

令和 3 年度原子力規制庁委託成果報告書

高温時における原子炉建屋の
地震時応答挙動に関する検討

鹿島建設株式会社

令和 4 年 3 月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです。

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

令和3年度原子力規制庁委託成果報告書
高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動に関する検討

目次

1. まえがき	1-1
2. 実施計画	2-1
2.1 実施目的	2-1
2.2 実施内容	2-1
2.3 実施工程	2-5
2.4 実施体制	2-5
3. 実施内容及び成果	3.1-1
3.1 地震随件事象等の整理・分析	3.1-1
3.2 既往規格・基準類及び設計事例等の調査	3.2.1-1
3.2.1 規格・基準類の調査	3.2.1-1
3.2.2 設計事例の調査	3.2.2-1
3.3 既往研究の調査	3.3.1-1
3.3.1 温度影響を受けたコンクリート及び鉄筋コンクリート (RC) 部材 に関する実験研究の調査	3.3.1-1
3.3.2 温度影響を受けた構造実験のシミュレーション解析研究の調査	3.3.2-1
3.4 材料及び構造実験の検討	3.4.1-1
3.4.1 材料実験の検討	3.4.1-1
(1) シリンダー試験	3.4.1-1
(2) 実大ブロック試験	3.4.1-5
(3) 鉄筋コンクリート供試体両引き試験	3.4.1-12
3.4.2 構造実験の検討	3.4.2-1
3.5 解析検討	3.5.1-1
3.5.1 解析検討①：高温時梁試験	3.5.1-1
3.5.2 解析検討②：高温時耐震壁試験	3.5.2-1
4. まとめ	4-1
5. あとがき	5-1
付録1 材料の各種詳細分析方法について	付 1-1
付録2 本事業に関する有識者からの参考意見	付 2-1
付録3 用語説明	付 3-1

1. まえがき

規制基準において新たに重大事故等の温度等が負荷された状態も含めた各荷重状態での原子炉建屋の耐震性評価が求められている。中でも、コンクリート製原子炉格納容器において、このような過酷な環境下の構造特性を評価するためには、高温度状態等での材料物性の変化及び鉄筋コンクリート部材の応答挙動に関する知見が必要であるが、特に重大事故等の高温時に関する既往の研究事例が少なく、審査に資する知見を拡充しておく必要がある。

令和3年度は本事業の初年度であることから、高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動について、既往知見の収集、材料・構造実験の調査、解析手法の調査等を行い、実験・解析による応答挙動の把握のための具体的な計画等について検討することを目的とする。

2. 実施計画

2.1 実施目的

高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動について、既往知見の収集、材料・構造実験の調査、解析手法の調査等を行い、実験・解析による応答挙動の把握のための具体的な計画等について検討することを目的とする。

2.2 実施内容

実施内容の概要を以降に示す。

なお、以降の実施内容で対象とする温度範囲は最大摂氏 300 度程度までとする。

2.2.1 地震随件事象等の整理・分析

業務の実施に際して、想定する地震随件事象及び重大事故の進展状況を踏まえて、地震随件事象に対するコンクリート製原子炉格納容器の要求性能を定量化するための重要な問題点を整理・分析する。

また、上記の問題点を踏まえて、実機評価で必要となる実験計画等の全体像（検討の流れを含む）を示す。なお、この事業で必要となる実験計画の詳細に関しては 2.2.4 で検討する。

2.2.2 既往規格・基準類及び設計事例等の調査

国内外の温度影響を考慮したコンクリート製原子炉格納容器の耐震設計・評価に関する規格基準について、損傷履歴の有無及び放射性物質の大規模放出リスクに関する機能損傷の観点から、温度レベルに応じた温度荷重の考え方、地震応答を評価する際の温度荷重の扱い及びコンクリートの材料物性(圧縮強度、引張強度、弾性係数等)を調査する（国内 2 件/海外 2 件程度）。

調査した規格・基準類で参考又は引用している論文等での温度荷重の扱い及び温度によるコンクリートの材料物性に関する知見を整理する。

損傷履歴の有無の影響及び構造・機能損傷的な観点から、国内外のコンクリート製原子炉格納容器の耐震設計・評価事例を調査し、耐震設計・評価における温度荷重の扱いに関する考え方をまとめる（海外 1 例を含めて 2 例以上）。

2.2.3 既往研究の調査

(1) 温度影響を受けたコンクリート及び鉄筋コンクリート部材に関する実験

加熱中又は加熱後のコンクリートについて調査した事例を対象として、温度影響を受けたコンクリートの材料物性（圧縮強度、引張強度、弾性係数等）に関する国内外の材料実験例を調査し知見を整理する。ここでの調査・整理の観点を次に示す。

- ①加熱中又は加熱後のコンクリートの圧縮強度、引張強度、弾性係数等の力学特性に加えて、熱伝導率、比熱、線膨張係数等の熱特性についても整理する。
- ②高温影響を受ける構造物の 3 次元のおよび動的効果に関連して特に重要な因子（ポアソン効果、ひずみエネルギー等）に関する知見の有無について整理する。
- ③高温に曝されるコンクリートの境界条件（プレストレス等の拘束応力及び熱応力、鋼製ライナーの有無等）が与える影響に着目して整理する。
- ④コンクリートの構成要素（セメント、骨材、フライアッシュ等の混和材）が材料特性に及ぼす影響に着目した整理をする。

加熱中又は加熱後の鉄筋コンクリート部材について調査した事例を対象とし、温度影響を受けた鉄筋コンクリート部材の変形特性や耐力等に関する構造実験例を調査し知見を整理する(国内外の構造実験事例 3 件程度)。ここでの調査・整理の観点を次に示す。

- ①加熱中又は加熱後の RC 部材の変形特性、耐力等に着目して整理する。
- ②重大事故発生時に近い温度域（最大 300℃程度）で構造実験を行っている事例に着目して整理する。
- ③境界条件（プレストレス等の拘束応力及び熱応力、鋼製ライナーの有無等）の影響を加味した構造実験事例に着目して整理する。
- ④破壊モードの観点から、特に鉄筋とコンクリートの付着特性に着目して整理する。
- ⑤FP 放出リスクの観点から、ひび割れ幅および分布状況に着目して整理する。

なお、材料実験及び構造実験の調査する事例は、原子力規制庁殿と協議して決定する。

(2) 温度影響を受けた構造実験のシミュレーション解析

上記(1)の調査等により収集した情報に基づいて、文献に示されている構造実験のシミュレーション解析から有限要素法解析を含む 2 種類程度の解析手法を調査し、各解析手法の詳細な内容について確認する。また、文献に示されているシミュレーション解析と実験結果との比較結果について考察する。ここでの調査・整理の観点を次に示す。

- ①損傷履歴を考慮できる、温度影響を受けた鉄筋コンクリート構造物の損傷シミュレーション解析に必要な解析手法に関して、構造・振動・伝熱・熱流体等の複数の物理現象の相互影響の観点から調査・分類する。
- ②温度影響を受けた構造実験とシミュレーション解析との比較結果を有する、上記分類で 2 種類以上の解析手法を用いた論文に関して調査・考察を実施する。

なお、解析対象とする構造解析及び解析手法については、原子力規制庁殿と協議して決定する。

2.2.4 材料および構造実験の検討

(1) 材料実験

2.2.2(1)で調査・収集した情報に基づき、既往知見で不足あるいは拡充すべき温度影響（熱応力も含む）を受けるコンクリートの材料物性を評価する材料実験計画を策定する。実験計画には供試体サイズ、加熱温度、加熱温度持続時間、養生条件（水分逸散の有無）、鋼製ライナー等の試験項目を考慮する。ここで、材料実験の計画立案に際しては、審査に資する精度が高いデータを取得できるように留意する。

なお、実験場所、実験条件等の詳細は、原子力規制庁殿と協議して決定する。

(2) 構造実験

2.2.2(1)で調査・収集した情報に基づき、既往知見で不足あるいは拡充すべき温度影響（熱応力も含む）を受ける鉄筋コンクリート部材の構造実験の実験方法（実験対象部位、載荷方法等）を検討する。ここで、構造実験の計画立案に際しては、審査に資する精度が高いデータを取得できるように留意する。

なお、実験場所、実験条件等の詳細は、原子力規制庁殿と協議して決定する。

2.2.5 解析検討

2.2.2(2)で調査・収集した情報に基づき、文献に示されている構造実験から2つの異なる鉄筋コンクリート部位（壁、梁、床等）を対象とした構造実験を選定し、シミュレーション解析を行う。文献調査結果から解析結果への影響が大きいと判断できたモデル化等について、その影響度合いを感度解析により確認する（シミュレーション解析及び感度解析を合わせて合計8ケース程度）。解析作業では、市販解析コード（3次元有限要素法）を用いる。

以降では、上記を踏まえて、シミュレーション解析及び感度解析を実施するための具体的な着眼点を示す。

- ①コンクリート製原子炉格納容器がシェル部（鉛直部材）、トップスラブ部（水平部材）及び底部（水平部材）から構成されるため、少なくとも2つの異なる鉄筋コンクリート部位（鉛直部材：壁又は柱、水平部材：床又は梁）を対象とする。
- ②解析検討に用いる市販解析コード（3次元有限要素法解析）は、コンクリート製原子炉格納容器の弾塑性解析における妥当性確認の実績、及び構造・振動・伝熱・熱流体等の複数の物理現象の連成解析の実績を踏まえて、「Abaqus」とする。
- ③文献調査結果を踏まえたモデルパラメータの現実的な不確かさを考慮したシミュレーション解析及び感度解析を実施する。つまり、少なくとも8ケースの解析を実施し、パラメータの寄与度分析及びパラメータ間の相関分析を行う。その際には、実験計画法の直交表等を用いて、解析ケース数の合理化を図る。併せて、国内外の最新の妥当性確認方法を参照し、8ケースの解析結果を統計処理して平均値（Best Estimate 値）及び

不確かさ幅を定量化することで、実験結果との誤差の不確かさを評価する。ここで得られる結果に与える影響が大きなパラメータを踏まえて、2.2.3における実験ケースに関する更なる検討を実施する。

なお、解析条件等の詳細は、原子力規制庁殿と協議して決定する。

2.2.6 報告書の作成

上記の2.2.1～2.2.4について、得られた成果を報告書にまとめる。報告書には実験及び解析検討におけるプロセスも記載するとともに、地震随伴事象に対するコンクリート製原子炉格納容器の要求性能を定量化するために重要である、今後の技術課題を記載する。また、本事業に関する有識者から参考意見を聴取し、報告書付録に記載する。

なお、報告書の様式については原子力規制庁殿と協議を行い決定する。

2.3 実施工程

実施工程を次に示す。

作業内容	2021			2022		
	10	11	12	1	2	3
1. 既往規格・基準類及び設計事例等の調査	■					
2. 既往研究の調査						
1) 温度影響を受けたコンクリート及び鉄筋コンクリート部材に関する実験	■					
2) 温度影響を受けた構造実験のシミュレーション解析	■					
3. 材料および構造実験の検討						
1) 材料実験		■				
2) 構造実験		■				
4. 解析検討		■				
5. 報告書の作成					■	
打合せ等			△ 実施方針確認	△ 経過報告		△ 最終報告

図 2.3-1 実施工程

2.4 実施体制

実施体制の概要を次に示す。

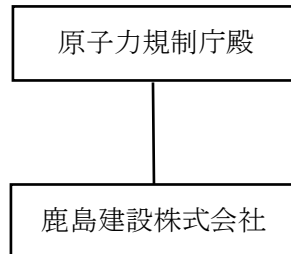


図 2.4-1 実施体制

3. 実施内容及び成果

3.1 地震随件事象等の整理・分析

この事業の実施に際して、地震随件事象及び重大事故の進展状況を踏まえて、地震随件事象に対するコンクリート製原子炉格納容器の要求性能を定量化するための重要な問題点を整理・分析する。整理・分析結果の概要を図 3.1-1 に示す。以降では、図 3.1-1 で示した、想定する地震随伴シナリオ及びコンクリート製原子炉格納容器の要求性能を定量化するための問題点に関して詳述したい。

(1) 想定する地震随伴シナリオ

この業務で想定する、内的事象起因の重大事故と外的事象（地震）との独立事象同士の組合せシナリオ（シナリオ A）、及び外的事象起因の重大事故シナリオ（シナリオ B）に関して、既往知見を踏まえて考察する。

①シナリオ A

まず、内的事象起因の重大事故時の事故進展と格納容器の機能喪失との関係に関しては、原子力学会「原子力発電所の出力運転状態を対象とした確率論的リスク評価に関する実施基準（レベル 2 PRA 編）：2021(AESJ-SC-P009:2021)」^[3.1-1]において PWR プラント及び BWR プラントそれぞれで分類・整理されている（図 3.1-2～図 3.1-3 参照）。PWR 及び BWR の設備及び系統構成の違いから事故進展の詳細は異なるものの、いずれのプラントでも格納容器の機能喪失へと至る重大事故時の事故進展シナリオは、原子炉（圧力）容器破損を起因事象として格納容器の機能喪失へと至る事故進展シナリオに加えて、原子炉（圧力）容器破損前に格納容器が機能喪失する LOCA 等を起因事象とした事故進展シナリオが存在する。

また、内的事象起因の重大事故と外的事象（地震）との独立事象同士の組合せに関しては、内的事象起因の重大事故時に格納容器の機能喪失へと至る事故進展の起因事象の発生確率の想定が極めて重要であるが、重大事故（又は格納容器の機能喪失へと至る起因事象）を設計基準事象と想定するか、設計基準超事象と想定するかで異なってくる。例えば、新型炉（次世代炉）を対象とした技術要件を取り纏めた技術レポート^[3.1-2]では、設計基準事象の平均発生頻度として 10^{-2} /年～ 10^{-4} /年、設計基準超事象の平均発生頻度として 10^{-4} /年～ 10^{-7} /年としている。

従って、内的事象起因の重大事故と外的事象（地震）との独立事象同士の組合せシナリオ（シナリオ A）の想定に際しては、前述の重大事故（又は格納容器の機能喪失へと至る起因事象）の発生頻度に、設計基準地震動 S_s の平均超過頻度を考慮した組合せ頻度と、安全目標（例えば、平成 25 年度第 2 回原子力規制委員会での議論『発電用原子炉に

については、事故時のセシウム 137 の放出量が 100 テラベクレルを超えるような事故の発生頻度は 100 万炉年に 1 回程度を超えないように抑制されるべきである』に不確実さを配慮した閾値とを比較し、シナリオ A を想定すべきか否かを判断することができると思われる。

以上に示すシナリオ A は、リスク評価としては極低頻度のために基本的にスクリーニングアウトできる可能性が高いと考えられるが、極高影響のために深層防護シナリオとしての設計的な観点からの重要性は高い。従って、シナリオ A に関しては、大規模破損に至る決定論的な耐震裕度評価方法の構築、及びその評価結果を活用した脆弱部位の抽出・補強のために有益となる重畳シナリオである。また、この事業における、『事前損傷なし』の材料及び構造実験における高温時の耐力及び変形能に関する実験結果が、前述の『深層防護概念を活用した決定論的 CCV 評価方法』の妥当性確認のための貴重な根拠データとして今後貢献できると考えられる。

②シナリオ B

外的事象起因の重大事故シナリオ（シナリオ B）のうち、本震起因の重大事故時の格納容器機能喪失頻度に関する評価要件は、原子力学会「原子力発電所の出力運転状態を対象とした確率論的リスク評価に関する実施基準（レベル 2 PRA 編）：2021(AESJ-SC-P009:2021)」^[3.1-1]が詳しい。しかし、本震起因の重大事故と余震との組合せに関しては今後の課題とし、その問題点を解説に記載している。例えば、余震発生を想定すべきタイミング例として、次のような記載がある。なお、以降の解説図 5.5.3 及び解説図 5.5.4 は、図 3.1-4 としてここでは引用した。

プラント損傷状態の観点では、余震を想定すべきタイミングとは格納容器機能喪失が起こる可能性が最も高くなる時、つまり格納容器内圧と余震による応力の総和が最大となるタイミングが考えられる。余震による応力は地震動ハザード評価と地震動フレンジリティ評価によって決定されることから、格納容器内圧が最大時に余震が起こることが厳しいタイミングである。代表的な PWR プラントにおいて格納容器内の除熱として期待している格納容器破損後の影響緩和策の例としては以下が挙げられる。

- ・格納容器スプレイ
- ・格納容器内自然対流冷却

一般的に、上記の格納容器破損後の影響緩和策の実施直前に格納容器内圧が最も高くなることから、これらのタイミングが厳しいタイミングの一つと考えられる（解説図 5.5.3 参照）。この時点での格納容器各部位における地震応力及び格納容器内圧上昇による応力を評価・検討することにより、2つの要因の重畳が同一の部位で発生するのか、相対的にどちらが支配的か、といった情報が得られるので、異なるタイミングの場合の余震の影響についてもある程度の推定が可能となる。

また、上記の格納容器破損後の影響緩和策の実施以前に余震が発生した場合、余震により運転員が緩和機器の再チェック等を行うことで、CV スプレー等の緩和操作が遅れて、その間に格納容器圧力が上昇し、余震を考慮しない場合よりも格納容器圧力が大きくなることが考えられる。そのため、余震による格納容器破損後の影響緩和策の開始時間の遅れも考慮した感度解析も有用となり得る（解説図 5.5.4 参照）。

以上に示すシナリオ B は、シナリオ A と比べて、地震リスクの観点からの重要性は高いので、CCV に要求される性能を部分的に満足できなくなる場合に備えた、重大事故時の影響緩和策の有効性判断の観点からの重要性は高い。従って、シナリオ B に関しては、事故時荷重及び地震時荷重を確率論的に組み合わせることを念頭においた CCV を構成する各構造部材の設計方法の構築、及び設計クライテリアの提案のために有益となる重畳シナリオである。また、この事業における、『事前損傷あり』の材料及び構造実験における高温時の耐力及び変形能に関する実験結果に加えて、要求性能に基づく損傷グレードの階層化（所謂、長期～短期～終局～終局後挙動）に対応する実験結果（全体損傷と局部損傷との定量関係データ）が、前述の『リスク情報を活用した要求性能に基づく CCV 設計方法』の定量的検証のための貴重な根拠データとして国際的にも今後貢献できると考えられる。なお、現状の実機審査に資する観点から、シナリオ A に相当する『事前損傷なし』の材料及び構造実験結果に関しても同様に、要求性能に基づく損傷グレードの階層化の観点からの整理・分析は可能であることも補足しておきたい。

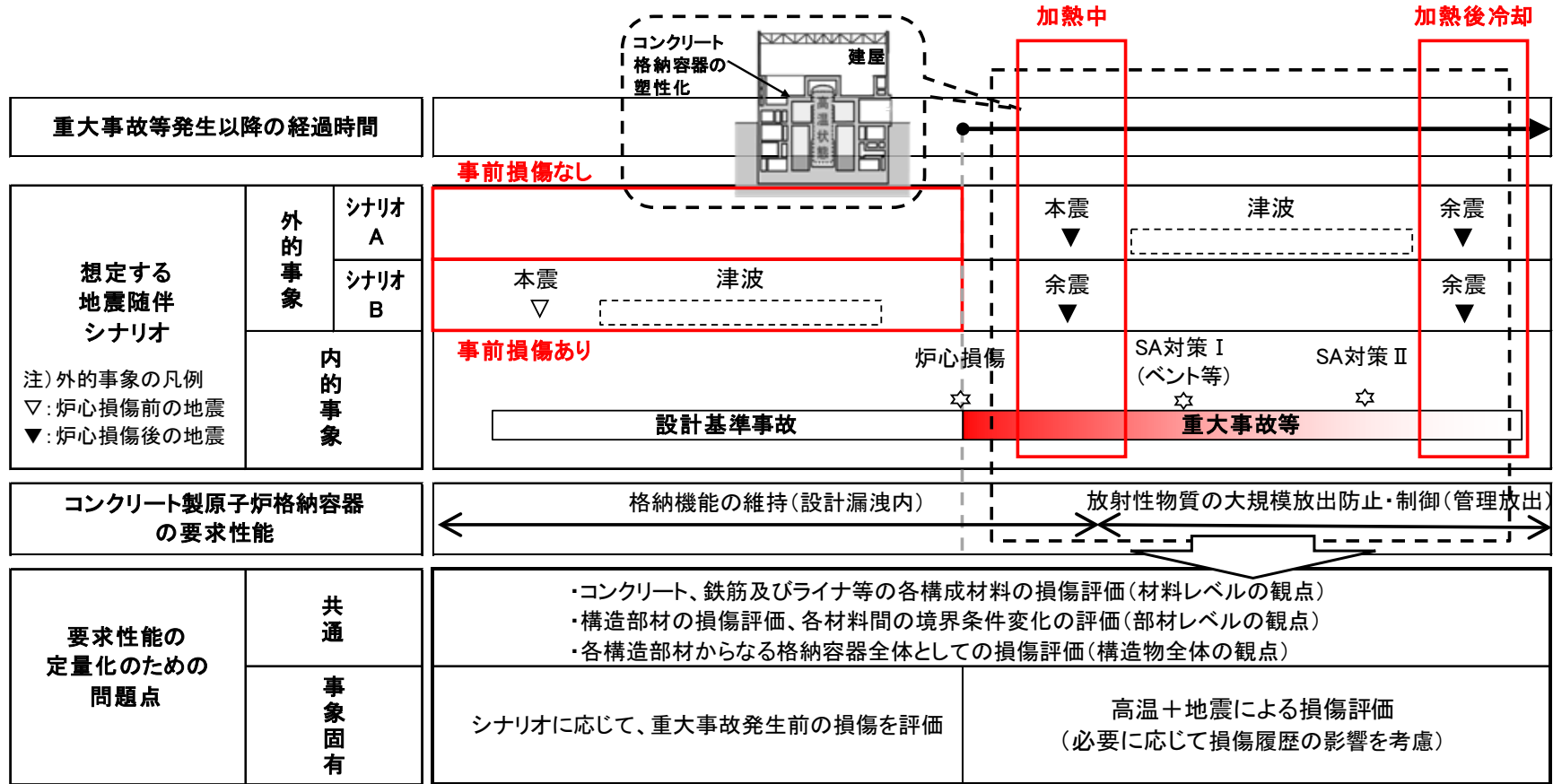


図 3.1-1 地震随件事象に対するコンクリート製原子炉格納容器の要求性能を定量化するための重要な問題点

著作権者から利用許諾を得ていないため非表示



3.1-5

図 3.1-2 PWR プラントにおける内的事象起因の重大事故時の事故進展と格納容器破損との関係^[3.1-1]

