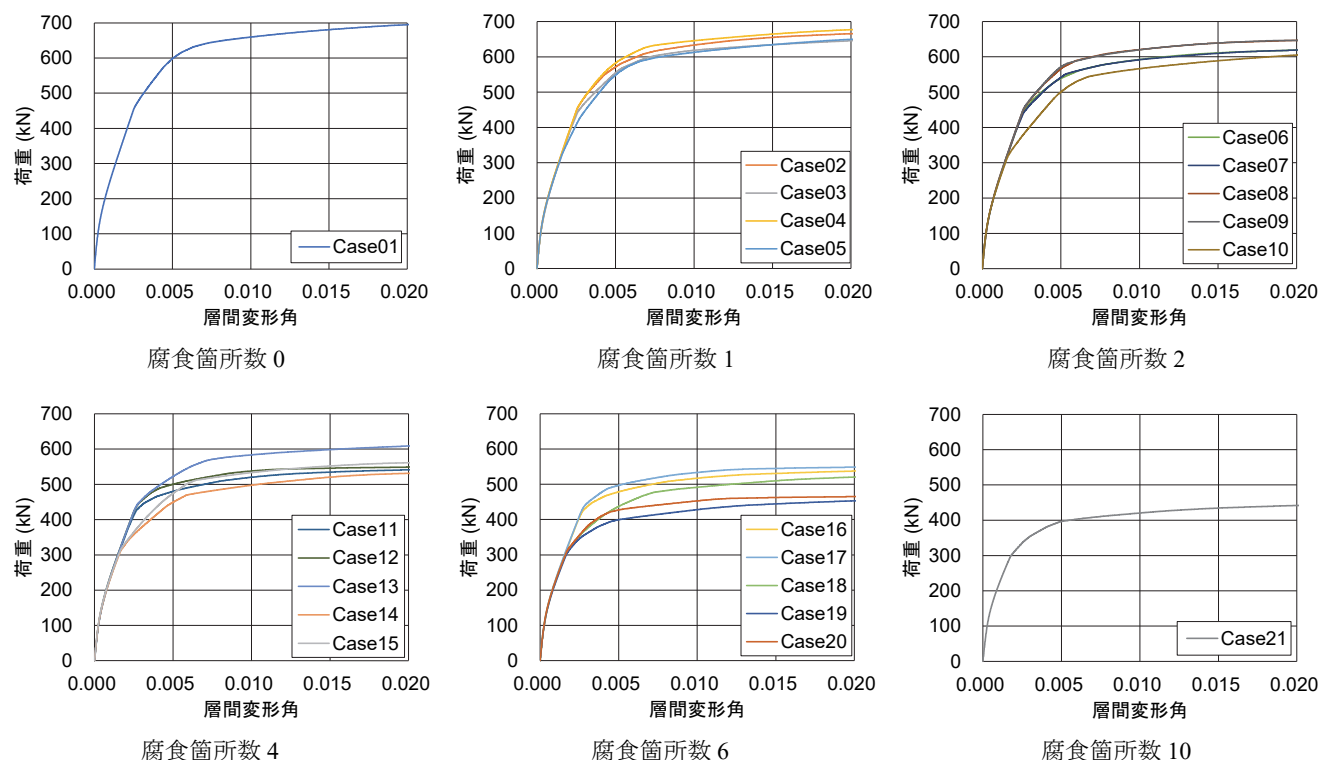


図-7 荷重～層間変形角関係
Fig.7 Load-deformation relationship

ている。また Case11 と Case15 の荷重～層間変形角関係を比較すると、曲線が折れ曲がる付近（層間変形角 0.003 付近）の荷重は Case11 の方が大きい、途中で逆転して層間変形角が 0.015 付近を超えると Case15 の方が大きくなるという興味深い現象も見られる。