著作権者から利用許諾を得ていないため非表示

3.1-6

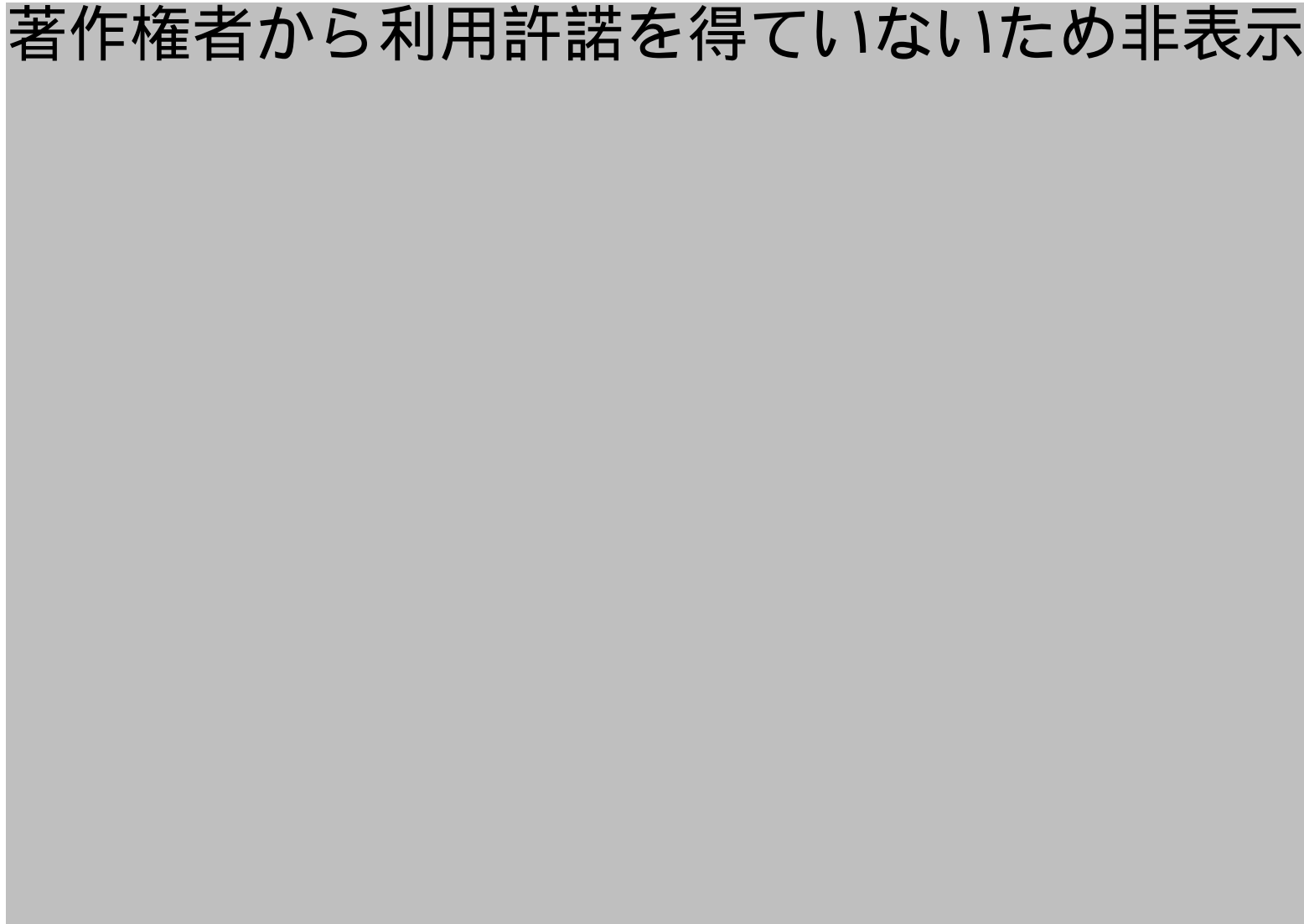


図 3.1-3 BWR プラントにおける内の事象起因の重大事故時の事故進展と格納容器破損との関係^[3.1-1]

著作権者から利用許諾を得ていないため非表示



図 3.1-4 余震を想定すべきタイミング例^{3.1-1)}

(2) コンクリート製原子炉格納容器の要求性能を定量化するための問題点

コンクリート製原子炉格納容器の要求性能を定量化するために、(1)に示した地震随伴事象シナリオに関係ない共通の問題点、及び(1)に示した地震随伴事象シナリオ固有の問題点の2つの観点から、この事業計画との対応関係を整理・分析する。

まず、重大事故時の地震随伴事象に共通する、コンクリート製原子炉格納容器の要求性能を定量化するための問題点として、次の3項目が挙げられる。

- ①コンクリート、鉄筋及びライナ等の各構成材料の損傷評価（材料レベルの観点）
- ②構造部材の損傷評価、各材料間の境界条件変化の評価（部材レベルの観点）
- ③各構造部材からなる格納容器全体としての損傷評価（構造物全体の観点）

なお、②の「各材料間の境界条件変化の評価」は主として次の2種類の評価項目を含んでいる。特に前者の項目に関しては、複雑な応力状態及び損傷進展挙動になるため、上記の①に示す材料レベルの観点のみではモデルパラメータ同定に不足が生じることが考えられる。

【鉄筋材料モデルとコンクリート材料モデルとの相互影響を考慮したそれらの間の境界条件変化の評価】

例えば、単体の材料モデルでは考慮できない、高温時の膨張係数、ポアソン比等が鉄筋とコンクリートとで多少異なることによって生じる、鉄筋とコンクリートとの間の接触・剥離・滑りによる境界条件変化が、構造部材としての強度及び変形能・履歴特性に与える影響のことを指す。

【ライナ材料モデルとコンクリート材料モデルとの相互影響を考慮したそれらの間の境界条件変化の評価】

例えば、単体の材料モデルでは考慮できない、高温時の膨張係数、ポアソン比等がライナとコンクリートとで多少異なることによって生じる、ライナとコンクリートとの間の接触・剥離・滑りによる境界条件変化が、構造部材としての強度及び変形能・履歴特性に与える影響を指す。ただし、こちらはライナ自体が構造部材ではないこと、及びRC躯体中の熱伝導に与える影響が小さくなると考えられる。

次に、(1)に示した地震随伴事象シナリオ固有の問題点として、上記の共通問題点に加えて、重大事故発生までの地震損傷履歴を考慮した評価法へと拡張しなければならないことが挙げられる。

以上より、想定する地震随伴事象に対するコンクリート製原子炉格納容器の要求性能を定量化するための問題点を踏まえて、この事業で必要な実験計画等の全体像を図 3.1-5 に示す。

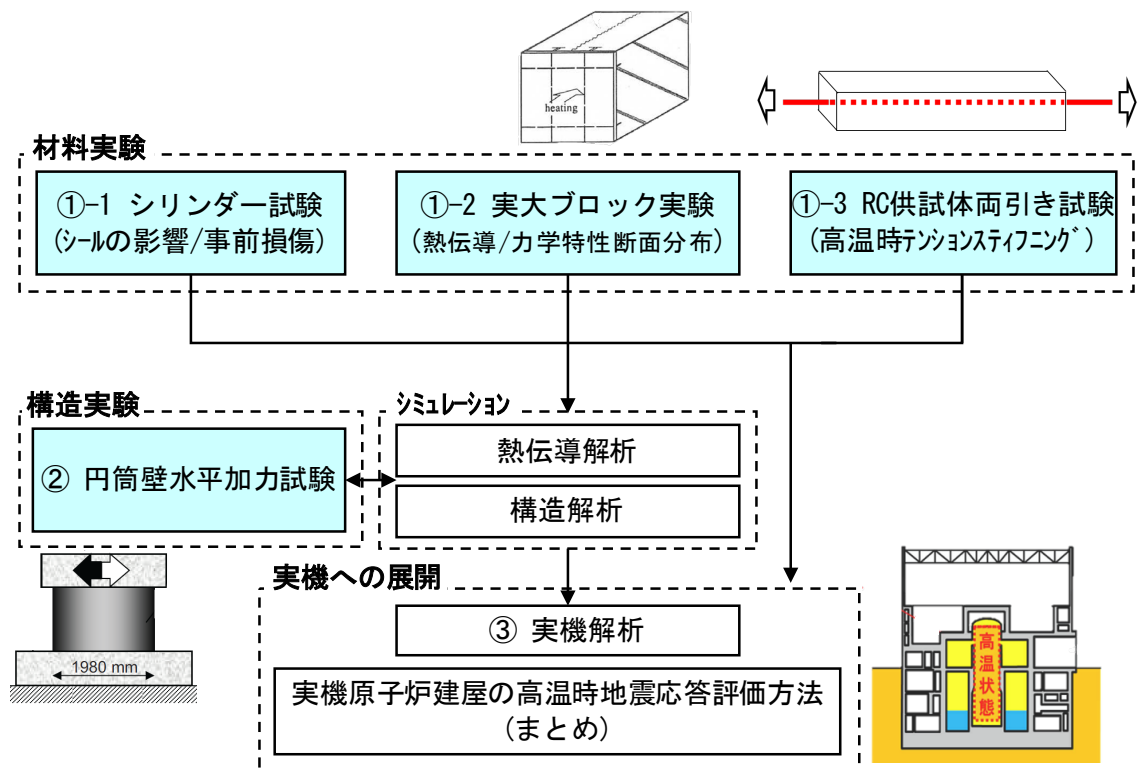


図 3.1-5 実験計画等の全体像

まず、図 3.1-5 で示す『実機原子炉建屋の高温時地震応答評価方法』の最終目標及び現実的目標案に言及したい。『実機原子炉建屋の高温時地震応答評価方法』に関する最終目標としては、時々刻々進展する重大事故時の温度及び圧力履歴下における、FP 放出に関連する大規模破損につながる地震（本震及び余震）時の建屋応答挙動を動的に評価することである。しかし、内的及び外的ハザード評価に係る技術レベルのうち、特に重大事故時、地震（本震・余震）時、及びそれらの重畳時の経時条件（時間推移の予測）に関しては、現時点では発生頻度を含めて極めて大きな不確実さを仮定せざるを得ない。従って、『実機原子炉建屋の高温時地震応答評価方法』に関する当面の目標案としては、重大事故時の代表的な温度及び圧力荷重と、代表的な地震荷重との発生頻度を踏まえた荷重組合せ（載荷及び除荷履歴を含む）を考慮して、大規模破損につながる建屋応答挙動を静的に評価することが現実的であると考えられる

次に、前述した重大事故時の地震随伴事象に共通する問題点①～③と、図 3.1-5 に示す各試験等との対応関係を補足する。

① コンクリート、鉄筋及びライナ等の各構成材料の損傷評価（材料レベルの観点）

①-1 シリンダー試験

実機コンクリート単体材料としての高温時損傷評価モデルへ適用することを目

的とする。この試験では、統計データとして有効な試験体数を計画するため、ばらつきの定量化を含む標準的なモデル化が可能と考えられる。

①-2 実大ブロック試験

実機での構成材料（鉄筋及びライナの存在）における実機コンクリート単体材料の高温時損傷評価モデルへ適用することを目的とする。ただし、シリンダー試験と異なり実験ケース数が限られているために、シリンダー試験で得られる実機コンクリート単体材料の高温時損傷評価モデル（平均モデル）を検証又は補正することに主眼を置くこととする。

①-3 RC 供試体両引き試験

鉄筋コンクリート材料としての高温時損傷評価モデル（ひび割れたコンクリートと鉄筋との間の引張応力分担（応力再配分）特性に関する高温時損傷評価モデル）へ適用することを目的とする。

ここで、高温時のコンクリートの拘束応力及び熱応力が与える影響に関して、材料レベルでの知見及び成果を実機レベルに展開・活用することは、複雑な境界条件を定量的に反映することが困難であるために、材料試験計画の検討対象外とすることが現実的である。

なお、鉄筋及びライナの高温時損傷評価モデルに関しては、少なくとも 200℃までは温度依存性がないことに加えて、200～300℃の範囲でも有意な温度依存性がないという知見も多いため、新たに材料試験を実施する必要性は低いと考えられる。つまり、実機 CCV 挙動に与える高温時影響は小さいと考えられるために、既往知見での温度依存性を考慮することで十分と判断した。

②構造部材の損傷評価、各材料間の境界条件変化の評価（部材レベルの観点）

円筒壁水平加力試験

①で得られる材料レベルの知見を構造部材としての損傷進展評価モデルへ拡張するために、実機 RC 部材の高温時構造特性（円筒形状、鉄筋比、シアスパン比、軸応力度、損傷モード等）を反映した縮小試験を実施する。その際には、①の材料レベルで検討した損傷が構造部材としてどのように損傷進展していくかのモデルパラメータ（各材料間の境界条件変化の評価に関連するモデルパラメータ）を検討する。例えば、①の材料レベルでは確認できない複合応力（せん断応力）を受ける場合の高温時挙動、鉄筋降伏後のコンクリート損傷進展挙動、及び繰り返し履歴に関連するモデルパラメータの検討が該当する。

ここで、高温時のコンクリートの拘束応力及び熱応力が与える影響のうち、高温時の熱応力の影響に関しては、実機 CCV 周辺に取り付く床・壁等の複雑な境界条件を定量的に反映することが困難であるために、構造試験計画の検討対象外と

することが現実的である。一方、高温時の拘束応力の影響に関しては、実機 CCV 最下層を想定した長期軸応力度を考慮することで、鉛直拘束状況に応じた高温時の影響を間接的に評価できると考えて、構造試験計画に反映することとしたい。

なお、①-3 の試験データが不足している場合には、この試験結果を用いた高温時補正は可能であると考えられる。

③各構造部材からなる格納容器全体としての損傷評価（構造物全体の観点）

実機プラント特有の影響（CCV のみならず、その周辺部材の設置状況）を考慮する必要があるために、①及び②で得られた高温時損傷評価モデルを用いて、数値的な仮想実験（実機予測解析）を行うことで、格納容器全体としての損傷評価を実施することが望ましい。特に、材料及び構造試験計画の検討対象外とした、高温時のコンクリートの熱応力が与える影響に関しては、実機 CCV 周辺に取り付く床・壁等の複雑な境界条件の有無をパラメータとした数値的な仮想実験（実機予測解析）を実施することで、高温時の影響を定量的に把握することができる。

【3.1 節の参考文献】

- [3.1-1] 原子力発電所の出力運転状態を対象とした確率論的リスク評価に関する実施基準（レベル 2 PRA 編）：2021(AESJ-SC-P009:2021)
- [3.1-2] NEI Technical Report NEI18-04, Modernization of Technical Requirements for Licensing of Advanced Reactors, “Risk-Informed Performance-Based Technology Inclusive Guideline for Advanced Reactor Licensing Basis Development” , 2019

3.2 既往規格・基準類及び設計事例等の調査

コンクリート製原子炉格納容器に関するものを中心として国内外の規格及び規準を対象に、温度レベルに応じた温度荷重もしくは熱応力の考え方や、地震応答を評価する際の温度荷重もしくは熱応力の扱い及びコンクリートの材料物性について調査を行った。

3.2.1 既往規格・基準類の調査

温度変化に起因する断面力／モーメント（熱応力）の評価及び材料特性の温度依存性について、関連する国内及び国外の主だった規格・基準類をそれぞれ表 3.2-1 及び表 3.2-2 に示す。

国内の規格・基準類については JSME の発行しているコンクリート製原子炉格納容器規格を中心に、シビアアクシデントや一般構造物を対象とした耐火についてのガイドラインに関する調査を行った。国外の既往規格・基準類については原子力分野における温度依存材料特性に関する NUREG 報告（NUREG/CR-6900^[3.2-1]及び NUREG/CR-7031^[3.2-2]）を参考とし、そこで引用されている規格・基準類を中心に調査を行った。なお、NUREG/CR-7031^[3.2-2]を含むレビューペーパーについては「3.3.1 温度影響を受けたコンクリート及び鉄筋コンクリート（RC）部材に関する実験研究の調査」において内容の調査をしている。

既往規格・基準類の調査結果の概要は以下の通りである。

- ・高温時のコンクリート材料特性（力学特性／熱伝導特性）については Eurocode2 をはじめとしてデータもしくは評価式が示されているものが比較的多い一方で、格納容器ライナを念頭に置いたシール条件を考慮したコンクリート材料の高温時の力学特性までは基本的にフォローされていない。
- ・熱応力は自己拘束によって生じる応力であることから部材の塑性化に伴い減少することが知られている。そうした熱応力の性質を踏まえて、弾性計算による熱応力を他の応力と組み合わせる際に低減する方法を明確に示しているのは、調査した中では国内では「JSME S NE1-2014 発電用原子炉設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格」、国外では「ETC-C (EPR TECHNICAL CODE FOR CIVIL WORKS)」のみである。なお、設計においては弾塑性解析と弾性解析の結果比較を通して、線形モデルによる熱応力計算で用いる剛性の低減率を評価している事例も存在する（「3.2.2 設計事例の調査」参照）。
- ・温度荷重を含む重大事故時荷重と地震荷重の重畳という点では、国内では「JEAG4601-2015 原子力発電所耐震設計技術指針 重大事故等対処施設編（基本方針）」において評価方針が整理されている。なお、「建築物荷重指針・同解説」では地震荷重（再現期間 100 年）と温度荷重の重畳の際の温度荷重の荷重係数が示されている。

表 3.2-1 既往の規格・基準リスト（国内）

No.	規格・基準名称	著者	出版年	コメント
1	JSME S NE1-2014 発電用原子炉設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格	日本機械学会	2014	米国 ASME BPVC を参考に策定されており、熱応力を考慮することを要求するとともに熱応力の評価法についても記述されている。
2	JEAG4601-2015 原子力発電所耐震設計技術指針 重大事故等対処施設編（基本方針）	日本電気協会	2015	解説において設計基準事象を超える重大事故等による荷重と地震荷重の組合せに関する考え方が整理され、例示されている。
3	建築物荷重指針・同解説	日本建築学会	2015	地震時の温度荷重に関する扱いについて記載がされている。
4	構造材料の耐火性ガイドブック	同上	2017	耐火設計に資するために、コンクリートの熱物性及び力学的特性について国外の知見も含めて整理されている。
5	JSME S NX5-2018、発電用原子炉設備規格 シビアシビアアクシデント時の構造健全性評価ガイドライン（BWR 鉄筋コンクリート製原子炉格納容器編）	日本機械学会	2018	シビアアクシデント時の鉄筋コンクリート製格納容器の構造健全性評価の方法について具体的に示されており、弾塑性 FEM 解析を用いた評価事例が Appendix において示されている。
6	AESJ-SC-P009：2021、日本原子力学会標準 原子力発電所の出力運転状態を対象とした確率論的リスク評価に関する実施基準（レベル 2PRA 編）：2021	日本原子力学会	2021	「3.1 地震随件事象等の整理・分析 (1)想定する地震随伴シナリオ」参照のこと。