前節の解析条件で述べたように、解析を実施した 21 ケースは、全ての箇所の腐食の有無の組み合わせを網羅したものではない。また図-4 に示したように、載荷は頂版を右向きに加力したものであり、左向きに加力したケースは含まれていない。しかしながら、腐食箇所数 2 の Case06～Case10 を比較することにより、概ね以下のような傾向があると言える。

- ① Case06 と Case07 がほとんど重なっていることから、頂版の両端が腐食した場合と底版の両端が腐食した場合の荷重低下はほぼ同等であると考えられる。
- ② Case08 と Case09 がほとんど重なっていることから、左側壁（加力点側の側壁）の両端が腐食した場合と右側壁（加力点から遠い側の側壁）の両端が腐食した場合の荷重低下はほぼ同等であると考えられる。
- ③ 部材の両端に腐食に伴う荷重低下の大小は、以下のようになる。

側壁両端腐食 > 頂版あるいは底版両端腐食
> 隔壁両端腐食

上記②の知見については、構造物の対称性や地震時に構造物に作用する力の対称性から妥当な結果と考えられるが、これはプッシュオーバー解析の境界条件として、筆者らの検討⁸⁾により、構造物の左右に不均等な挙動が生じないことが確認された図-4 の境界条件の合理性が発揮された結果と考えられる。

次に、腐食箇所に基づく荷重低下量の加算が成り立つか否かを調べた結果、成り立つ場合と成り立たない場合があることが分かった。図-8 の(a)が成り立つ場合の結果である。Case14 の腐食箇所は Case07 と Case10 の腐食箇所を合わせたものである。Case14 の荷重～層間変形角関係の曲線は「Case07 の曲線+Case10 の曲線－Case01（腐食なし）の曲線」に一致していることから、Case07 の荷重低下量と Case10 の荷重低下量を合わせたものが Case14 の荷重低下量ということになる。

一方、図-8 の(b)が成り立たない場合の結果である。Case06 と Case08 の腐食箇所を合わせた Case13 の荷重低下量は、Case06 の荷重低下量と Case08 の荷重低下量を合わせたものよりも小さくなっている（荷重があまり低下しない）。これは「頂版左端の弱部」と「左側壁上端の弱部」が、構造全体で見れば「左上隅角部の弱部」として概ね同じ効果を持ち、Case06 と Case08 の荷重低下量を足すことは、その効果をダブルカウントす

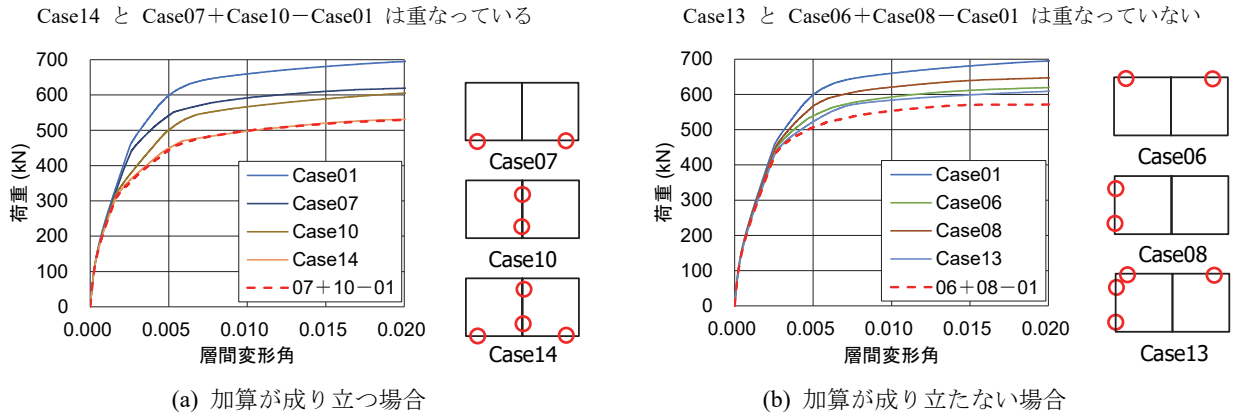


図-8 腐食箇所に基づく荷重低下量の加算

Fig.8 Amount of decrease in load depending on corrosion location

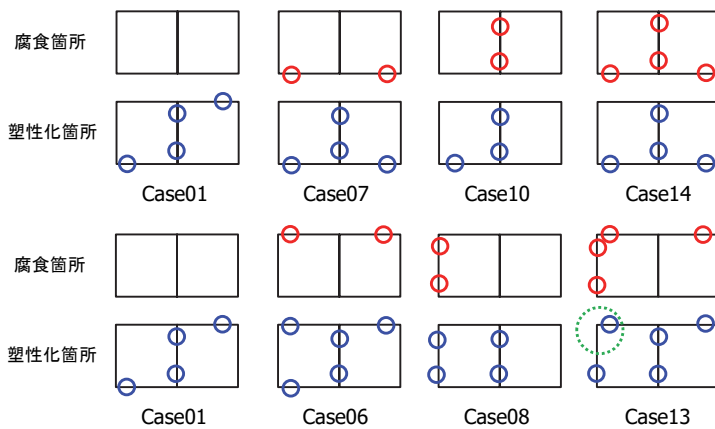


図-9 層間変形角0.005における塑性化箇所

Fig.9 Position of plastic hinge at shear deformation angle 0.005

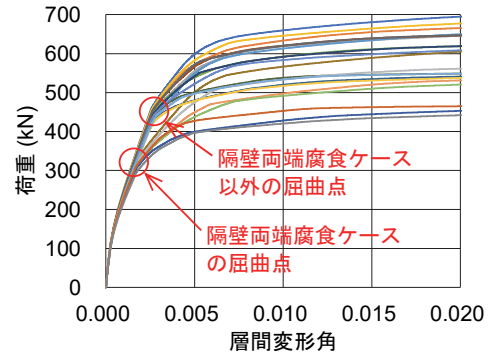


図-10 荷重～層間変形角関係 全ケース

Fig.10 Load-deformation relationship

(All cases)

る形となるためと考えられる。それを確認するために、層間変形角 0.005 における塑性化箇所（鉄筋降伏箇所）を示したものが図-9 である。Case13 に緑点線で示したように、頂版左端と左側壁上端はともに鉄筋腐食箇所であるが、塑性化は頂版左端のみに発生している。これは頂版左端が先に塑性化することにより左上隅角部の曲げモーメントが解放され、左側壁上端の塑性化に至らなかったものと考えられる。

荷重～層間変形角関係曲線の途中で荷重の大小が逆転しているケースがあることは上述したが、これを分析するために全ケースの荷重～層間変形角関係を重ね書きしたものを図-10 に示す。これを見ると、曲線が最初に顕著に折れ曲がるタイミングが比較的明確に二分されていることがわかる。ケースの内訳を分析した結果、最初に折れ曲がるグループが隔壁の両端腐食が含まれるケースであり、次に折れ曲がるグループが隔壁の両端腐食が含まれないケースであることがわかった。これは、図-4 で示したプッシュオーバー解析の境界条

件が 3 つの鉛直部材（左右側壁と隔壁）の傾きが同じであることに加え、隔壁以外の部材の鉄筋に D19 が使われている一方で隔壁は D16 のみであるため、隔壁の両端腐食が含まれるケースではそこが最初に影響を受けやすいためと考えられる。図-9 に示した層間変形角 0.005 における塑性化箇所を見ても、各ケースとも隔壁両端が塑性化しており、载荷の比較的初期の段階から隔壁の影響が大きいことが伺える。

4. 腐食領域の長さのパラメータスタディ

4.1 解析条件

本章では、腐食箇所が同じ場合に、1 箇所あたりの腐食領域の長さの異なるいくつかのケースを設定したパラメータスタディを実施してその影響を分析する。この場合、腐食領域の長さの違いによる「腐食の空間的なばらつき」と、腐食の進展により腐食領域の長さが増加する「腐食の時間的なばらつき」の 2 つの意味合