表 3.2-2 既往の規格・基準リスト (国外)

No.	規格・基準名称	著者	出版年	コメント
1	CEB-FIP MODEL CODE 1990	Comite Euro-International du Beton	1993	80℃までの範囲でのコンクリート材料の力学特性の温度依存性について示されている。
2	Eurocode 2	CEN: COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION	2004	コンクリート材料の力学特性及び熱伝導特性の温度依存性について示されている。
3	Eurocode 4	同上	2005	上記 Eurocode 2 とほぼ同様の内容が示されいている。
4	ETC-C (EPR TECHNICAL CODE FOR CIVIL WORKS)	AFCEN	2010	EPRに関するコードであり、プラントの状態に応じた、温度変化により発生する荷重効果の低減に関する記述がある。
5	fib Model Code for Concrete Structures 2010	fib	2010	CEB-FIP MODEL CODE 1990 での記載とほぼ同様であり、軽量骨材コンクリート等について若干の追記がなされている。
6	ACI 349-13	ACI Committee 349	2014	熱応力評価法についての基本的な考え方が記載されている。
7	ACI 216.1-07 / TMS-0216-07 : Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies	ACI/TMS Committee 216	2015	コンクリート材料の力学特性の温度依存性について示されている。
8	AISC 360 : Specification for Structural Steel Buildings	AISC	2016	コンクリート材料の力学特性の温度依存性について示されている。
9	ASCE 7-16 : Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures	ASCE	2017	熱伝導解析、構造解析及び設計に関する基本方針が述べられている。
10	ASME BPVC SECTION III: RULES FOR CONSTRUCTION OF NUCLEAR FACILITY COMPONENTS- DIVISION 2 - CODE FOR CONCRETE CONTAINMENTS	ASME	2021	熱応力を考慮すること及びコンクリート上昇温度 (事故時) の許容制限値を規定。ただし、熱応力の評価方法については具体的記述が無い。

(1) 国内の既往規格・基準

i) JSME S NE1-2014 発電用原子炉設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格

本図書は JSME が発行している国内におけるコンクリート製原子炉格納容器の規格であり、鉄筋コンクリートに対する温度荷重の取り扱いとして、コンクリートの許容温度及び熱応力の評価方法について記述がある。コンクリート部の内表面の許容温度は米国 ASME BPVC Section III Division 2 及び ACI 349 と同等に設定されており、以下の通りである（「CVE-3412 温度制限値」）。なお、定常状態とは通常運転時及び異常時を除く 24 時間以上継続する状態のことであり、非定常状態とは異常時及び短時間（24 時間未満）継続する状態のことを指す。

- 定常状態

貫通部[※]	: 90℃
その他の部分	: 65℃

- 非定常状態

ジェット力を受ける部分	: 340℃
その他の部分	: 175℃

※：シェル部、トップスラブ部及び底部における開口または貫通孔の周辺部

熱応力評価の方法としては 2 種類示されており、剛性の一律低減法、もしくは塑性剛性を評価する方法が一般的であるとされている。剛性一律低減法は以下の通りである（「CVE-3330 熱応力の扱い」）。

・一律低減率の係数は、軸力有り無しの下でのプレストレストコンクリート部材試験、並びに RC 梁試験結果に基づき評価されている。低減率は以下の通りである。

- 荷重状態 I、II（長期、過渡時）	: 1/2
- 荷重状態 III（短期）	: 1/3
- 荷重状態 IV（機能維持）	: 0

また、本規格では、各荷重状態において熱応力を除いて組み合わせた応力状態のことを応力状態 1、各荷重状態において応力が生じている状態のことを応力状態 2 と定義しており、応力状態 2 におけるコンクリートの許容圧縮応力度は応力状態 1 の許容圧縮応力度と比較して以下の通り緩和されている（「CVE-3413 コンクリートの圧縮許容応力度」）。

- 荷重状態 I 及び II

応力状態 1 : $F_c / 3$, 応力状態 2 : $9 / 20 F_c$

- 荷重状態 III

応力状態 1 : $2 / 3 F_c$, 応力状態 2 : $3 / 4 F_c$

なお、高温時コンクリートの材料特性に関する記述は確認出来なかった。

ii) JEAG4601-2015 原子力発電所耐震設計技術指針 重大事故等対処施設編 (基本方針)

本図書では設計基準事象を超える重大事故等が発生した状態を運転状態Vと定義し、「5. 荷重の組合せ」において重大事故等の発生確率及び継続時間と地震の発生確率の関係を整理している。解説において、荷重の組合せを考慮するか否かの判断基準としては国内外の基準等を参考に 10^{-7} /炉年とし、弾性設計用地震動 S_d (10^{-2} /年) 及び基準地震動 S_s (5×10^{-4} /年) をそれぞれ事故発生後 10^{-1} 年後の事故時荷重条件及び事故発生後1年後の事故時荷重条件と組み合わせることを例として示している。なお、高温時コンクリートの材料特性に関する記述は確認出来なかった。

iii) 建築物荷重指針・同解説

「2.4.3 温度荷重の荷重係数」において、地震荷重(工学基盤面における水平加速度応答スペクトルの再現期間100年に対する値を基に算定)と、温度荷重を従の荷重として組み合わせる際の温度荷重の荷重係数は0.4とするとの記載がされている。なお、高温時コンクリートの材料特性に関する記述は確認出来なかった。

iv) 構造材料の耐火性ガイドブック

本図書は日本建築学会が発行している耐火設計に必要とされる技術資料の提供を目的としたガイドブックである。「第2章 コンクリート材料」において国内外のコンクリートの熱物性及び力学特性に関する知見が全般的にまとめられている。質量、熱膨張係数、熱伝導率及び比熱といった熱特性や圧縮強度やヤング係数、付着強度及び引張り強度について知見が整理され、温度依存性について一部定式化がなされている。また、後述する Eurocode2 において示される高温条件下のコンクリートの応力-ひずみ関係については、『通常の試験と比較して高温時の強度時ひずみがかかなり大きいことから遷移クリープ(過渡ひずみ+定常クリープ)を含んでいると考えられる』と指摘している。なお、地震時における温度荷重もしくは熱応力の取り扱いに関する記載は確認出来なかった。

v) JSME S NX5-2018 発電用原子炉設備規格 シベリアシベリアアクシデント時の構造健全性評価ガイドライン (BWR 鉄筋コンクリート製原子炉格納容器編)

シベリアアクシデントを対象とした鉄筋コンクリート製原子炉格納容器のガイドラインである。コンクリートの温度の設定法としては、非定常温度分布解析によりコンクリート断面内の温度を時刻歴で与える方法と、定常温度分布解析により与える方法が示されている。鉄筋コンクリート製格納容器の弾塑性解析による評価事例が示されている。熱応力の評価として、格納容器内の雰囲気温度 200°C で定常状態を仮定して温度分布解析を実施し、弾塑性構造解析において温度分布解析結果を考慮している。鉄筋及びコンクリートの力学特性については後述する Eurocode 2 及び 4 を参考に温度依存性を考慮している。

vi) AESJ-SC-P009 : 2021、日本原子力学会標準 原子力発電所の出力運転状態を対象とした確率論的リスク評価に関する実施基準（レベル 2PRA 編）：2021

「3.1 地震随伴事象等の整理・分析 (1)想定する地震随伴シナリオ」参照のこと。

(2) 国外の既往規格・基準

i) CEB-FIP MODEL CODE 1990

「2.1.8 Temperature effect」においてコンクリート材料の温度依存性に関する記載がある。80℃を超える範囲では特に粗骨材の種類及びコンクリートの水分状態に大きく影響を受け、定式化するには複雑過ぎるという理由から、0℃～80℃程度の範囲のみを対象としており、この範囲を逸脱するものについては、実験的に確認することを推奨している。なお、本図書の「2.1.8 Temperature effect」以外の部分での対象温度域は-20℃～40℃の範囲である。熱膨張、圧縮強度、引張強度、破壊エネルギー及び弾性係数の温度依存性について定式化されているが、本事業において、シビアアクシデントも含めて対象とする最高温度が 300℃までであることを踏まえると、本図書を参照して鉄筋コンクリートの高温時の挙動を評価するのは不相当であると考えられる。地震時における温度荷重もしくは熱応力の取り扱いに関しては明示されていない。

なお、CEB は Schneider らの調査^[3.2-3]等に基づいて別途「Fire Design of Concrete Structures in accordance with MC90 (1991)」を発行しており、当該図書にはコンクリートの圧縮強度、弾性係数及び引張り強度の温度依存性に関して 700℃以上の高温域まで記載がされている。

ii) Eurocode 2: Design of concrete structures

欧州における鉄筋コンクリートの設計法についての図書である。温度影響に関する記載は以下の通りである。

- Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1992-1-1:2004)の「5.4 Linear elastic analysis」において、部材の解析は運用状態、終局状態に対して、ひび割れの無い断面、線形の応力-ひずみ関係及び平均の弾性係数を仮定した弾性論に基づく線形解析を適用できることを規定している。後述する ETC-C では Eurocode のこの記述を引用している。終局状態における熱変形、沈下、及び収縮の影響を評価する場合、テンションスティフニング効果を見逃し、クリープ影響効果を考慮して、ひび割れ断面に対応した低下剛性を仮定して良く、運用状態に対しては、徐々に進展するひび割れ影響を考慮しなければならないと記載されている。
- Part 1-1: General rules — Structural fire design (EN 1992-1-2:2004)ではコンクリート及び鉄筋の材料特性の温度依存性について以下の様な具体的な記載がなされている。

- コンクリートの圧縮側挙動については圧縮強度、強度時ひずみ及び終局ひずみの温度依存性について 1200°Cの範囲までのテーブルデータが、珪岩質骨材を使用した場合及び石灰質骨材を使用した場合に分けて記載されており、テーブルに示されるこれらの値をパラメータとして一軸応力-ひずみ関係を定めることが可能である。また、引張り側については引張強度の温度依存性が示されている。なお、本図書において示されている応力-ひずみ関係は温度定常状態及び遷移状態による実験結果に基づいて定めており、クリープ効果は陽には考慮されていないと記載されている。また、加熱速度：2~50 K/min が適用範囲であるとされている。
- コンクリートの熱膨張については珪岩質骨材を使用した場合と石灰質骨材を使用した場合の二つに分けて 1200°Cまでの範囲で温度依存性を考慮した定式化がなされている。
- 比熱については、含水率が 0.0%、1.5%及び 3.0%に分けて温度に応じた比熱の算定式が示されている。また、熱伝導率については上限及び下限値が示されている。その他、密度についても温度についての関数として低減率が示されている。

iii) Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures

欧州における鋼材とコンクリートから成る複合構造の設計についての規定である。Part 1-2: General rules - Structural fire design (EN 1994-1-2:2005)において火災に対する設計法に関する記述があり、力学特性及び熱物性等の材料特性については、鋼材、コンクリート共に Eurocode 2 における記述とほぼ同様のことが記載されている。

iv) ETC-C (EPR TECHNICAL CODE FOR CIVIL WORKS)

欧州の EPR を対象とした設計及び施工に関する規準である。「Eurocode 2: Design of concrete structures」の温度影響に関する線形弾性の応力解析に関する規定 (EN 1992-1-1, 5.4 Linear elastic analysis) を「1.4.4.1 Linear elastic analysis」において引用し、コンクリートの圧縮強度について $30\text{MPa} \leq f_{ck} \leq 60\text{MPa}$ かつ引張り鉄筋比 $\leq 1\%$ を対象とし、通常運転状態、遷移状態、事故時状態の 3 つの状態に対して温度により誘発される荷重(荷重効果)は以下の係数を用いて低減して良いとされている。

通常運転状態	: 0.6
遷移状態	: 0.5
事故時状態	: 0.35

v) fib Model Code for Concrete Structures 2010

CEB-FIP MODEL CODE 1990 と基本的に同様の記載がされている。対象としている温度域は 0°C~80°C程度であり、本事業での適用は不相当と考えられる。また、「7.5.1.2 Fire design principles」にはコンクリートの応力-ひずみ関係について Eurocode2 を引用して

いる。なお、地震時における温度荷重もしくは熱応力の取り扱いに関しては明示されていないと思われる。

vi) ACI 349-13

本図書は「Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08)」をベースとした原子力関連施設を対象としたコンクリート構造に関する規準である。「APPENDIX E – THERMAL CONSIDERATION」において、温度荷重に関する基本的な事項が示されている。

- コンクリートの温度は以下の範囲とする。なお、試験で強度低下を確認し、その強度低下を設計許容値に反映する場合は、更なる高温も許容される。また、Code Committeeの調査及び判断により緩和規定が追加されており、材齢 28 日以降の圧縮強度が 28 日設計基準強度より 15%以上高い場合は、下記（ ）内の温度が許容される。
 - 通常運転時 一般部：66 °C (82°C)
局部：93 °C (110°C) (配管貫通部など)
 - 事故時、短期的な事象 一般部：177°C
局部：343°C (配管破断による蒸気・水ジェット作用部)
- 温度分布は、等価線形化して設計に用いてよい。熱応力評価は、ひび割れ断面に基づく剛性及び拘束の程度を考慮し、以下の事項に合致しなければならない。
 - 応力が引張強度を超えた断面はひび割れたと判定する。
 - ひび割れによる応力の再配分を考慮する。
 - 温度以外のすべての組み合わせ荷重を考慮
- 熱応力評価の具体的適用法に関して、以下の内の 1 手法によることが出来ると Commentary に記載されている。
 - 保守的になるが、全断面有効とした線形解析結果により評価をする。
 - 最も精緻で最大の温度低減率が期待できる手法として、温度荷重を含めた全荷重組み合わせ下での、ひび割れを考慮した弾塑性解析がある。ただし、複雑で設計者がすぐに使用できる状況ではない。
 - 第三の手法は、外力に対しては線形解析により応力を求め、温度荷重に対してのみ断面のひび割れ影響を考慮して応力を評価することである。この手法の難点は、どの部分が温度によりひび割れが生じ、ひび割れ断面として評価しなければならないかを決定することにある。

vii) ACI 216.1-07 / TMS-0216-07 : Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies

コンクリート構造及び組積造に関する耐火要求に関するコードであり、「CHAPTER 2 - CONCRETE」においてコンクリートの圧縮強度（871℃程度まで）、比熱、熱伝導率及び密度に関するデータが記載されている。加熱冷却後のコンクリートの残存圧縮強度も併記されており、加熱冷却後のコンクリートは加熱中のコンクリートと比べて圧縮強度は低い傾向にあることが示されている。なお、地震時における温度荷重もしくは熱応力の取り扱いに関しては明示されていない。

viii) AISC 360 : Specification for Structural Steel Buildings

本図書は鋼構造に関する規準であるが鋼材とコンクリートの複合構造も対象としている。「APPENDIX 4 STRUCTURAL DESIGN FOR FIRE CONDITIONS」にコンクリートの圧縮強度、弾性係数及び終局ひずみの温度依存性について表形式で 1200℃まで記載されており、また熱膨張率についても示されている。なお、地震時における温度荷重もしくは熱応力の取り扱いに関しては明示されていないと思われる。

ix) ASCE 7-16 : Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures

ASCE が発行している設計荷重及びクライテリアに関する基準であり、Commentary のうち「CE.5 Thermal Analysis of Fire Effects」及び「CE.6 Structural Analysis of Fire Effects」にそれぞれ火災に対する熱伝導解析、構造解析及び設計に関する基本方針が述べられている。また、熱伝導解析及び高温時のコンクリートを含む材料物性については参考となる規格・基準類、論文及びレポートなどがリスト化されている。

x) ASME BPVC SECTION III: RULES FOR CONSTRUCTION OF NUCLEAR FACILITY COMPONENTS- DIVISION 2 - CODE FOR CONCRETE CONTAINMENTS

本図書はコンクリート製格納容器に関する規準であり、熱応力を考慮する事及び ACI 349-13 と同一のコンクリート許容温度規定が示されているが、熱応力の具体的な評価方法については記載がない。設計としては、熱応力は二次応力【※】に分類され、二次応力を含む荷重組合せに対しては許容応力が緩和されている。ただし、せん断応力に関しては、一次応力として扱う事を規定している。なお、高温時のコンクリートの材料物性に関する記載はないものと思われる。

※一次応力：外力による応力／二次応力：外力以外の収縮、熱ひずみ等による局部応力

3.2.2 設計事例の調査

国内外のコンクリート製原子炉格納容器の耐震設計・評価事例について調査を行い、耐震設計・評価における温度荷重の取り扱いについてまとめた。以下に調査の対象とした事例を示す。

- ① 国内の事例 コンクリート製格納容器の設計法^[3.2-4]
- ② 米国 ESBWR (Economic Simplified Boiling Water Reactor)^[3.2-5]
- ③ 米国 AP1000^[3.2-6]

国内の事例としてはコンクリート製格納容器の設計法について概観したレポートを取り上げる。その他、国外の事例として、米国の ESBWR 及び AP1000 を対象として実施された事故時の温度条件下の剛性や熱により発生する建屋の断面力／モーメントや応力の評価に関する論文について記す。前述の通り、米国の規格である ASME BPVC SECTION III Division 2 では、コンクリートが経験する温度の許容値と熱応力を考慮することが示されているのみであり、熱応力の評価方法については記載されていない。そのため、基本的には設計者が熱応力評価法の妥当性の説明をする必要がある。上記 2 つの論文は、線形解析によって得られた熱応力を地震時の水平力を含めたその他の荷重と組合わせて設計することを前提としており、事故時温度条件下の断面力／モーメントや建屋剛性の低減率について、弾塑性解析と線形解析の比較の中で議論を行っている。

(1) 国内の事例 コンクリート製格納容器の設計法：文献^[3.2-4]

本ペーパーはコンクリート製原子炉格納容器に関する研究成果及び設計法を概括したものである。「3.2 各荷重状態に対する設計」においては、荷重状態Ⅰ～Ⅲでは熱応力を他の外力による応力と組合せた場合には、許容応力の割増しを行っても良いとしている（「3.2.1(1) i) JSME S NE1-2014 発電用原子炉設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格」と同様）。

「3.4 温度荷重に対する設計」において温度荷重の取り扱いに関する記載がある。温度荷重による応力は自己限定的応力であり、部材の塑性化に伴い減少するため、基準上は外力による応力と同等に扱わないことが確立されていることを指摘している。また終局状態では熱応力を無視して良いとされているが、その根拠として、温度負荷が構造の耐力に影響を与えないことが実験的に確認されていることを挙げている。熱応力特性に関する実験としては RC 部材の軸剛性及び曲げ剛性に関する実験が、熱応力の終局耐力への影響という観点では全体縮小 1/20 モデルによる温度負荷+内圧試験が実施されていることを挙げている。実験の結果からコンクリート部材の塑性化と存在熱応力の性状との関係を整理し（図 3.2.2-1）、それらに基づき、コンクリート断面の剛性を低減して弾性計算より応力を求め、これを設計応力とすることも同等と判断するに至ったとまとめている。

著作権者から利用許諾を得ていないため非表示



図 3.2.2-1 熱応力実験の結果^[3.2-4]

(2) 米国 ESBWR (Economic Simplified Boiling Water Reactor) : 文献[3.2-5]

本論文は線形の熱応力解析で考慮する事故時温度条件下の剛性低減係数を求めるための弾塑性 FEM 解析と線形の FEM 解析の比較について説明したものである。米国 ESBWR の RCCV を対象としている。汎用 FEM プログラム「Abaqus」を用いおり、コンクリートはソリッド要素、鉄筋はトラス要素によりモデル化されている。コンクリートの構成則には「ANACAP-U」を採用している。温度によるコンクリートのクラックを考慮した断面の剛性低減係数を求めるための手順は以下の通りである。

- (1) 定常熱伝導解析を実施し、通常運転時の温度分布を得る。夏季及び冬季の条件に対して実施している。
- (2) LOCA 発生から 72 時間までの範囲について夏季及び冬季の両条件について非定常熱伝導解析を実施する。
- (3) 線形の応力解析を実施する。一つ目は通常運転時条件の定常熱伝導解析結果を使用したものである。その後、LOCA 発生後 5 秒後、6 分後、10 時間後及び 72 時間後について応力解析を実施する。この解析ではクラックは発生しないが、高温条件による弾性係数の低下は考慮している。
- (4) 同様の FE モデルを使用し、前記した同じ時点の温度条件に対する非線形の応力解析を実施する。このとき、コンクリートのクラック及び高温条件による弾性係数の低下が考慮される。
- (5) あらかじめ定めておいたクリティカル断面において断面力とモーメントを、線形解析及び非線形解析のどちらについても算定をする。
- (6) あらかじめ定められた RCCV の鋼製の部品について、Von Mises 応力もしくは有効応力を、線形解析及び非線形解析のどちらについても算定する。
- (7) 非線形の解析（ひび割れ解析）結果から線形解析の結果を割り算することにより、温度による剛性低減率を求める。この割合は冬季及び夏季の両条件に対し、各時間、各断面の断面力毎（もしくは応力点毎）に算定する。