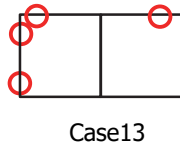


図-11 腐食領域の長さのパラメータスタディの腐食箇所
Fig.11 Location of corrosion in parametric study about corrosion zone length

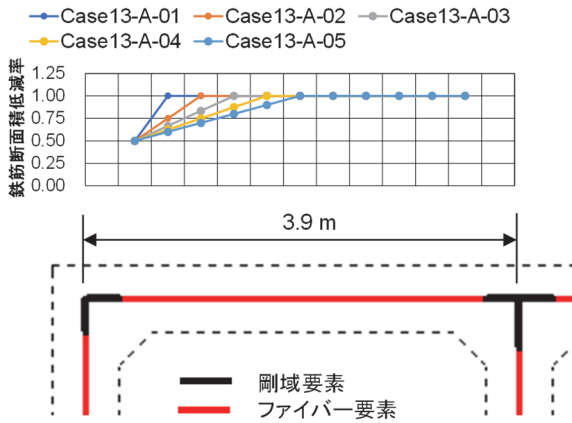


図-12 解析ケースと腐食領域の長さ
Fig.12 Analysis case and corrosion zone length

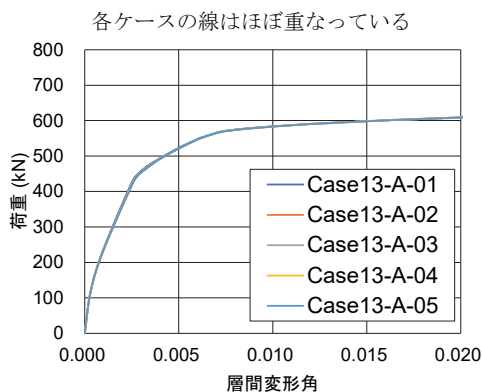


図-13 腐食領域の長さのパラメータスタディの解析結果
Fig.13 Result of parametric study about corrosion zone length

いを含む検討に対応するといえる。

腐食箇所は 3 章「腐食箇所のパラメータスタディ」のうち、代表として図-11に示す Case13 を基本とする。

図-12 に、解析ケースと各ケースの腐食領域の長さを頂版端部の腐食箇所を例として示す。本パラメータスタディでは、腐食箇所の剛域隣接要素の鉄筋断面積低減率を 0.5 で共通とし、減少なしの部分へのすり付き長さ（要素個数）を変化させる。すり付き長さの短いケース（1 要素ですり付き）から、本パラメータスタディの Case13-A-01, Case13-A-02, … Case13-A-05 とする。1 つのケースのすり付き長さは、全腐食箇所および外側

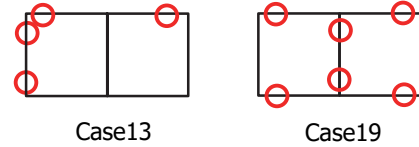


図-14 腐食量のパラメータスタディの腐食箇所
Fig.14 Location of corrosion in parametric study about degree of corrosion

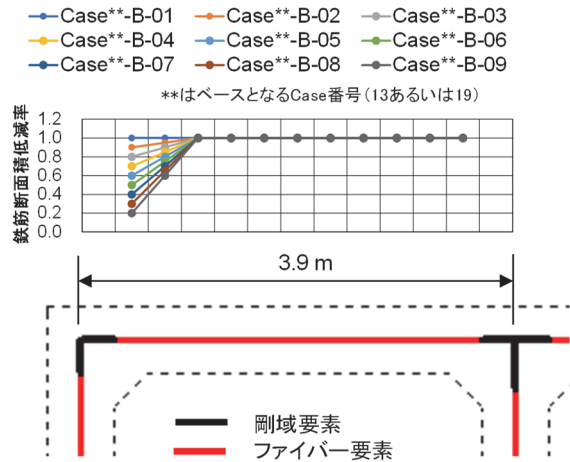


図-15 解析ケースと腐食量
Fig.15 Analysis case and degree of corrosion

鉄筋・内側鉄筋で同じとする。すなわち本パラメータスタディの Case13-A-02（2 要素ですり付き）が前節「腐食箇所のパラメータスタディ」の Case13 と同じである。