本論文では別途梁モデルによる熱応力解析の線形解析の結果と弾塑性解析の結果（断面力）の比較を示しており、340°F (171°C 程度) 付近では線形解析で発生する断面力は弾塑性解析で発生する断面力の 3~4 倍程度となっていることが読み取れる。

(3) 米国 AP1000 : 文献[3.2-6]

本論文では米国 AP1000 を対象として、事故時温度荷重及び地震を考慮した解析を汎用 FEM プログラム「Abaqus」を用いて実施している。コンクリートは積層シェル要素によりモデル化されており、鉄筋についてはリバー層として積層シェル要素の中に定義している。

解析については、まず、事故時条件の下での熱伝導解析を実施し、その結果を用いて熱応力解析と、連続して直接積分による時刻歴地震応答解析を実施している。

汎用 FEM プログラム「ANSYS」を用いて同様の線形解析を実施しており、特定の要素について応力の時刻歴を比較している。

線形解析と非線形解析の結果の比較により、線形の解析ではコンクリートのクラックを考慮しないため温度による構造物の膨張を過剰に拘束し、熱応力が過大となることを指摘している。

より現実的な線形の熱応力解析を実施するために、非線形解析に基づいて線形解析の低減係数を適切に設定する方法を提案することが、今後の課題として挙げられている。

【3.2 の参考文献】

- [3.2-1] NUREG/CR-6900, "The Effect of Elevated Temperature on Concrete Materials and Structures – A Literature Review" Nuclear Regulatory Commission (NRC), Office of Nuclear Regulatory Research, Washington, DC., 2006.
- [3.2-2] NUREG/CR-7031, "A compilation of elevated temperature concrete material property data and information for use in assessments of nuclear power plant reinforced concrete structures." Nuclear Regulatory Commission (NRC), Office of Nuclear Regulatory Research, Washington, DC., 2010.
- [3.2-3] U. Schneider, "Concrete at high temperatures - a general review." Fire Safety Journal, 13(1), pp.55-68., 1988.
- [3.2-4] 秋野金次, 渡部征男, コンクリート製格納容器の設計法, コンクリート工学会 Vol.19, No.7, pp.79-87, July 1981
- [3.2-5] Randy J. James, Ai-Shen Liu: "NONLINEAR ANALYSES FOR THERMAL CRACKING IN THE DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES," Proceedings of the 17th International Conference on Nuclear Engineering ICONE17, July 12-16, 2009.
- [3.2-6] J. Jennifer Zhang, Lee J. Tunon-Sanjur: "NON-LINEAR ANALYSIS OF AP1000 AUXILIARY & SHIELD BUILDING SUBJECTED TO COMBINED ACCIDENT THERMAL AND SEISMIC LOADINGS", Proceedings of the 2014 22nd International Conference on Nuclear Engineering ICONE22, July 7-11, 2014.

3.3 既往研究の調査

3.3.1 温度影響を受けたコンクリート及び鉄筋コンクリート (RC) 部材に関する実験研究の調査

温度影響を受けたコンクリートの材料物性に関する国内外の材料実験事例を調査し、知見を整理した。なお、加熱中または加熱後のコンクリートの材料物性について調査した事例を対象として、材料物性として圧縮強度、引張強度、弾性係数などについて整理した。調査した参考文献のリストを表 3.3.1-1～表 3.3.1-3 に示す。その結果、3.2 での調査では不足していた、次の要因に対する材料物性（物理特性及び熱特性）としての温度影響に関する知見が得られた。

- ・ 加熱履歴・加熱時間の相違が材料物性に与える温度影響
- ・ コンクリート中のセメント種類の相違（フライアッシュ使用）が材料物性に与える温度影響
- ・ 長期高温加熱下での大型部材コア抜き試験に基づく材料物性の温度影響

また、温度影響を受けた鉄筋コンクリート部材の構造特性に関する国内外の構造実験事例を 3 例程度調査し、知見を整理した。なお、加熱中または加熱後の鉄筋コンクリート部材に対して構造実験を実施している例を対象とし、変形特性、耐力などについて整理した。その結果、300℃までの加熱条件下での鉄筋コンクリート部材の終局強度に与える温度影響は、材料試験強度のそれと比べると小さい実験結果となっている事例が多いことが分かった。

一方で、高温状態のコンクリート製原子炉格納容器の地震時の構造特性評価を行うにあたっては以下の観点からの知見が乏しいため、今後の研究の進展が望まれる。

- ・ 格納容器ライナのコンクリートに与えるシール効果を考慮した高温時のコンクリート材料の力学特性及び熱伝導特性
- ・ (地震を念頭においた) 事前損傷を受けた場合の高温時のコンクリート材料の力学特性及び鉄筋コンクリート部材の挙動
- ・ 高温下の鉄筋-コンクリート-間の相互作用（テンションスティフニング効果：付録 3 参照）

表 3.3.1-1 参考文献リスト（材料実験）（*1：文献中で構造実験も実施、*2：文献中で解析も実施）

No.	論文題名	著者	出典	年・月	コメント
1	Response of the Bond in Reinforced Concrete to High Temperatures	P.D. Morley, R. Royles	Magazine of Concrete Research 35(123), pp. 67-74	1983	鉄筋コンクリートの鋼材とコンクリートの付着に及ぼす高温の影響を、20～750℃の温度範囲で実験している。試験条件では、かぶり厚さ、加熱時の応力の有無、及び加熱時または冷却後に試験を実施するかを変数としている。実験の結果、付着性能はコンクリートの強度に大きく依存したとしており、温度による付着強度の低下は、それに対応するコンクリートの圧縮強度の低下よりも大きかったとしている。また、加熱時に応力を加えた付着試験片は、応力を加えなかった試験片より性能が向上したとしている。
2	両引き試験による鉄筋コンクリートのひびわれ分散性に関する研究	村田二郎, 河合紘弦	土木学会論文集, 第378号/V-6, pp.107-115	1987.2	鉄筋コンクリート部材のひび割れ分散性を簡易に試験する方法として両引き試験を取り上げ、この試験方法の適正化のための諸提案を行うとともに、両引き試験によって、異形鉄筋の表面形状、およびコンクリートの品質がひび割れ分散性に及ぼす影響を確かめている。両引き試験として、間隔を少しずつ変化させて切欠きを設けることにより、ひび割れ発生位置を制御した供試体を用い、最大ひび割れ間隔によってひび割れ分散性を評価する方法が適しているとしている。異形鉄筋の表面形状がひび割れ分散性に及ぼす影響はごく小さいとしている。

表 3.3.1-1 参考文献リスト（材料実験）（*1：文献中で構造実験も実施、*2：文献中で解析も実施）

No.	論文題名	著者	出典	年・月	コメント
3*1,2	Structural behavior of reinforced concrete structures at high temperatures	N. Yamazaki, M. Yamazaki, T. Mochida, A. Mutoh, T. Miyashita, M. Ueda, T. Hasegawa, K. Sugiyama, K. Hirakawa, R. Kikuchi, M. Hiramoto, K. Saito	Nuclear Engineering and Design 156, pp.121-138	1995	高温下におけるコンクリート及び鉄筋の材料特性並びに過渡的高温条件下におけるマッシュなコンクリート壁の熱伝達特性を把握するために、シリンダー試験等並びに厚さ 2m の鉄筋コンクリート壁の試験体による実験を実施している。シリンダー試験等では、複数の試験により室温～800℃の温度範囲でコンクリート及び鉄筋の熱的特性および機械的特性を実験している。また、厚さ 2m の鉄筋コンクリート壁の試験体では、ひび割れの有無を考慮した 2 体の試験体に対して、1 面の鋼製ライナを約 800℃に加熱して伝熱特性を実験している。実験の結果、ひび割れ有無について、100℃付近でひび割れ領域の温度分布が異なる以外、ほとんど差が見られなかったとしている。
4	Effect of fire on concrete and concrete structures	Gabriel Alexander Khoury	Progress in Structural Engineering and Materials 2000, 2:429-447	2000	この論文では、(a)コンクリートの機械的特性の劣化（特に、火災時の高性能（強度：60～100MPa）及び超高性能コンクリート（強度：100～300MPa））、(b)爆発性の剥離とポリプロピレン繊維の使用、(c)間隙水圧と剥離を予測できる有限要素構造解析モデルの開発、(d)トンネル内での火災について、一般的で簡単な概要を紹介している。また、読者がこの分野の専門家ではないことを前提として、火災工学の基本原則も紹介されている。

表 3.3.1-1 参考文献リスト（材料実験）（*1：文献中で構造実験も実施、*2：文献中で解析も実施）

No.	論文題名	著者	出典	年・月	コメント
5	Effects of stress during heating on strength and stiffness of concrete at elevated temperature	M. Petkovski	Cement and Concrete Research, 40, pp.1744-1755	2010	異なる応力条件下での加熱が、多軸圧縮を受けたコンクリートのその後の高温時の応力ひずみ挙動に及ぼす影響を把握するために、高温多軸圧縮実験装置 MAC ^{2T} で実験を実施している。試験結果より、コンクリートの初期加熱時に荷重が存在する場合、特定の損傷メカニズム（载荷時熱損傷）が生じ、また、载荷時熱損傷はコンクリートの载荷時熱ひずみ（LITS）の主な原因となっている。
6	700℃までの高温に曝されたコンクリートの力学特性の変化	抱憲誓, 西村光太, 宮本圭一, 澤田祥平, 門馬隆弘	日本建築学会大会学術梗概集（北海道）, 101-102	2013	高温に曝されたコンクリートについて、各温度における圧縮強度及び静弾性係数と質量減少との関係を把握するために、シリンダー試験を行っている。実験条件は、温度 6 水準（20～700℃）及び加熱期間 3 水準（1、3、7 日）（温度 105℃では 3 水準（8 時間、18 時間、14 日）を追加）としている。各温度域における平衡状態の有無に応じてコンクリートの高温時の力学特性は変化し、圧縮強度と静弾性係数でその傾向は異なることを指摘している。

表 3.3.1-1 参考文献リスト（材料実験）（*1：文献中で構造実験も実施、*2：文献中で解析も実施）

No.	論文題名	著者	出典	年・月	コメント
7	高温におけるコンクリートと鉄筋の付着-すべり関係に関する研究	富永暖子, 西山峰広, 坂下雅信	コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1159-1164	2013	高温下でコンクリートシリンダーからの鉄筋引抜試験を実施し、付着応力-すべり関係をj得ている。実験変数は温度（常温及び 100～600℃まで 100℃刻み）としている。実験結果より、最大付着応力は、常温から一旦 100℃で低下するが、200℃で回復し、以降 600℃まで低下し続けた。これは、コンクリートの熱間圧縮強度の挙動と酷似しており、コンクリートの圧縮強度低下が最大付着応力の低下に大きく影響しているものと考えられるとしている。
8	Influence of Heating Time on Fracture Properties of Heated Concrete	Koichi Matsuzawa, Yoshinori Kitsutaka	SMiRT23	2015	100～800℃の高温環境下で 1～168 時間曝されたコンクリートの、クラックに関連する破壊特性、クラック発生の初期結合応力、及び伝播による破壊エネルギーを把握するためにくさび割裂試験を実施している。試験結果より、初期結合応力は、加熱時間 24 時間まではばらついており、加熱時間 24 時間以降ではほぼ一定となる。破壊エネルギーは、加熱時間 1 時間よりも加熱時間 12 時間の方が高く、24 時間後に低下し、その後、加熱温度が 400℃以下で再び上昇するとしている。

表 3.3.1-1 参考文献リスト（材料実験）（*1：文献中で構造実験も実施、*2：文献中で解析も実施）

No.	論文題名	著者	出典	年・月	コメント
9	Physical and Thermal Properties of Concrete Subjected to High Temperature	Norichika Kakae, Keiichi Miyamoto, Takahiro Momma, Shohei Sawada, Hitoshi Kumagai, Yukiharu Ohga, Hideo Hirai, and Tetsuo Abiru	Journal of Advanced Concrete Technology, 15(6), pp.190-212	2017	高温下におけるコンクリートの物理的特性（圧縮強度、弾性率、圧縮時ひずみ、割裂引張強度）および熱特性（熱膨張ひずみ、比熱、熱伝導率）の温度依存性を把握するために、JIS A 1132 に従った実験等を実施している。また、これらの変数がコンクリートの特性に及ぼす影響を明らかにするとともに、試験結果と Eurocode 等の既存のコードとの相違点を明らかにしている。

表 3.3.1-2 参考文献リスト（構造実験）（*1：文献中で材料実験も実施、*2：文献中で解析も実施）

No.	論文題名	著者	出典	年・月	コメント
1	長期高温加熱を受けたコンクリート部材の強度性状に関する研究	丸田誠, 山崎敏敏	コンクリート工学年次論文報告集, 11-1, pp.523-528	1989	試験を2種類実施し、長期高温加熱を受けたコンクリート部材の強度性状に関するデータを得ている。1つ目は、鉄筋コンクリートばりの長期間加熱（片面（下面）を175℃）及び加力（曲げモーメントを5.0tm）を3ヶ月間または12ヶ月間行った後の曲げ耐力試験（RC部材曲げ実験）である。配筋が釣り合い鉄筋比以下で非加熱面の鉄筋の曲げ降伏で崩壊モードが決まったため、175℃1年間加熱の影響は少なかったとしている。2つ目は、大型のコンクリート部材の長期片面（下面）加熱を3ヶ月間または12ヶ月間行った後のコア強度試験（大型部材コア強度試験）を実施している。100℃以上175℃まででは、加熱前に比べ圧縮強度は0.5～0.6、静弾性係数は0.45～0.7と大きく低下したとしている。
2	長期加熱を受けた鉄筋コンクリートばりのせん断性状に関する研究	丸田誠, 山崎敏敏	コンクリート工学年次論文報告集, 12-1, pp.603-608	1990	高温（65、95、175℃）を片面（下面）から受けるRCばりの長期加熱（1、3、6、12ヶ月）を行った後のせん断耐力実験を行い、長期加熱を受けたRC部材のせん断性状に関するデータを得ている。試験結果より、65、90、175℃加熱とも内部の加熱近傍のコア強度劣化の割合に比べ、はりのせん断終局強度の劣化の割合は、かなり小さかった。また、65、90、175℃とも内部温度が最も低く、コンクリート強度の劣化度が最も小さい上面近傍でのコア強度劣化と、はりのせん断強度劣化はほぼ対応したとしている。

表 3.3.1-2 参考文献リスト（構造実験）（*1：文献中で材料実験も実施、*2：文献中で解析も実施）

No.	論文題名	著者	出典	年・月	コメント
3 ^{*1,2}	Structural behavior of reinforced concrete structures at high temperatures	N. Yamazaki, M. Yamazaki, T. Mochida, A. Mutoh, T. Miyashita, M. Ueda, T. Hasegawa, K. Sugiyama, K. Hirakawa, R. Kikuchi, M. Hiramoto, K. Saito	Nuclear Engineering and Design 156, pp.121-138	1995	高温下における鉄筋コンクリート梁の構造的な挙動を把握するために、3つのシリーズ（せん断スパン比が0.75の加熱面上で圧縮または引張となる2つのシリーズ、せん断スパン比が2.0の加熱面上で圧縮となる1つのシリーズ）からなる梁の載荷試験を実施している。また、梁の上面を加熱し、その加熱温度は、3水準（室温、300℃、800℃）としている。実験の結果、表面温度がRC部材の剛性、亀裂発生荷重、終局強度などの基礎的性質に大きな影響を及ぼすことが明らかとなったとしている。
4 ^{*2}	Applicability evaluation of steel plate reinforced concrete structure to primary containment vessel of BWRs (5) horizontal loading test of cylindrically-shaped steel plate reinforced concrete structure under high temperature conditions	Takashi Okayasu, Takahiro Momma, Yuichiro Imamura, Shigehiro Mimori, Yoshihisa Kobayashi	SMiRT-23 Manchester, United Kingdom, August 10-14, Division V.	2015	高温下での水平荷重に対する円筒形円筒形鋼板鉄筋コンクリート（SC）構造物の構造特性を確認するために、SC試験体の高温下での水平載荷試験を実施している。7つの試験体を作成し、温度を4水準（室温、145℃、175℃、200℃）、せん断スパン比を3水準（0.6、0.8、1.0）、温度145℃では加熱後室温冷却を実施している。実験の結果、200℃までの高温下での水平荷重に対する最大強度は、加熱しない場合の約20%低下するとしている。また、最大強度での変形は、全ての温度条件で同様の傾向を示し、高温での変形能力の低下は見られないとしている。

表 3.3.1-2 参考文献リスト（構造実験）（*1：文献中で材料実験も実施、*2：文献中で解析も実施）

No.	論文題名	著者	出典	年・月	コメント
5*2	Applicability evaluation of steel plate reinforced concrete structure to primary containment vessel of BWRs (9) axisymmetric out-of-plane shear test of cylindrical steel plate reinforced concrete structure subjected to high temperature up to 300°C, Transactions	D. Hinata, N. Kakae, M. Osaka, H. Nouji, J. Ota, T. Abiru	SMiRT-24 BEXCO, Busan, Korea - August 20-25, 2017, Division VI.	2017.8	鋼板コンクリート格納容器（SCCV）のような円筒構造物が事故条件下で軸対称圧力荷重を受けた場合、構造物の変形が基部によって半径方向に拘束されるため、下部には横方向のせん断応力が発生する。事故時の圧力荷重によって発生する横せん断応力に対する円筒型鋼板コンクリート構造物の構造特性を評価するために、軸対称横せん断試験を実施している。実験変数は、加熱温度（室温、180°C、300°C）と横せん断補強筋比（なし、0.32%、0.42%）である。実験の結果、コンクリート中にせん断ひび割れが発生しても、壁体下部の円筒鋼板が弾性体である限り、横せん断破壊は発生しないことが分かったとしている。
6*2	On the Response of Squat Reinforced Concrete Walls for Combined Lateral and Accident Thermal Loading	Hassan S. Anwar, Saahastaranshu R. Bhardwaj, Amit H. Varma	SMiRT25	2019	温度荷重が RC 壁の面内剛性や耐力及び耐力を迎えた後の振る舞いに与える影響を把握するために、0.6 程度の低アスペクト比（≒シアスペクト比）のせん断壁を対象として、原子力発電所における事故を想定した温度荷重及び地震荷重を載荷する実験を実施している。試験結果より、事故時温度は低アスペクト比のせん断壁の耐力に大きく寄与しないとしている。また、温度による剛性低下は既存クラックの程度によるとしている。

表 3.3.1-2 参考文献リスト（構造実験）（*1：文献中で材料実験も実施、*2：文献中で解析も実施）

No.	論文題名	著者	出典	年・月	コメント
7	A CYCLIC BACKBONE CURVE FOR REINFORCED CONCRETE SHEAR WALLS AT ELEVATED TEMPERATURES	Alok A. Deshpande, Andrew S. Whittaker	SMiRT-25, Charlotte, NC, USA, August 4-9, 2019, Division V	2019	原子力発電所の耐震壁の健全性が LOCA による温度 (300°F (149°C)) に曝された場合に影響を受けるかを検討するために、鉄筋比 (W1, 4 : 0.93%及び W2, 3 : 2%) をパラメータとする合計 4 体の低アスペクト比のせん断壁を製作し、温度+水平方向の繰り返し交番载荷の試験を実施している。水平耐力の約 30%未満の加力では、450°F (232°C) までの高温に曝されることによる剛性の最大低下は 30%程度である。また、耐力の 30%以上の加力では、力学的損傷の方が加熱による損傷よりも剛性に与える影響が大きく、加熱による剛性低下は無視できる程度であるとされている。

表 3.3.1-3 参考文献リスト (報告書/レビューペーパー)

No.	論文題名	著者	出典	年・月	コメント
1	Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment	G. A. Houry	Magazine of Concrete Research, 44, No. 161, Dec., 291-309	1992.12	ヒートサイクル中及び冷却後のコンクリートの強度に影響を与える材料及び環境の要因・メカニズムを考察し、必ずしもすべてが強度低下につながるわけではないことを示している。ヒートサイクルには、最初の加熱、一定温度、冷却、冷却後の4つの段階があるとされており、各段階ではそれぞれ異なるメカニズムが支配的であるとしている。また、一般的に考えられているよりも、約600°Cまでの温度で強度の残存率を高く維持するコンクリート混合物を設計することが可能であることを示している。
2	Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling		fib Bulletins State-of-art report	2007	コンクリート材料とコンクリート構造物に対する火災の影響について、過去数年間の重要な進展に重点を置いて、一般的で簡単な説明をしている。(a)建築物、トンネル、橋梁における高強度コンクリート(HSC)の使用の増加、(b)火災に対する構造解析と設計のための性能に基づく火災工学計算の使用の受け入れの増加、(c)爆発的スポーリングの問題と解決策、(d)近年非常に注目を集めているトンネルにおける火災について、説明されている。

表 3.3.1-3 参考文献リスト（報告書/レビューペーパー）

No.	論文題名	著者	出典	年・月	コメント
3	A Compilation of Elevated Temperature Concrete Material Property Data and Information for Use in Assessments of Nuclear Power Plant Reinforced Concrete Structures		NUREG/CR-7031	2010	温度の関数としてのポルトランドセメントコンクリートの物理化学的プロセスについて言及している。高温下でのポルトランドセメント、骨材、コンクリート材料の一般的な挙動を要約している。コンクリートの機械的性質及び物理的性質に対する高温と試験条件の影響に関するデータと情報を提示している。また、放射線遮蔽に利用される重量コンクリート材料、高温条件下でのコンクリートを扱う設計コードと規格などについて説明している。
4	コンクリートの高温特性とコンクリート構造物の耐火性能に関する研究委員会報告書		日本コンクリート工学会	2012	コンクリート構造物の耐火設計、各種建設材料の高温時特性と挙動、加害を受けたコンクリート構造物の調査・診断および補修・補強について、まとめられている。材料試験については、基規準や試験結果を整理しており、試験方法も整理されている。
5	Mechanical properties of concrete at high temperature- A review	Qianmin Ma, Rongxin Guo, Zhiman Zhao, Zhiwei Lin, Kecheng He	Construction and Building Materials 93 (2015) 371-383	2015	圧縮強度、弾性係数、間接引張強度（曲げ及び割裂試験）、応力-ひずみ曲線及びスポーリングなどのパラメータの温度依存性に関する包括的かつ最新の報告を行い、水-結合材比（W/B）、骨材タイプ、混和剤量（SCM）及び鉄筋が果たす役割も調査している。また、高温下でのコンクリートの力学的特性を向上させるために現在採用されているアプローチも紹介されている。試験方法が高温下でのコンクリートの力学的性質に及ぼす影響についても論じている。

表 3.3.1-3 参考文献リスト (報告書/レビューペーパー)

No.	論文題名	著者	出典	年・月	コメント
6	Physical Properties and Behaviour of High-Performance Concrete at High Temperature		RILEM State-of-the-Art Reports	2019	火災時のコンクリート材料の挙動に関する既存の知識を、特に高性能コンクリート (HPC) に重点を置いて、膨大かつ包括的にレビューしている。高温によって引き起こされる物理的、化学的、機械的变化に関するすべての項目が適切に取り上げられている。HPC の緻密な微細構造、低い自由水含有量、未水和セメント粒子の量が多いことから、HPC の様々な微細構造や化学的变化の速度や程度にはいくつかの特徴がみられるとしている。さらに、これらの混合物には特定の成分 (シリカヒュームやポリプロピレンファイバー等) が含まれていることが多いとしている。
7	A review on the recovery of fire-damaged concrete with post-fire-curing	Lang Li, Long Shi, Qingyuan Wang, Yongjie Liu, Jiangfeng Dong, Hong Zhang, Guomin Zhang	Construction and Building Materials 237	2020	火災で損傷したコンクリートの火災後養生による回復について紹介し、そのメカニズムと試験された特性をレビューしている。さらに、回復の影響に与える要因についても議論している。火災後養生による回復は、高温暴露中に生成された脱水物の再水和に基づいている。回復後、細孔構造は火災前のレベルまで回復するが、機械的特性や耐力は回復しないとしている。

表 3.3.1-3 参考文献リスト (報告書/レビューペーパー)

No.	論文題名	著者	出典	年・月	コメント
8	Fire impacts on concrete structures. A brief review	C. Britez, M. Carvalho, P. Helene	Revista ALCONPAT, Volume 10, Issue 1 (january - april 2020): 1-21	2020	<p>火災がコンクリート構造物に与える影響及び高温がコンクリート材料自体に及ぼす可能性のある有害な影響について、重要なトピックを簡潔に説明することを目的としている。</p> <p>火災シナリオによる例外的で苛酷な作用に曝された時のコンクリート（材料としても構造要素としても）の挙動について文献調査を行い、スポーリング現象や火災時の鉄筋コンクリートの挙動に関する一般的な理解や課題についてより明確にすることを目的としている。</p>

3.3.2 温度影響を受けた構造実験のシミュレーション解析研究の調査

3.3.1 において収集した構造実験の論文に関連するシミュレーション解析及びその他の温度影響を考慮したシミュレーション解析について調査を行った。調査の対象とした解析手法は以下の通りである。

- ・有限要素法 (FEM, Finite Element Method) :

解析を行う領域を小領域 (要素) に分割し、各小領域において共通な補間関数で近似することにより、偏微分方程式の近似解を数値的に得る方法である。構造解析において一般的に用いられている解析手法である。

商用の FEM ソフトウェア「Abaqus」は原子力分野においても特に広く使用されているソフトウェアであるため調査の対象とした。また、同じ FEM でも陽解法の解析で使用されることが多い LS-DYNA に関する解析についても調査を行った。

- ・剛体ばねモデル(RBSM, Rigid Body-Spring Model) :

粒子法は連続体における運動を有限数の粒子の運動として離散化し、偏微分方程式の近似解を数値的に得る方法であり、構造解析及び流体解析の両方で用いられる。この解析手法では、有限要素法での要素や有限体積法での格子を用いずに計算する。RBSM は粒子法の一つと考えられ、コンクリートを剛体要素と要素間のばねによりモデル化する。材料試験～部材試験程度のスケールの解析に用いられることが多い。

表 3.3.2-1 にシミュレーション解析研究の調査の対象とした論文のリストを示す。調査結果の概要を以下に示す。

- ・構造解析において広く適用されていることもあり、FEM を使用した熱-構造解析の論文もしくは報告が多く、特に Abaqus を用いた解析が多い。Abaqus を用いた研究では部材のマクロな挙動 (例えば荷重-変形関係) が試験結果と解析結果で良く合致している。
- ・RBSM による解析は、温度応力も含めた試験結果について全体的な変形性状に加えて、ひび割れ幅やひび割れ間隔に関する傾向を良く捉えられている。RBSM は材料試験～部材試験程度のスケールでは有効な解析手法である可能性がある。

表 3.3.2-1 シミュレーション解析に関する論文のリスト(* : 3.3.1 でも調査を行ったもの)

No.	論文題名	著者 (所属)	出典	年・月	解析手法	コメント
1	NONLINEAR ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES SUBJECTED TO HIGH TEMPERATURE AND EXTERNAL LOAD	Y. Sugawara, M. Goto, K. Saito, N. Suzuki, A. Muto, M. Ueda	SMiRT12	1993	FEM	表 3.3.1-1 の No.3 の論文において報告されている高温条件を考慮した梁の試験を対象として、2次元 FEM 要素を用いて解析を実施している。実施されたすべての試験ケースに対して解析を実施しており、試験結果と比較的良く一致していることが確認できる。
2*	Structural behavior of reinforced concrete structures at high temperatures	N. Yamazaki, M. Yamazaki, T. Mochida, A. Mutoh, T. Miyashita, M. Ueda, T. Hasegawa, K. Sugiyama, K. Hirakawa, R. Kikuchi, M. Hiramoto, K. Saito	Nuclear Engineering and Design 156, pp.121-138	1995	FEM (熱伝導解析)	鉄筋コンクリート製格納容器を対象としたライナ付き実大コンクリートブロック試験体の加熱試験の温度分布と1次元の温度分布解析結果を比較している。試験結果と解析結果は、温度分布、温度の時間的推移共に良く一致していることが確認できる。
3*	On the Response of Squat Reinforced Concrete Walls for Combined Lateral and Accident Thermal Loading	Hassan S. Anwar, Saahastaranshu R. Bhardwaj, Amit H. Varma	SMiRT25	2019	FEM (LS-DYNA)	表 3.3.1-2 の No.8 の論文であり、陽解法の FEM によるシミュレーション解析及び結果も示されている。試験体はアワーグラスモードを抑制する剛性が付加された低減積分ソリッド要素 (コンクリート) 及び円形断面を持つ Hughes-Liu 梁要素 (鉄筋) によりモデル化されている。荷重-変形関係の包絡線について解析結果と試験結果を比較しており、全体としては試験結果と

表 3.3.2-1 シミュレーション解析に関する論文のリスト(* : 3.3.1 でも調査を行ったもの)

No.	論文題名	著者 (所属)	出典	年・月	解析手法	コメント
						数値解析で良く一致していると結論付けられている。
4	NUMERICAL ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS SUBJECTED TO ACCIDENT THERMAL LOADING	Kadir C. Sener ¹ , Sijia Wang, Amit H. Varma	SMiRT25	2019	FEM (Abaqus)	事故時温度荷重を想定し温度負荷を与えて2点荷重を実施した梁試験を対象としてソリッド要素による解析及びシェル要素を実施し、比較をしている。コンクリートの材料モデルには brittle cracking model を採用しており、また鉄筋-コンクリート間には付着による応力-すべり関係を考慮したモデルとして、陽解法により求解している。
5	NUMERICAL STUDY ON SEISMIC PERFORMANCE OF SHEAR WALL AFTER HIGH TEMPERATURE EXPOSURE	Hiroshi Tomofuji, Yuki Sasaki, Takaaki Tsukada, Mario Fontana	SMiRT25	2019	FEM (Abaqus)	800×900×300mm 程度のサイズの壁に対する温度荷重 (最高温度 600°C 程度) 及び水平荷重繰返し荷重試験を対象とした、FEM 解析を実施している。解析では一方向荷重としており、耐力については試験結果とよく一致していることが示されている。
6	熱・水分移動および硬化仮定を考慮した RBSM による RC 部材のおひび割れ進展挙動解析	杉本啓太、山本佳士、中村光、三浦泰人	土木学会第 71 回年次学術講演会	2016	RBSM	本論文では 3 次元剛体ばねモデル (RBSM) を使用し、乾燥収縮、温度応力、クリープ及び硬化過程を考慮した解析手法を提案している。RC 梁を対象とした解析を行い、RC 梁のおひび割れ性状 (おひび割れ幅、間隔等) について試験結果と比較をし、妥当性を検証している。

3.4 材料及び構造実験の検討

地震随伴事象などの整理分析、問題点の抽出や、下記に示す既往知見の調査において指摘した今後拡充すべき知見を念頭に置き、コンクリート材料の材料試験及び鉄筋コンクリート部材の構造試験を検討した。

- ・ 格納容器ライナのコンクリートに与えるシール効果を考慮した高温時のコンクリート材料の力学特性及び熱伝導特性
- ・ (地震を念頭に置いた) 事前損傷を受けた場合の高温時のコンクリート材料の力学特性及び鉄筋コンクリート部材の挙動
- ・ 高温下の鉄筋-コンクリート-間の相互作用 (テンションスティフニング効果, 付録3参照)

3.4.1 材料実験の検討

(1) シリンダー試験

a) 目的

格納容器ライナを念頭においたシール条件と設計レベル地震による事前損傷を考慮した高温時コンクリートの力学特性に関する知見拡充を目的とする。

b) 試験パラメータ

- ・ 温度 : 5 水準 (20(常温), 100, 175, 200, 300℃)
- ・ 加熱条件 : 2 水準 (加熱中, 加熱後冷却)
- ・ シール : 2 水準 (アンシール, シール)
- ・ 事前損傷 : 2 水準 (加熱前損傷なし, 加熱前損傷あり)
ただし、加熱前損傷ありの温度水準は3水準 (20(常温), 175, 300℃) とする。
- ・ セメント : 2 水準 (普通ポルトランドセメント, 普通+フライアッシュ)
- ・ 骨材 : 砂利+砂

表 3.4.1-1 ケース表 (OPC：普通ポルトランドセメント，FA：フライアッシュ)

温度*1 (°C)	シール 条件	加熱条件		損傷		セメント		骨材	供試体数(体)		ケース数*6	試験体数
		加熱中	加熱後 冷却	なし	あり	普通 ポルトラ ドセメント*2	普通 + フライ アッシュ*3		圧縮*4	割裂*5		
20(常温)	あり			○	○	○	○	○	3	3	4	24
	なし	○	○	○	○	○	○	○	3	3	4	24
100	あり			○	○	○	○	○	3	3	2	12
	なし	○	○	○	○	○	○	○	3	3	4	24
175	あり			○	○	○	○	○	3	3	4	24
	なし	○	○	○	○	○	○	○	3	3	4	24
200	あり			○	○	○	○	○	3	3	2	12
	なし	○	○	○	○	○	○	○	3	3	2	12
300	あり			○	○	○	○	○	3	3	8	48
	なし	○	○	○	○	○	○	○	3	3	4	24
合計											34	204

*1 熱電対を埋め込んだ試験体2体を用いて加熱中の温度を確認する。

*2 封緘(30°C)で6カ月程度養生

*3 封緘(30°C)で12カ月程度養生

*4 圧縮試験用の供試体：φ100×200mm

*5 割裂試験用の供試体：φ150×200mm

*6 各ケースに対しXRDおよびTG/DTAによる分析を実施する。

c) 加熱方法

①開放状態加熱（アンシール）

100℃加熱 : 乾燥機で加熱

175℃加熱 : 乾燥機で加熱

200℃加熱 : 乾燥機で加熱

300℃加熱 : 電気炉で加熱

②密閉状態加熱（シール）

100℃加熱 : オートクレーブ装置で加熱

175℃加熱 : オートクレーブ装置で加熱

200℃加熱 : オートクレーブ装置で加熱

300℃加熱 : オートクレーブ装置で加熱

③密閉状態加熱（シール状態確認（圧力容器））

200℃加熱 : 圧力容器（図 3.4.1-1）に入れて乾燥機で加熱

加熱速度 $60^{\circ}\text{C}/\text{hr}$ ^{[3.4-1], [3.4-2], [3.4-3]}で所定の最高温度まで加熱し、その温度で3～7日間程度^{[3.4-2], [3.4-3]}保持した後、熱間状態で乾燥機や電気炉から取り出し、測定試験を行う。オートクレーブ使用もしくは加熱後冷却のケースのものについては、自然冷却後に試験を実施する。

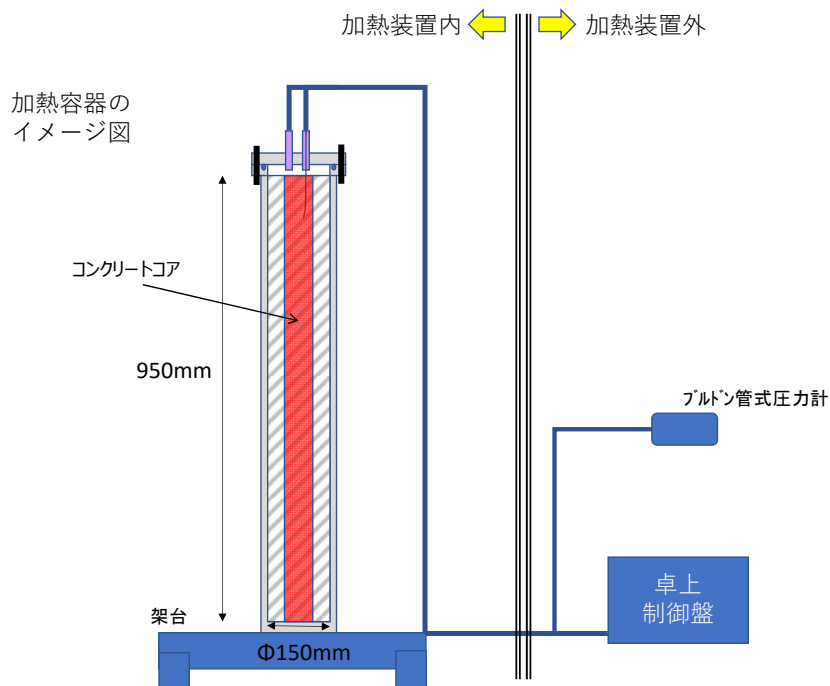


図 3.4.1-1 密閉状態における 200℃加熱の圧力容器イメージ

d) 測定項目

- ・ 圧縮強度, 静弾性係数
ポアソン比 : 圧縮試験
- ・ 引張強度 : 割裂試験
- ・ 温度 : 熱電対で試験体内外の温度を確認
- ・ 質量変化(逸散水分量) : 加熱前後で重量を計測
- ・ その他 : 各ケースに対し, 試験後の供試体を用いて XRD と TG/DTA を実施する。セメント, 粗/細骨材について XRD と XRF の分析を行う(3×2=6 ケース)。付録 1 に分析方法の説明を記載する。

e) 確認試験

オートクレーブ装置によるコンクリートの高温加熱と、RCCV ライナによりコンクリートがシール条件で加熱されている状況との対応状況を確認する必要がある。主な確認事項は、コンクリート内の水分量と高温加熱による物性変化である。そこで、シール条件を実現するために圧力容器にコンクリートを直接打設して高温加熱し、冷却後コアを取得する。各種分析により水分の放出を抑制した状態でのコンクリートの水分量と物性特性を取得し、オートクレーブ装置による高温加熱の結果と比較検討する。温度条件は 200℃で、1 ケースとする。

(2) 実大ブロック試験

a) 目的

実機格納容器・鉄筋コンクリート部の高温時の熱伝導特性，熱伝導解析手法の妥当性確認に資するデータ取得および力学特性の断面方向分布把握を目的とする。

b) 試験パラメータ

表 3.4.1-2 試験ケース

	加熱面の目標温度	事前ひび割れ	加熱面の加力	想定
CASE 0*	常温	—	—	
CASE 1	175℃	—	○	DBA
CASE 2	300℃	—	○	SA

* CASE 1～2 の試験時期の把握するために 1 体のみ実施，CASE 1～2 と同時コア抜きをする。

c) 試験条件

- ・サイズ : 2000mm×2000mm×2000mm
- ・コンクリート : セメントは普通ポルトランドセメントとし，骨材は砂利+砂とする。
(フライアッシュの影響はシリンダー試験で確認)
- ・鉄筋 : 実機相当の配筋
- ・加熱 : 1 面加熱とし，過去の試験実績に基づいて加熱勾配は 20～40℃/hr，目標温度で 7 日間加熱を続ける。
- ・水蒸気の出口 : 加熱面反対側のみ
側面は鋼板で覆い，鋼板の内側に山形鋼を取り付け，コンクリートに定着し，側面からの水蒸気逸散を防ぐ
- ・養生期間 : CASE 0 の試験体の養生状態も確認して決定
(基本的には 6 カ月以上)
- ・コア抜き : 鋼板を撤去後に実施する。コア抜き箇所は，試験体 1 体当たり平面的に 6 箇所×深さ方向 5 本=30 本/体程度とする。なお，コア抜きは，加熱面から加熱方向に向かって、あるいは、側面から加熱面に平行に $\phi 100\text{mm}$ のコアを取得する。(図 3.4.1-4)

d) 測定項目

【加熱中】

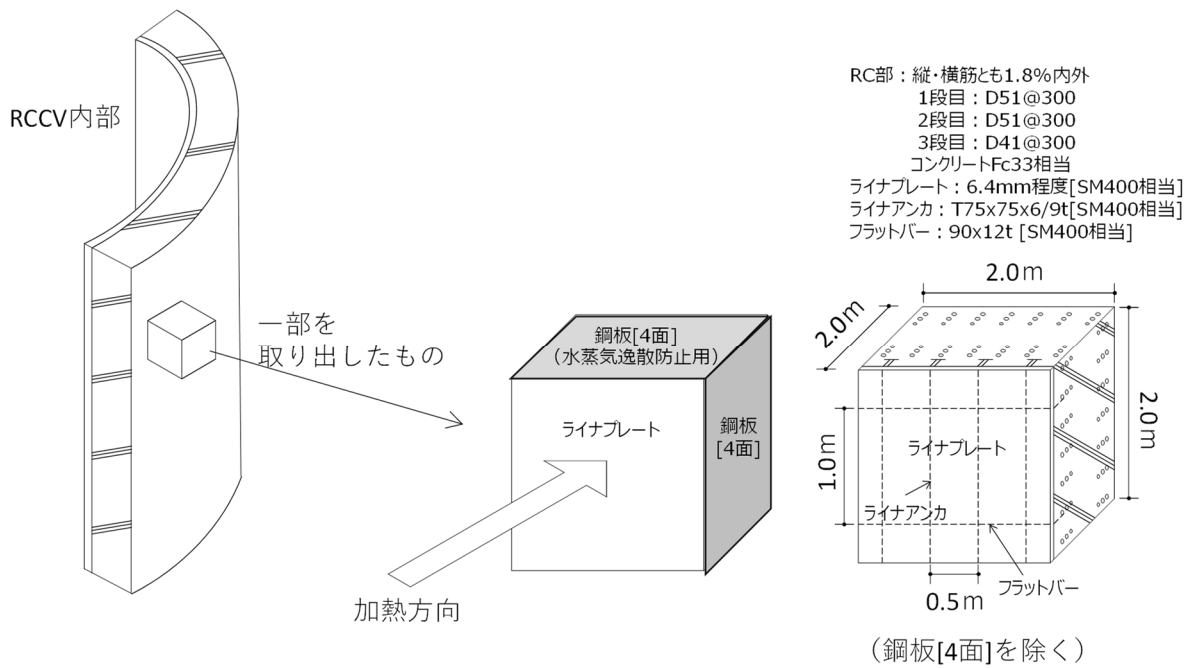
- ・温度 : 熱電対で試験体内外の温度を確認 (80 点/体程度)