4.2 解析結果

解析結果として、荷重～層間変形角関係を図-13 に示す。

5 ケースの線は全て重なっている。すなわち部材端部腐食量からのすり付き長さは、結果にほとんど影響を与えないことがわかる。これは、参考文献 8)で分析しているように、プッシュオーバー解析の载荷に伴って塑性ヒンジが発生するのは部材端部のみであるので、結果はその部分の鉄筋量のみにはほぼ依存し、部材中間部分の鉄筋量は構造物の挙動に大きな影響を与えないためと考えられる。

5. 腐食量のパラメータスタディ

5.1 解析条件

本章では、腐食箇所および腐食領域の長さが同じ場合に、1 箇所あたりの腐食量の異なるいくつかのケースを設定したパラメータスタディを実施してその影響を

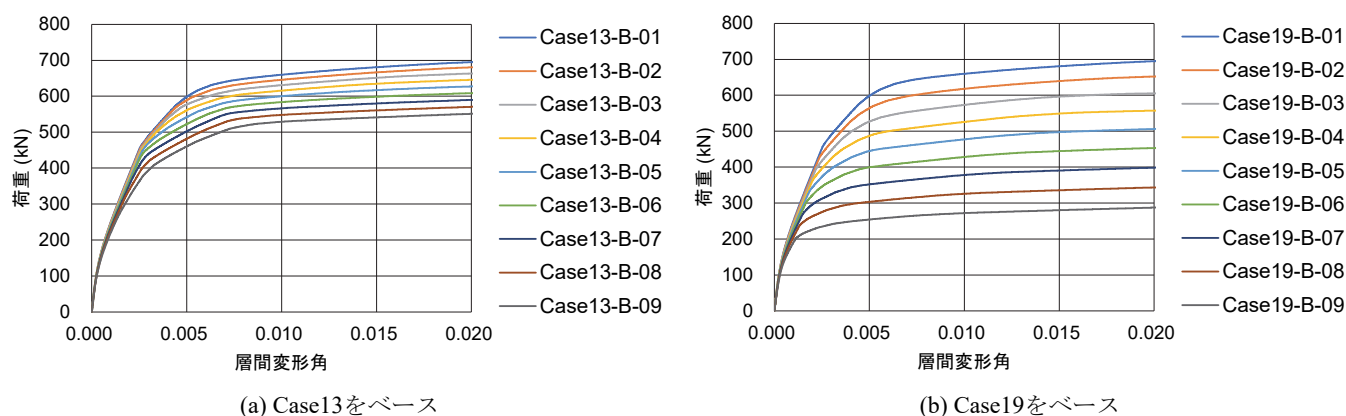


図-16 腐食量のパラメータスタディの解析結果
Fig.16 Result of parametric study about degree of corrosion

分析する。本パラメータスタディは、腐食の進展により腐食量が増加する「腐食の時間的なばらつき」の検討に対応するといえる。

腐食箇所は 3 章「腐食箇所のパラメータスタディ」のうち、代表として図-14 に示す Case13 および Case19 の 2 種類を基本とする。

図-15 に、解析ケースと各ケースの腐食量を頂版端部の腐食箇所を例として示す。本パラメータスタディでは、腐食箇所の減少なしの部分へのすり付き長さ（要素個数）を 2 要素分で共通とし、腐食箇所の剛域隣接要素の鉄筋断面積低減率を変化させる。剛域隣接要素の鉄筋断面積低減率は、Case**-B-01 : 1.0（減少なし）、Case**-B-02 : 0.9、・・・Case**-B-09 : 0.2 とする。** はベースとなる Case 番号で、13 あるいは 19 である。1 つのケースの鉄筋断面積低減率は、全腐食箇所および外側鉄筋・内側鉄筋（隔壁は左右の鉄筋）で同じとする。すなわち本パラメータスタディの Case**-B-06（剛域隣接要素の鉄筋断面積低減率 0.5）が 3 章「腐食箇所のパラメータスタディ」の Case13 および Case19 と同じである。