【加熱後冷却①】

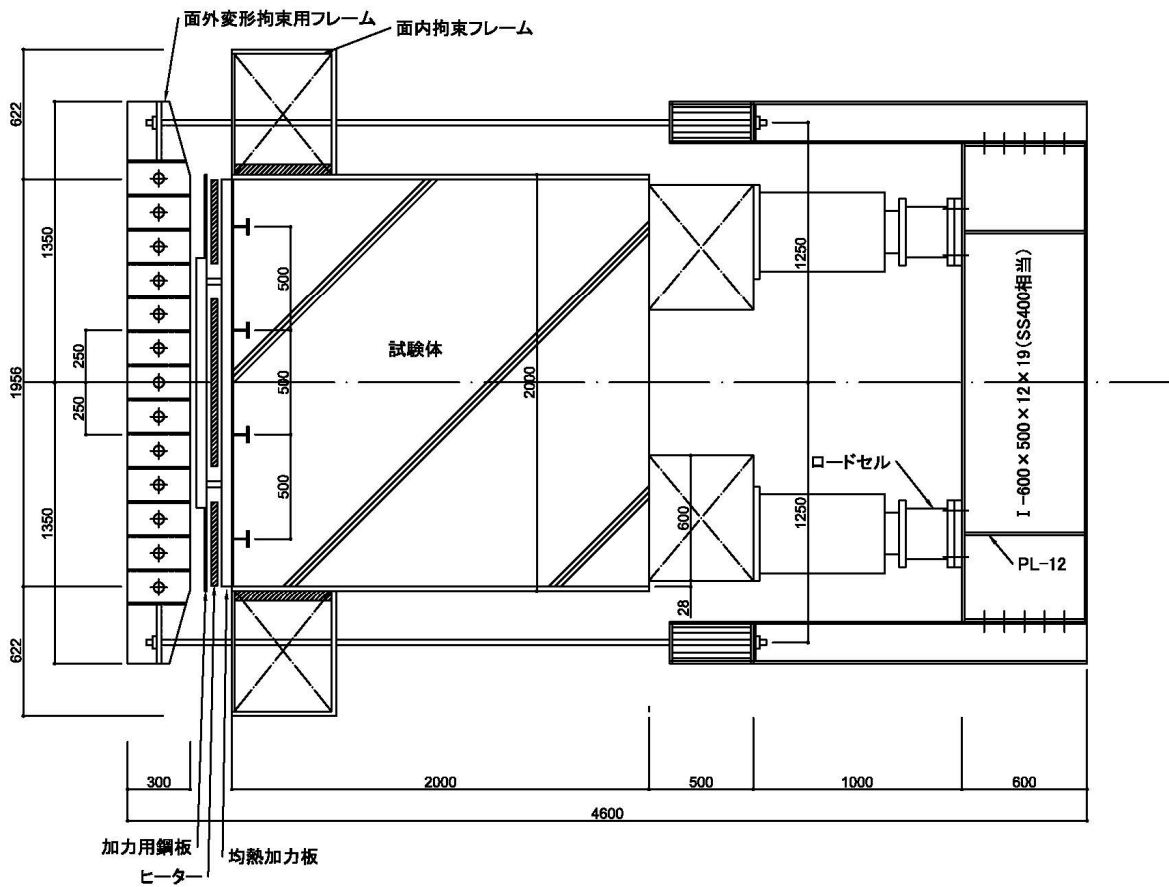
- ・質量変化(逸散水分量) : コアの重量を CASE 0 と比較

【加熱後冷却② (加熱後冷却①後)】

- ・圧縮強度, 静弾性係数, ポアソン比 : 圧縮試験
- ・引張強度 : 割裂試験
- ・その他 : 試験後の代表的な供試体を用いて XRD と TG/DTA を実施する。併せて、セメント, 粗/細骨材について XRD と XRF の分析を行う。付録 1 に分析方法の説明を記載する。

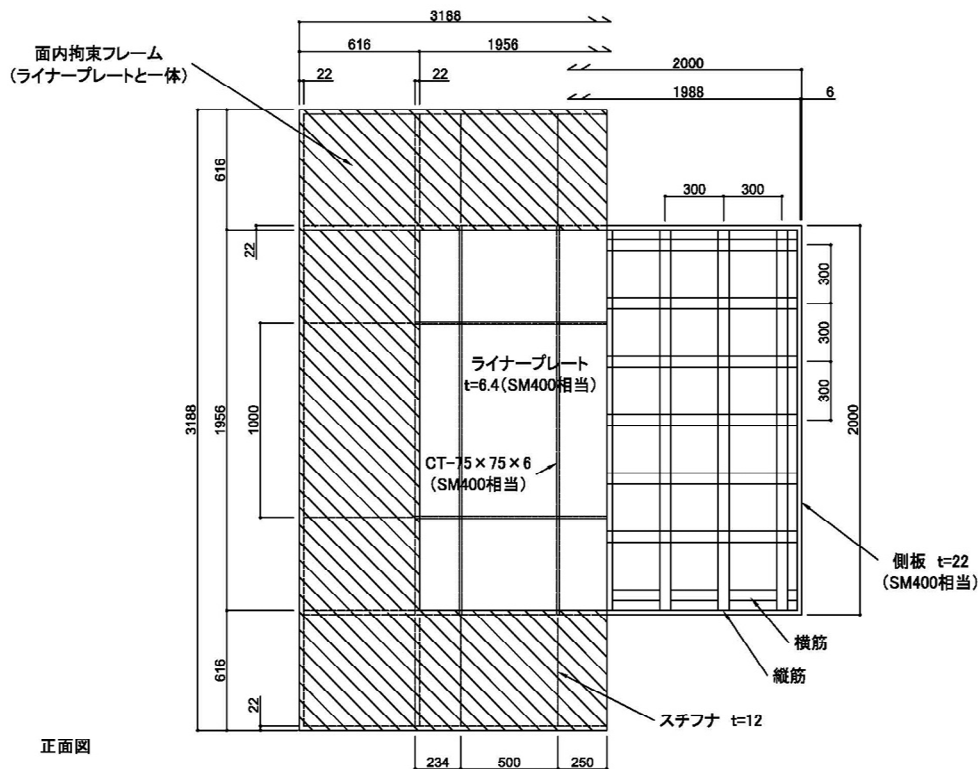


(a) 試験体俯瞰図



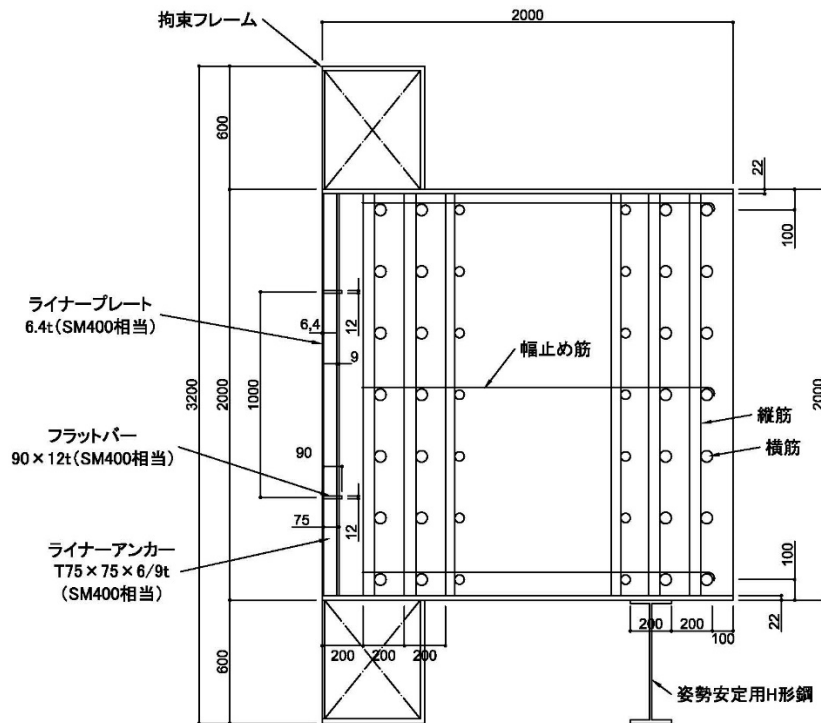
(b) 試験装置のイメージ

図 3.4.1-2 試験体及び試験装置のイメージ (1)



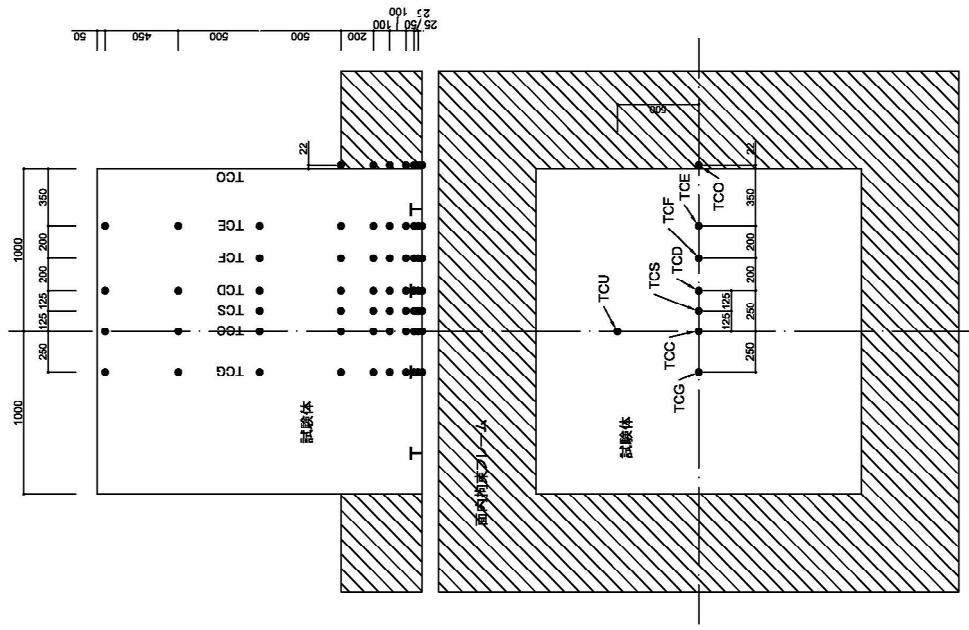
正面図

(c) 試験体正面図

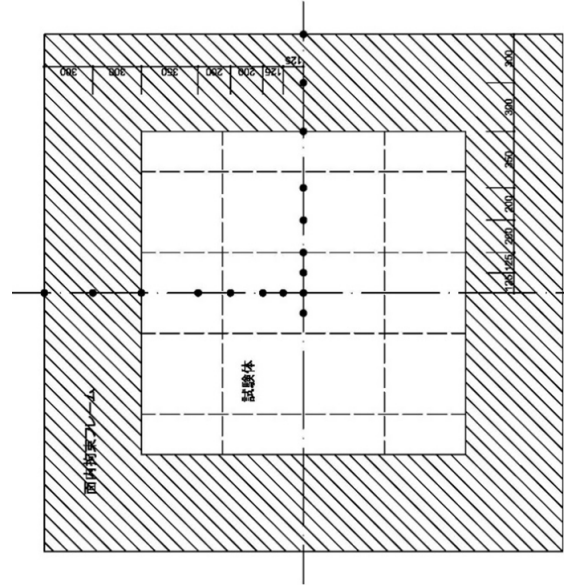


(d) 試験体側面図

図 3.4.1-2 試験体及び試験装置のイメージ(2)

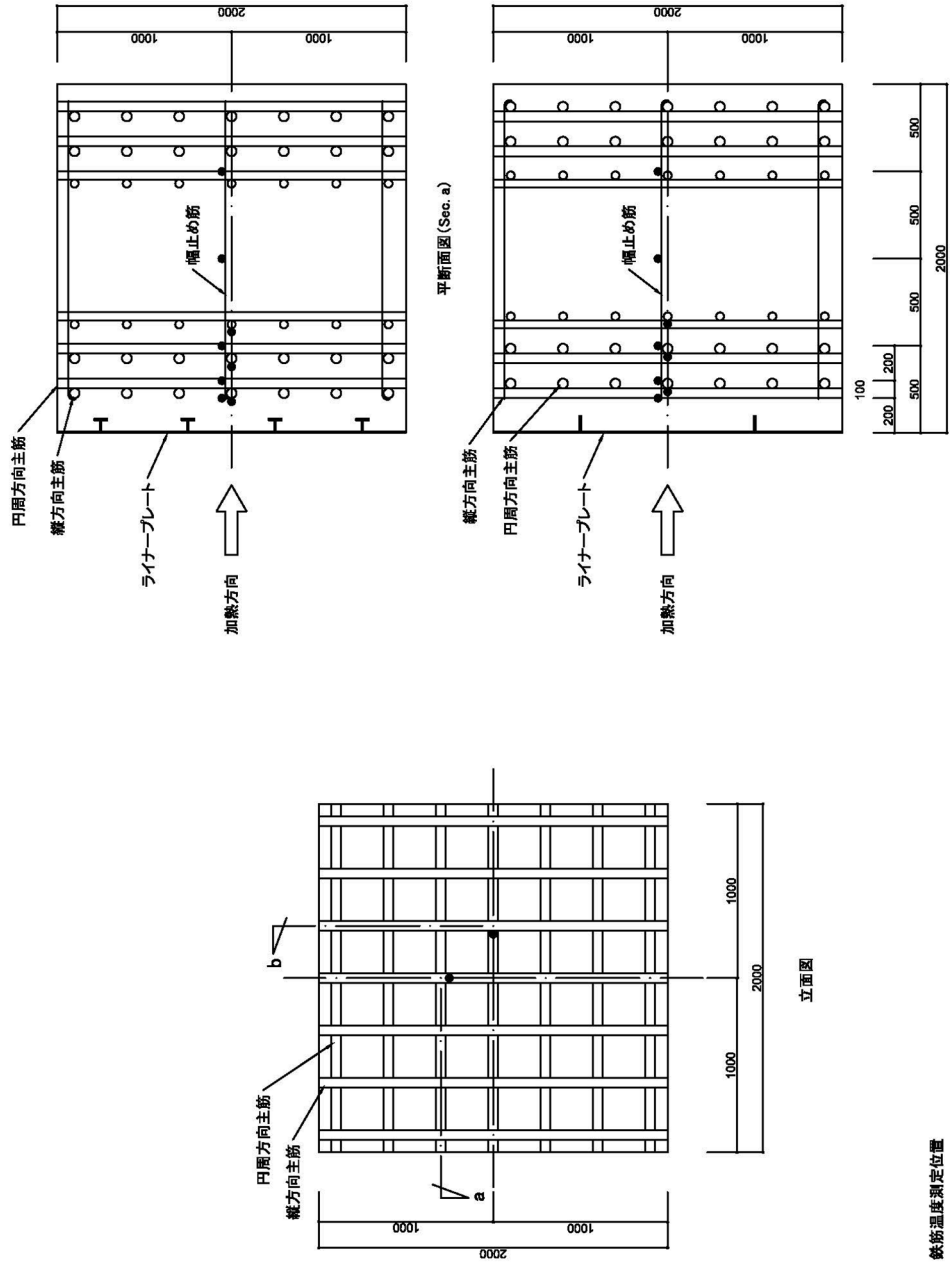


(a) コンクリート温度測定位置



(b) ライナ温度測定位置

図 3.4.1-3 試験体の温度測定位置のイメージ(1)



鉄筋温度測定位置

平断面図 (Sec. a)

平断面図 (Sec. b)

(c) 鉄筋温度測定位置

図 3.4.1-3 試験体の温度測定位置のイメージ(2)

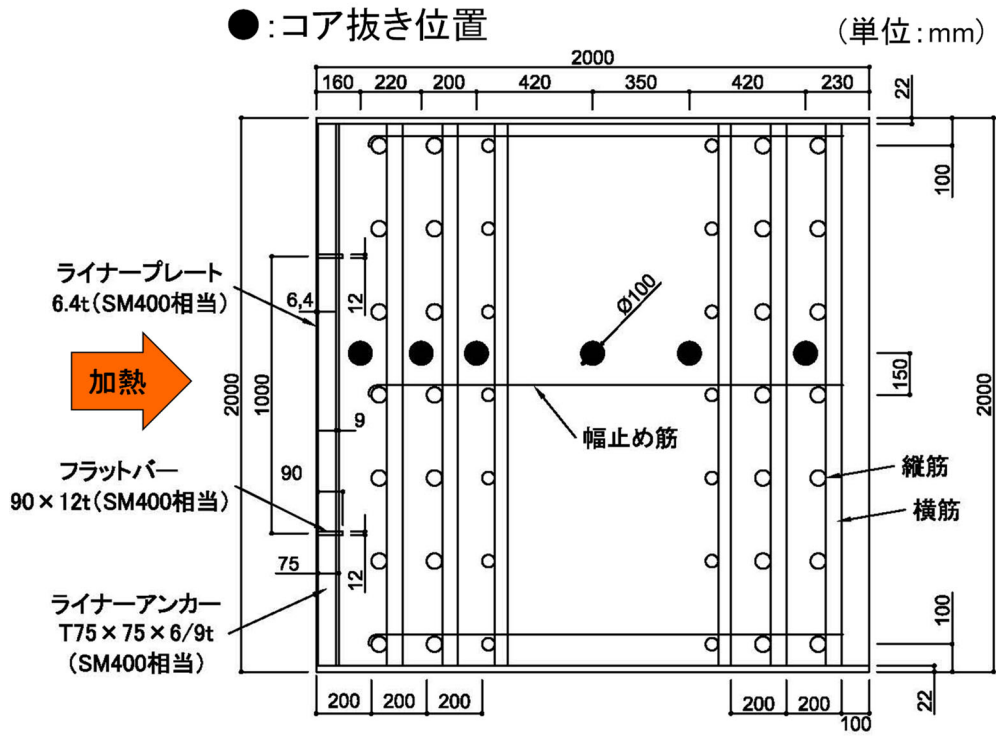


図 3.4.1-4 試験体のコア抜き位置の設定例

(3) 鉄筋コンクリート供試体両引き試験

a) 目的

高温時のコンクリート-鉄筋間の相互作用に関する試験事例(例:文献[3.4-4], [3.4-5], 等)は極めて少なく、知見を拡充する必要がある。そのため、高温時のコンクリート-鉄筋間の相互作用(テンションステイフニング特性)の基礎データ把握を目的とする。

b) 試験パラメータ

- ・ 温度 : 4 水準 (常温, 100, 175, 300℃)
- ・ 鉄筋径 : 1 水準 (D51)
- ・ 供試体 : 3 水準 (鉄筋コンクリート, 鉄筋のみ, コンクリートのみ)
- ・ 加熱条件 : 2 水準 (加熱中, 加熱後冷却)
- ・ コンクリート : セメントは普通ポルトランドセメントとし, 骨材は砂利+砂とする。(フライアッシュの影響はシリンダー試験で確認)

加熱速度 60℃/hr^{[3.4-1], [3.4-2], [3.4-3]}で所定の最高温度まで加熱し, その温度で 3~7 日間程度^{[3.4-2], [3.4-3]}保持した後, 熱間状態で両引き試験を行う。加熱後冷却のケースのものについては, 自然冷却後に両引き試験を実施する。

試験ケースは, 常温における予備試験体 1 体を含めて, 鉄筋コンクリート供試体 8 ケース (鉄筋のみ及びコンクリートのみもそれに対応する 8×2=16 ケース) とする。

c) 測定項目

- ・ テンションステイフニング特性 : 荷重-変位関係を取得
 - ・ 温度 : 熱電対で試験体内外の温度を確認 (3 点/体程度)
(熱電対入り試験体を別途作成し, 事前に確認)
- 鉄筋部にひずみゲージを貼付 (2 点/体程度)。

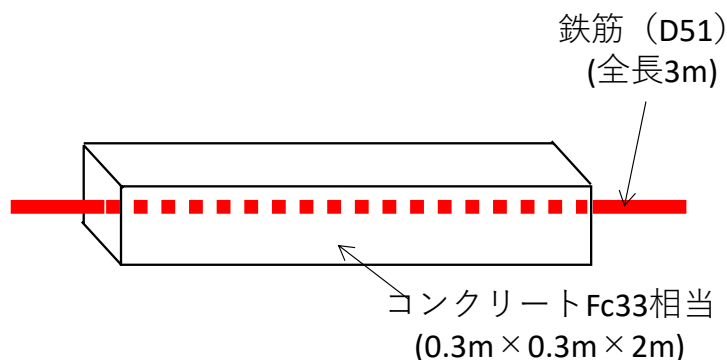


図 3.4.1-5 RC 供試体両引き試験体イメージ

d) 留意事項

ここで示した高温下での RC 供試体両引き試験に関しては、試験実施例が極めて少なく、(構造実験では想定しなくてもよい) 熱ひずみによる非対称なひび割れが発生・進展・卓越しやすいと考えられる。従って、比較的容易な片引き試験を実施し、その結果を用いてテンションスティフニング特性に変換する評価手法の検討、又は非対称なひび割れが発生しにくい平板試験による代替試験の検討を含めて、試験方法に関する更なる検討を実施することが望ましい。

3.4.2 構造実験の検討

a) 目的

高温時の RC 製円筒壁の構造部材レベルでの地震時応答挙動の把握および実機解析・評価の検証のためのデータ拡充を行うことを目的とする。

b) 試験パラメータ

表 3.4.2-1 試験ケース

	内側目標温度	加熱条件	事前損傷*	想定
CASE0	常温	—	—	比較用
CASE1	300℃	加熱後冷却	—	SA
CASE2	300℃	加熱後冷却	あり	SA

* 事前損傷は、許認可における耐震壁の損傷レベルを参考に設定する。

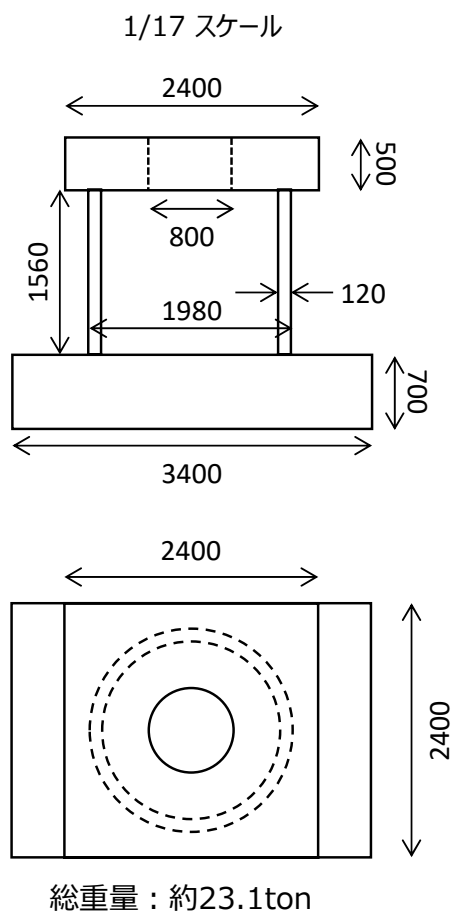
(Ss 地震後を想定し、せん断ひずみ 1000 μ を事前損傷とする)

c) 試験条件

- ・サイズ : RCCV 1/17 スケール 円筒部概略寸法 t120×H1560×R1980 (外径)
- ・シアスパン比 : 1.0 (実機最下層相当)
- ・配筋 : 縦筋 1.8%内外合計、横筋 1.6%内外合計 (実機最下層相当の鉄筋量)
- ・加熱 : RCCV 内側のみ加熱, 外側は加熱や冷却はなし。ヒーター装置使用を仮定して、内側目標温度を 3 日間程度保持とする。
- ・加力 : 正負交番繰返し載荷

d) 測定項目

- ・ロードセル及び変形計により荷重-変位関係を取得
- ・温度 : 熱電対で試験体内外の温度分布を取得 (80 点/体程度)
- ・ひずみ : 鉄筋部にひずみゲージを貼付してひずみ分布を取得 (50 点/体程度)



縦筋比1.8% (外側筋・内側筋あわせて)
D10 合計176本 外88本、内88本
外側で7.0cm間隔

横筋比1.6% (外側筋・内側筋あわせて)
D10 合計26本/m 外13本/m、内13本/m
外側で7.5cm間隔

かぶり15mm
鉄筋D10

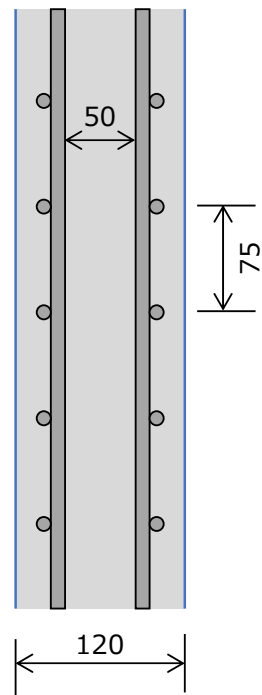
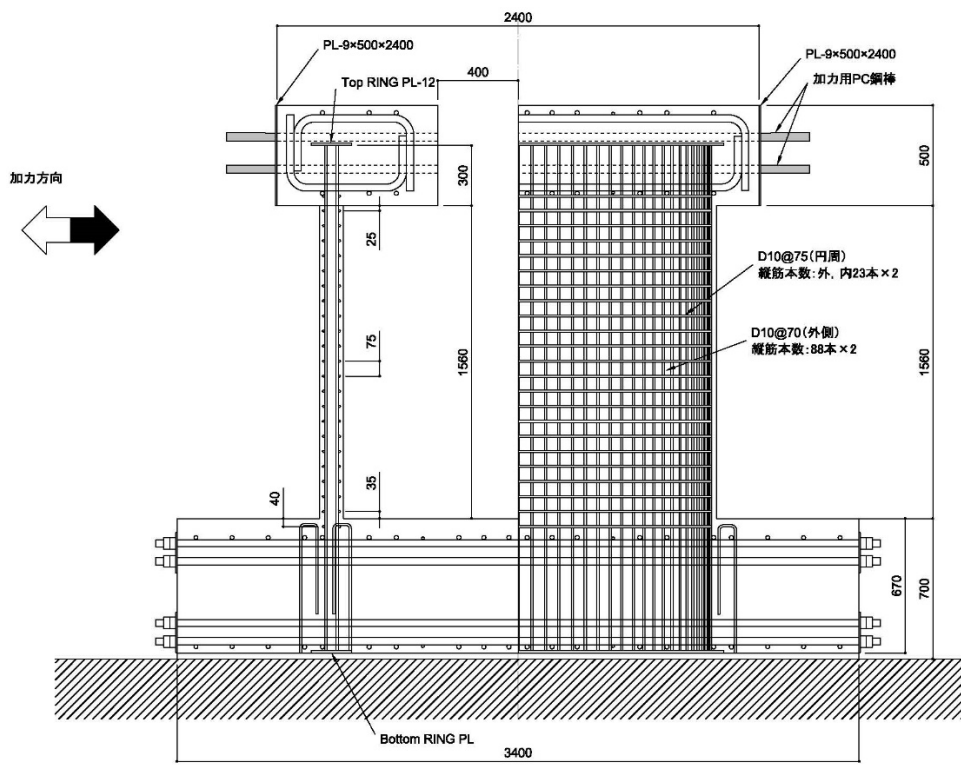
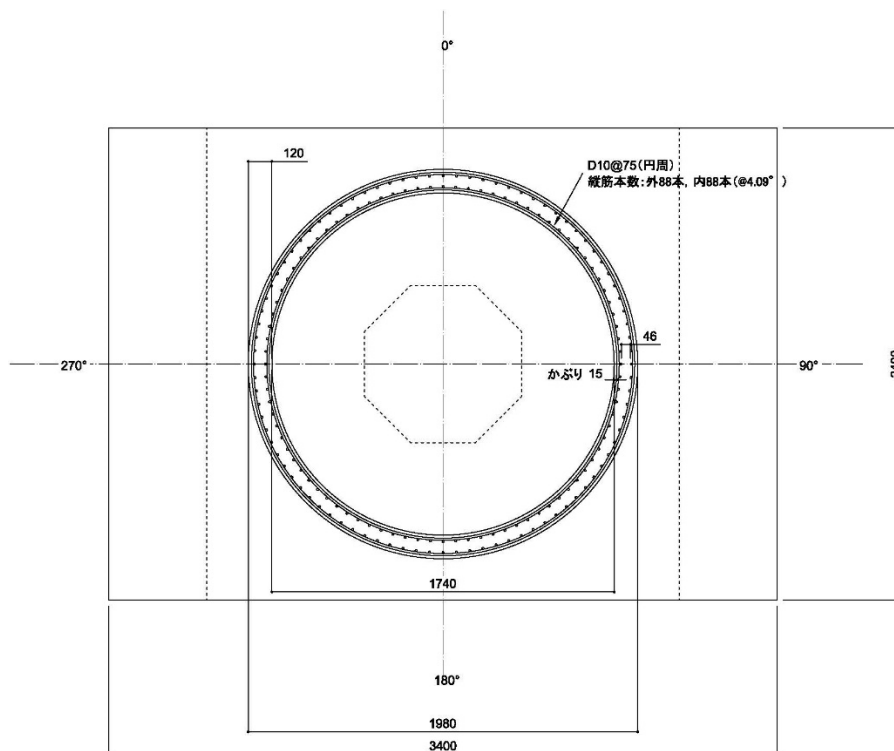


図 3.4.2-1 試験体概要



(a) 正面図



(b) 円筒部の断面図

図 3.4.2-2 試験体のイメージ

【3.4 節の参考文献】

- [3.4-1] N. Yamazaki, M. Yamazaki, T. Mochida, A. Mutoh, T. Miyashita, M. Ueda, T. Hasegawa, K. Sugiyama, K. Hirakawa, R. Kikuchi, M. Hiramoto, K. Saito: Structural behavior of reinforced concrete structures at high temperatures, Nuclear Engineering and Design 156 (1995), pp.121-138.
- [3.4-2] Norichika Kakae, Keiichi Miyamoto, Takahiro Momma, Shohei Sawada, Hitoshi Kumagai, Yukiharu Ohga, Hideo Hirai, and Tetsuo Abiru: Physical and Thermal Properties of Concrete Subjected to High Temperature, Journal of Advanced Concrete Technology, 15(6), pp.190-212, 2017
- [3.4-3] 抱憲誓, 西村光太, 宮本圭一, 澤田祥平, 門馬隆弘: 700℃までの高温に曝されたコンクリートの力学特性の変化, 日本建築学会大会学術梗概集 (北海道), 101-102, 2013
- [3.4-4] 村田二郎, 河合紘弦: 両引き試験による鉄筋コンクリートのひびわれ分散性に関する研究, 土木学会論文集, 第 378 号/V-6, pp.107-115, 1987.2
- [3.4-5] 富永暖子, 西山峰広, 坂下雅信: 高温におけるコンクリートと鉄筋の付着・すべり関係に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1159-1164, 2013

3.5 解析検討

3.5.1 解析検討①：高温時梁試験

(1) 解析ケース

本検討で実施する解析の解析ケース一覧表を表 3.5.1-1 に示す。なお、解析に使用するパラメータや解析ケースの決定理由は「(2) 試験概要」以降に記す。

表 3.5.1-1 解析検討①：高温時梁試験で実施する解析ケース一覧表

		圧縮強度(低減係数)			ヤング係数(低減係数)			引張強度(低減係数)			出雲らのモデル に関する係数 ^{※1}	膨張角[°]	ポアソン比	圧縮終局ひずみ ^{※2}
		100°C	200°C	300°C	100°C	200°C	300°C	100°C	200°C	300°C	c	ϕ	ν	ϵ_u
直交表による 感度解析	1	0.90	0.80	0.80	0.68	0.56	0.45	0.88	0.81	0.71	0.4	25	0.0	0.02
	2	0.90	0.80	0.80	0.68	0.56	0.45	0.88	0.81	0.71	1	35	0.2	0.04
	3	0.90	0.80	0.80	0.92	0.80	0.69	1.00	0.97	0.87	0.4	25	0.2	0.04
	4	0.90	0.80	0.80	0.92	0.80	0.69	1.00	0.97	0.87	1	35	0.0	0.02
	5	1.00	0.96	0.96	0.68	0.56	0.45	1.00	0.97	0.87	0.4	35	0.0	0.04
	6	1.00	0.96	0.96	0.68	0.56	0.45	1.00	0.97	0.87	1	25	0.2	0.02
	7	1.00	0.96	0.96	0.92	0.80	0.69	0.88	0.81	0.71	0.4	35	0.2	0.02
	8	1.00	0.96	0.96	0.92	0.80	0.69	0.88	0.81	0.71	1	25	0.0	0.04
追加の 感度解析	9	1.00	0.96	0.96	0.68	0.56	0.45	1.00	0.97	0.87	0.5	35	0.0	0.04
	10	1.00	0.96	0.96	0.68	0.56	0.45	1.00	0.97	0.87	0.6	35	0.0	0.04
	11	1.00	0.96	0.96	0.68	0.56	0.45	1.00	0.97	0.87	0.7	35	0.0	0.04
	12	1.00	0.96	0.96	0.68	0.56	0.45	1.00	0.97	0.87	0.8	35	0.0	0.04

※1：ひび割れ後のコンクリートの $\sigma - \epsilon$ 関係の式 $(\sigma_t/f_t = (\epsilon_{cr}/\epsilon_t)^c)$ の係数 c

σ_t ：ひび割れと直角方向のコンクリートの平均引張応力、

f_t ：2軸応力下のコンクリートの引張強度、

ϵ_{cr} ：ひび割れ発生時の平均引張ひずみ、

ϵ_t ：ひび割れと直角方向の平均引張ひずみ、

c：付着性状を表すパラメータ)

※2：圧縮弾性強度時のひずみを 0 とした時の圧縮終局ひずみ

(2) 試験概要（文献[3.5.1-1]）

本検討で対象とする試験は、F3C 試験体とする。F3C 試験体では、せん断スパン比 2.0 の梁であり、表面に加熱を加えた状態で変位を与える試験を実施している。荷重・加熱の条件は、以下の通りである。

- ・加熱条件：梁の上面（荷重位置を除く）を 10 または 13°C/h で加熱温度を上昇させ、梁の上面温度を 300°C に維持する
- ・支持条件：梁の両端の下端をピン及びピンローラーの組合せで支持
- ・荷重条件：梁の中央の上端を変位制御で載荷
(梁の上面温度を 300°C に維持した状態で載荷)

F3C 試験体の概要を表 3.5.1-2、表 3.5.1-3 及び図 3.5.1-1 に示す。

また、F3C 試験体の試験結果を図 3.5.1-2 に、梁上面を 300°C に維持した時の梁の温度分布を図 3.5.1-3 に示す。

表 3.5.1-2 試験体の概要^[3.5.1-1]

著作権者から利用許諾を得ていないため非表示

表 3.5.1-3 使用している鉄筋^[3.5.1-1]

著作権者から利用許諾を得ていないため非表示

著作権者から利用許諾を得ていないため非表示



図 3.5.1-1 試験体諸元^[3.5.1-2]

著作権者から利用許諾を得ていないため非表示



図 3.5.1-2 試験結果^[3.5.1-1]

著作権者から利用許諾を得ていないため非表示



図 3.5.1-3 梁上面の加熱を 300°Cに維持した時の梁の温度分布^[3.5.1-1]

(3) 解析条件

a) 解析条件の概要

F3C 試験について、Abaqus2021 を使用して、梁上面 300°C 加熱中载荷の梁の解析を実施する。解析モデルは 1/4 モデルとし、試験体中央部に鉛直方向単調荷重を変位制御で载荷する静的非線形解析を行う。解析モデルを表 3.5.1-4 及び図 3.5.1-4 に示す。本検討では、コンクリートのパラメータを変更した感度解析を実施することとし、実験計画法の直交表 L_8 に従い、コンクリートのパラメータの組合せを 8 ケース実施し、7 つのパラメータの解析への影響度合いを確認する。

なお、本解析では、モデルのキャリブレーションの結果、温度による材料劣化のみを考慮し、熱ひずみ/応力は考慮しないこととした。

表 3.5.1-4 材料諸元

(a) 配筋

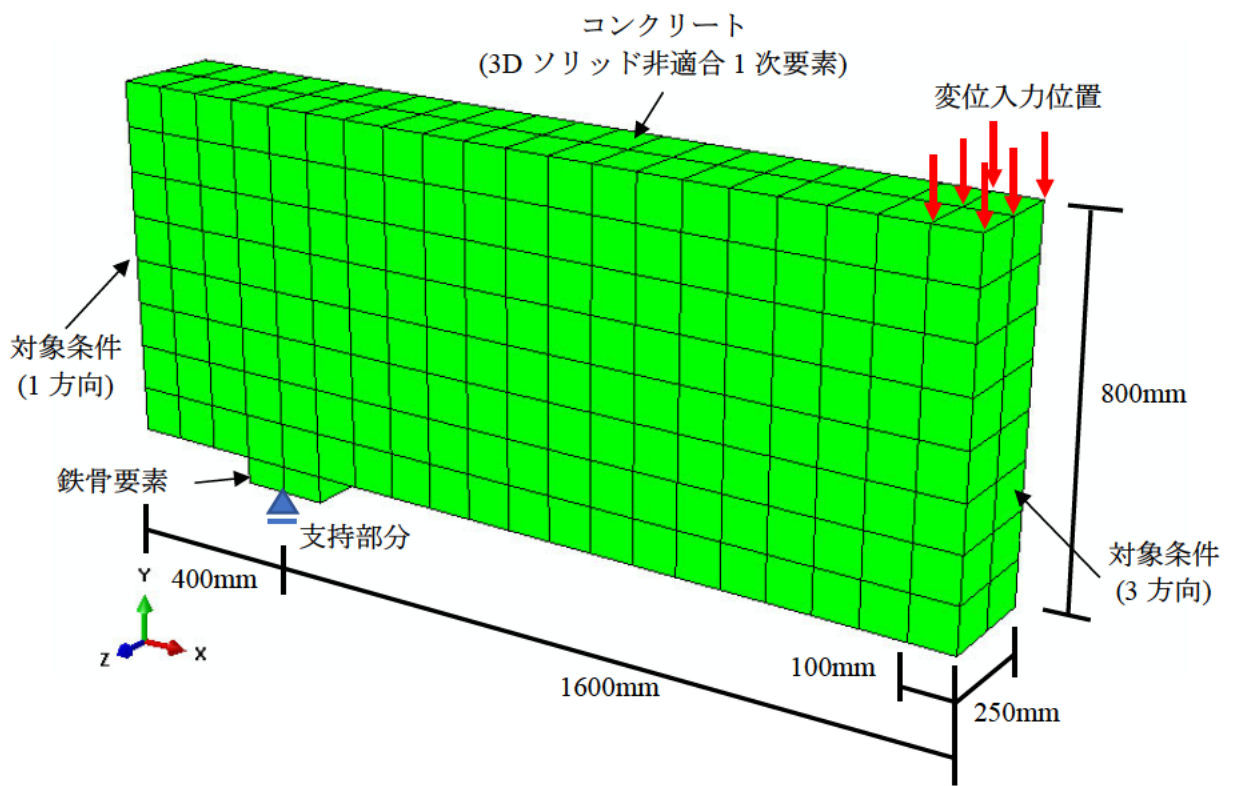
引張鉄筋	10-D22
引張鉄筋比	0.97%
せん断鉄筋	D10@150
せん断鉄筋比	0.19%
せん断スパン比	2.0