5.2 解析結果

解析結果として、「腐食箇所のパラメータスタディの Case13 をベース」の場合と「腐食箇所のパラメータスタディの Case19 をベース」の場合それぞれの荷重～層間変形角関係を図-16 に示す。

Case13 をベースにした場合と Case19 をベースにした場合では、腐食箇所数の違いから感度に差異は生じる（腐食箇所数の多い Case19 の方が当然感度は大きくなる）ものの、腐食量の変化率に対する荷重の変化率は、腐食量が大きくなる（鉄筋断面積が小さくなる）ほど

若干感度が大きくなる程度で、概ね比例関係（ケース間の線の間隔が大体同じ）となることがわかる。これは解析モデルがファイバー要素を用いて曲げ挙動を追跡する梁系のモデル化であることから、ある程度予想できる結果といえる。

6. まとめ

RC ボックスカルバート型の地中構造物を対象とし、材料の経年劣化の不確実性として、

- ・鉄筋腐食の空間的ばらつき（腐食箇所の差異）
- ・鉄筋腐食の時間的ばらつき（腐食箇所の拡大や腐食量の増大）

を想定したパラメータスタディを実施し、構造物の変形特性に与える影響について検討を行った。

検討の結果、以下に示す知見が得られた。

(1) 腐食箇所の影響

- ・ケース間で荷重～層間変形角関係の曲線の大小が途中で逆転する場合がある。
- ・腐食箇所に基づく荷重低下量の加算が成り立つ場合と成り立たない場合がある。

(2) 腐食領域の長さの影響

- ・部材端部腐食量からのすり付き長さは、構造物の変形特性にほとんど影響を与えない。

(3) 腐食量の影響

- ・腐食量の変化率に対する荷重の変化率は、概ね比例関係となる。

今回の検討では、腐食箇所や腐食量を、全部材の内側鉄筋・外側鉄筋（隔壁は左右の鉄筋）で同じと仮定するなどの簡易化を行っている。今後はさらに工学的根拠に則った分布状況を想定した検討を行うことによ

り、材料の経年劣化の不確実性が構造性能低下に与える影響の評価精度の向上へとつなげていきたい。

参考文献

- 1) 松尾豊史，松村卓郎，宮川義範：経年劣化した鉄筋コンクリート製地中構造物の構造性能評価に関する検討(その6)－鉄筋腐食を考慮した照査用限界値推定法の提案－，電力中央研究所報告，N08083，2009.
- 2) 松尾豊史，松村卓郎，原口和靖：ひび割れに起因する鉄筋腐食が生じた RC ボックスカルバートの耐荷特性評価，構造工学論文集，Vol. 60A，pp. 771-781，2014.
- 3) 土木学会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル・照査例，2021.
- 4) 土木学会：原子力発電所地質・地盤の調査・試験法および地盤の耐震安定性の評価手法 報告書 第 6 編 例示設計編，1985.
- 5) 土木学会：2012 年度制定 コンクリート標準示方書設計編，2013.
- 6) アーク情報システム 耐震・構造解析シリーズ：<http://www.ark-info-sys.co.jp/jp/product/tdap/>（2025 年 6 月 5 日アクセス）
- 7) 土木学会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル・照査例，2021.
- 8) 坂下克之，畑明仁，小野祐輔：RC ボックスカルバートのブッシュオーバー解析における合理的な境界条件の提案，土木学会論文集 Vol. 80，No. 13，23-13132，2024.