(b) コンクリート

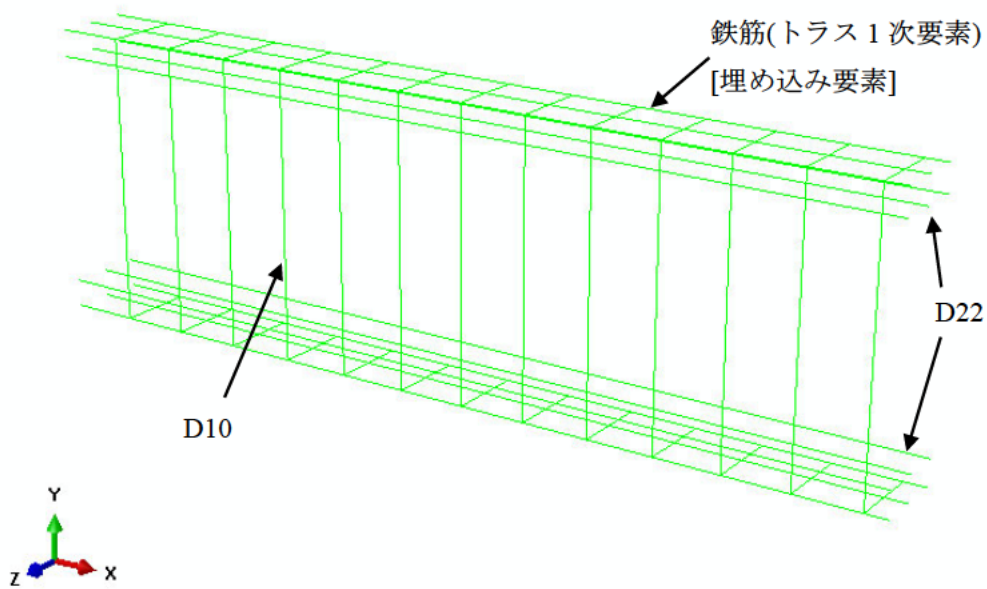
圧縮強度	31.01 N/mm ²
ヤング係数	24800 N/mm ²
引張強度	2.27 N/mm ²

(c) 鉄筋

鉄筋径	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	伸び率 (%)
D10	356.57	494.06	1.92E+05	24
D22	404.23	575.75	2.03E+05	25

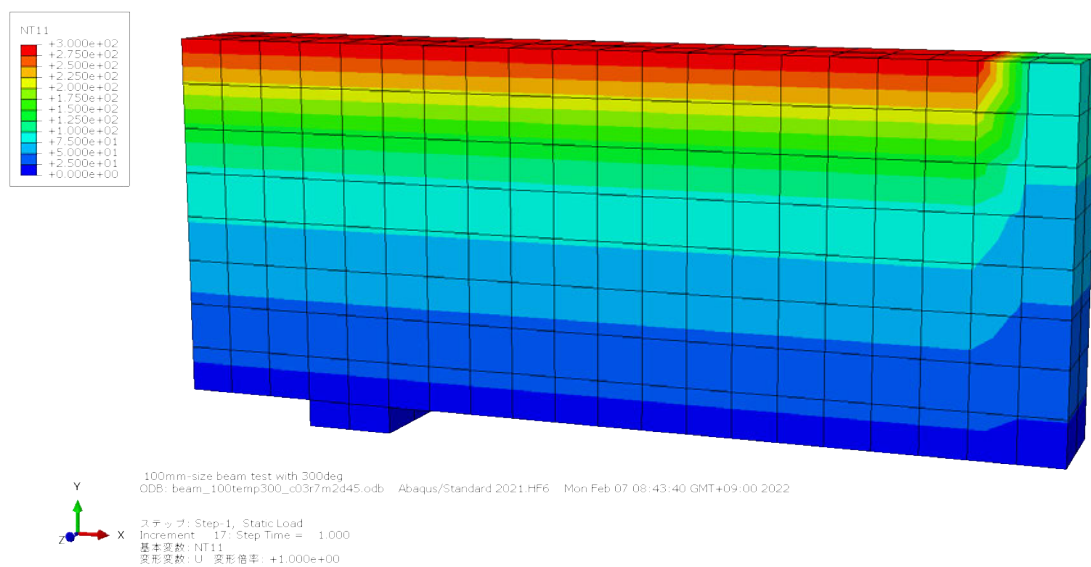


(a) コンクリート及び支持部モデル



(b) 鉄筋モデル

図 3.5.1-4 解析モデル (1/2)



(c) 温度分布

図 3.5.1-4 解析モデル (2/2)

b) 実験計画法及び直交表について

実験計画法は、効率の良い実験方法を設計し、結果を適切に解析することを目的とする統計学の応用分野である。実験計画法の1つである直交表は、実験の要因（パラメータ）を列、組合せのケースを行に配置した時に、どの2列を選んでも、その水準の全ての組合せが同数回現れる配列のことであり、直交表 L_8 (2^7) は8通りの組合せで、2水準の要因を7個まで考慮できる配列を指している。直交表 L_8 では、2水準3要因で検討する場合、 $1 \cdot 2 \cdot 4$ 列目の要因を採用すると、交互作用を分離して、交絡のない実験を実施できる。一方、本検討では、直交表 L_8 を2水準7要因で検討するため、各列に交互作用が現れる交絡のある実験となるが、交互作用の影響は小さいものと仮定して、評価を行うこととする。主効果の評価では、任意の要因の2水準それぞれで結果の平均を取り、評価を行う。

直交表 L_8 の配列表を表 3.5.1-5 に、2列間の交互作用を表 3.5.1-6 に示す。

表 3.5.1-5 直交表 L_8

ケース	要因1	要因2	要因3	要因4	要因5	要因6	要因7
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1	1
3	0	1	1	0	0	1	1
4	0	1	1	1	1	0	0
5	1	0	1	0	1	0	1
6	1	0	1	1	0	1	0
7	1	1	0	0	1	1	0
8	1	1	0	1	0	0	1

表 3.5.1-6 直交表 L_8 の2列間の交互作用

	要因1	要因2	要因3	要因4	要因5	要因6	要因7
要因1	*	3	2	5	4	7	6
要因2		*	1	6	7	4	5
要因3			*	7	6	5	4
要因4				*	1	2	3
要因5					*	3	2
要因6						*	1
要因7							*

c) 感度を確認するパラメータの設定

本検討において、感度を確認する2水準のパラメータ7個を表3.5.1-7に示す。圧縮強度・ヤング係数・引張強度は、表3.5.1-4を基準として、高温時に低減する係数を100・200・300℃において個別に低減係数を設定する。付録3に出雲らのモデルに関する係数 $c^{[3.5.1-5]}$ 及び膨張角に関する説明を記載する。

表 3.5.1-7 感度を確認するパラメータ (コンクリート)

			水準	
			0	1
圧縮強度(低減係数)	F_c	100℃	0.9	1
		200℃	0.8	0.96
		300℃	0.8	0.96
ヤング係数(低減係数)	E_c	100℃	0.68	0.92
		200℃	0.56	0.8
		300℃	0.45	0.69
引張強度(低減係数)	σ_t	100℃	0.88	1
		200℃	0.81	0.97
		300℃	0.71	0.87
出雲らのモデルに関する係数 ^{※1}	c		0.4	1.0
膨張角[°]	ϕ		25	35
ポアソン比	ν		0	0.2
圧縮終局ひずみ ^{※2}	ε_u		0.02	0.04

※1：ひび割れ後のコンクリートの σ - ε 関係の式($\sigma_t/f_t = (\varepsilon_{cr}/\varepsilon_t)^c$)の係数 c

(σ_t ：ひび割れと直角方向のコンクリートの平均引張応力、

f_t ：2軸応力下のコンクリートの引張強度、

ε_{cr} ：ひび割れ発生時の平均引張ひずみ、

ε_t ：ひび割れと直角方向の平均引張ひずみ、

c ：付着性状を表すパラメータ)

※2：圧縮弾性強度時のひずみを0とした時の圧縮終局ひずみ

感度を確認するパラメータの2水準の決定理由は以下のとおりである。

圧縮強度、ヤング係数、引張強度の低減係数は、構造材料の耐火性ガイドブック^[3.5.1-3]に示されている提案式を平均として、実験結果のばらつきの上下を2水準としている。圧縮強度では、高温時の提案式及び実験値は100℃で、200℃や300℃に比べて、低減係数が小さくなっているが、Eurocode^[3.5.1-4]は低減係数を100℃で1.0としていることを踏まえて設定した。また、2水準の設定では、2水準の上下の幅は平均から均等にとること、100・200・300℃で幅は一定とすること及び2水準の上下の幅は実験結果の最大最小までとすることとした。ただし、圧縮強度と引張強度のばらつきの幅は同程度とした。なお、実験結果のばらつきを見ると、低減係数が1.0を上回る結果が示されているが、本検討では、低減係数は1.0を上限とし、2水準の+側を設定した。(図3.5.1-5～図3.5.1-7を参照)

出雲らのモデルに関する係数 c ^[3.5.1-5]は、テンションスティフニング効果の有無を2水準としている。テンションスティフニング効果ありの場合は、出雲ら^[3.5.1-5]の式の0.4とし、テンションスティフニング効果なしの場合は、取りうる値である1.0とした。

膨張角は、解析で用いられることがある25°及び35°とした。

ポアソン比は、鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説^[3.5.1-6]、コンクリート示方書^[3.5.1-7]より、一般的に用いられる0.2を水準の1つ目とし、コンクリート示方書^[3.5.1-7]において、引張を受け、ひび割れを許容する場合には0とすると記載されていることから、0.0を水準の2つ目とした。

圧縮終局ひずみは、Eurocode^[3.5.1-8]の20℃の場合の0.02を水準の1つ目とし、Nakamuraら^[3.5.1-9]の式に従い計算した時の20・100・200・300℃の包絡値を丸めた0.04を水準の2つ目とした。

著作権者から利用許諾を得ていないため非表示



図 3.5.1-5 コンクリートの圧縮強度（低減係数）の実験データ等^[3.5.1-3]

著作権者から利用許諾を得ていないため非表示



図 3.5.1-6 コンクリートのヤング係数（低減係数）の実験データ等^[3.5.1-3]

著作権者から利用許諾を得ていないため非表示

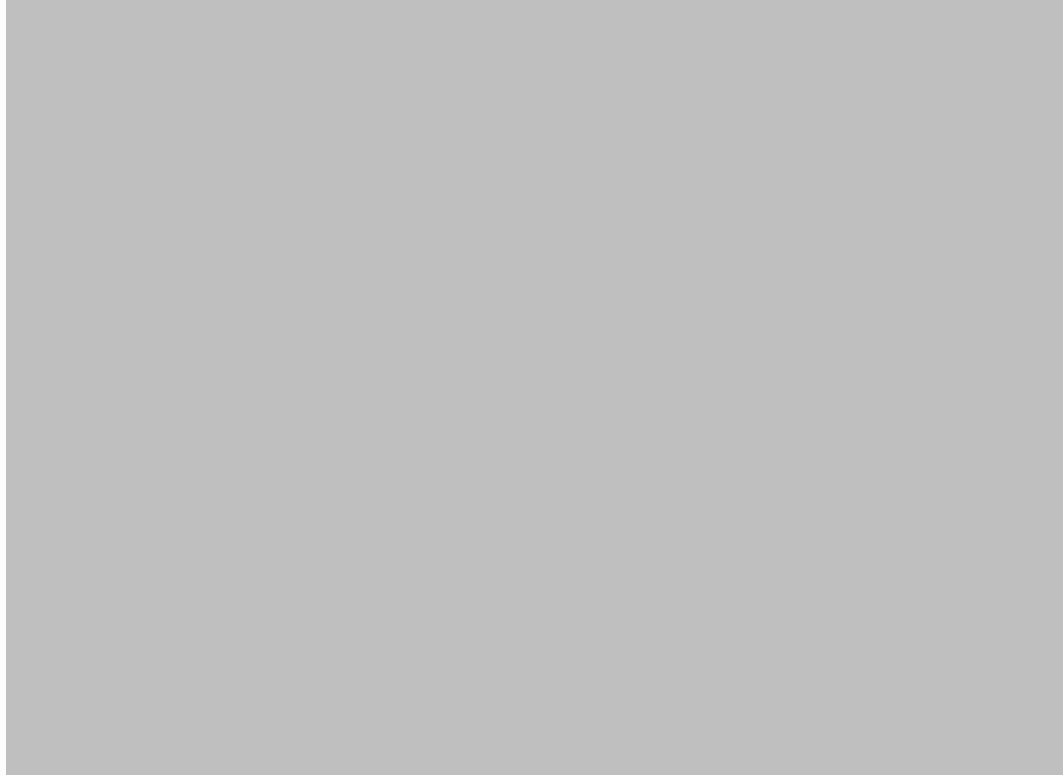


図 3.5.1-7 コンクリートの引張強度（低減係数）の実験データ等

d) 解析を実施するケース

直交表 L_8 の要因 1~7 を「圧縮強度（低減係数）、ヤング係数（低減係数）、引張強度（低減係数）、出雲らのモデルに関する係数、膨張角、ポアソン比、圧縮終局ひずみ」の順とした、組合せケースを表 3.5.1-8 に示す。組み合わせケースのコンクリートの応力ひずみ関係を図 3.5.1-8 に示す。なお、鉄筋の応力ひずみ関係は全ケースで共通とし、応力ひずみ関係を図 3.5.1-9 に示す。

表 3.5.1-8 感度を確認するパラメータの組合せケース表

	圧縮強度(低減係数)			ヤング係数(低減係数)			引張強度(低減係数)			出雲らのモデル に関する係数 ^{※1}	膨張角[°]	ポアソン比	圧縮終局ひずみ ^{※2}
	100°C	200°C	300°C	100°C	200°C	300°C	100°C	200°C	300°C	c	ϕ	ν	ϵ_u
1	0.90	0.80	0.80	0.68	0.56	0.45	0.88	0.81	0.71	0.4	25	0.0	0.02
2	0.90	0.80	0.80	0.68	0.56	0.45	0.88	0.81	0.71	1	35	0.2	0.04
3	0.90	0.80	0.80	0.92	0.80	0.69	1.00	0.97	0.87	0.4	25	0.2	0.04
4	0.90	0.80	0.80	0.92	0.80	0.69	1.00	0.97	0.87	1	35	0.0	0.02
5	1.00	0.96	0.96	0.68	0.56	0.45	1.00	0.97	0.87	0.4	35	0.0	0.04
6	1.00	0.96	0.96	0.68	0.56	0.45	1.00	0.97	0.87	1	25	0.2	0.02
7	1.00	0.96	0.96	0.92	0.80	0.69	0.88	0.81	0.71	0.4	35	0.2	0.02
8	1.00	0.96	0.96	0.92	0.80	0.69	0.88	0.81	0.71	1	25	0.0	0.04

※1：ひび割れ後のコンクリートの $\sigma - \epsilon$ 関係の式 ($\sigma_t/f_t = (\epsilon_{cr}/\epsilon_t)^c$) の係数 c

(σ_t ：ひび割れと直角方向のコンクリートの平均引張応力、

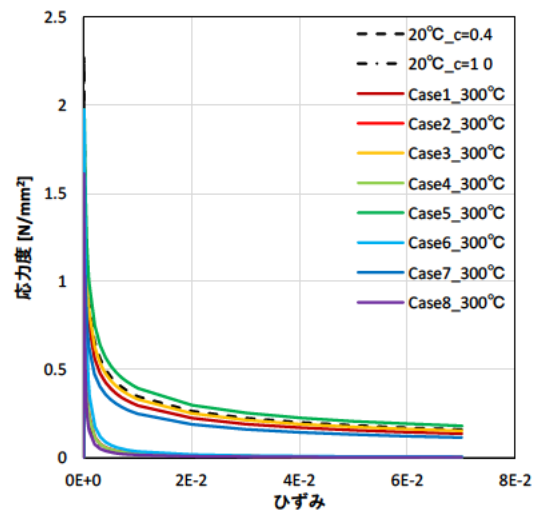
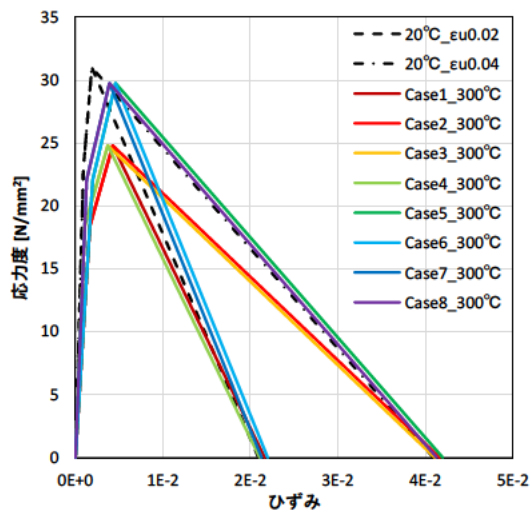
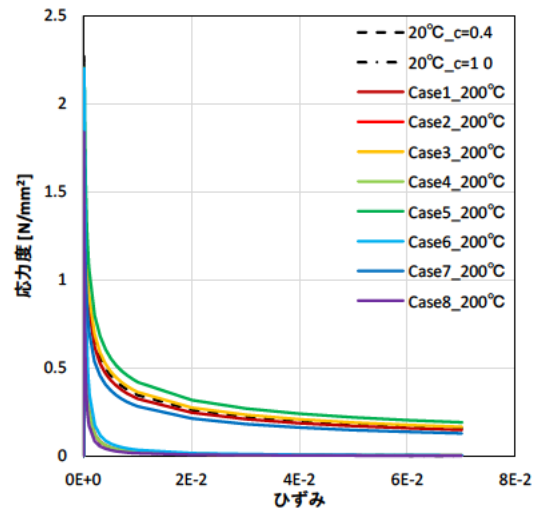
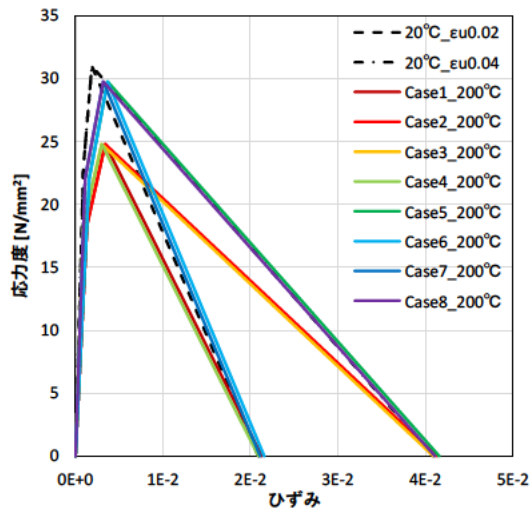
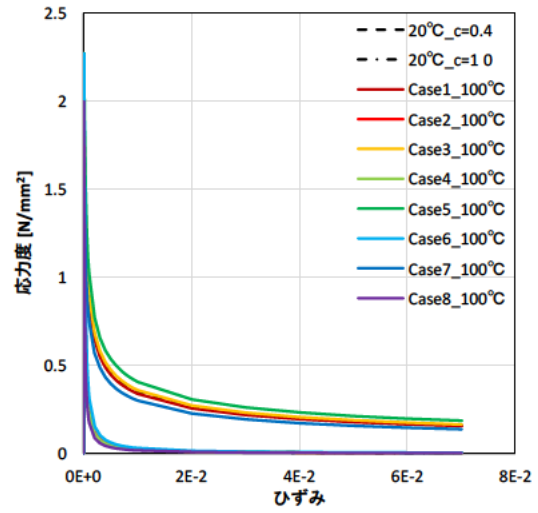
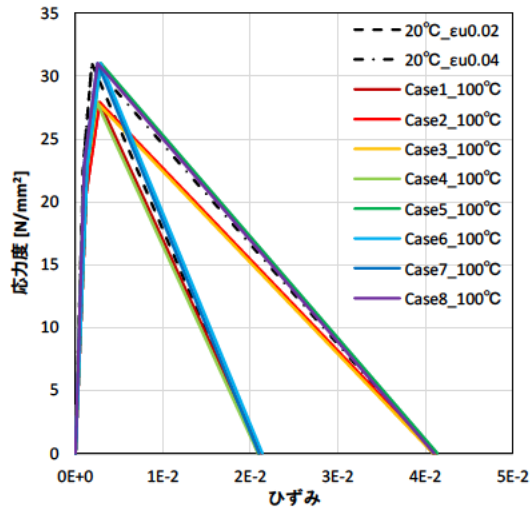
f_t ：2軸応力下のコンクリートの引張強度、

ϵ_{cr} ：ひび割れ発生時の平均引張ひずみ、

ϵ_t ：ひび割れと直角方向の平均引張ひずみ、

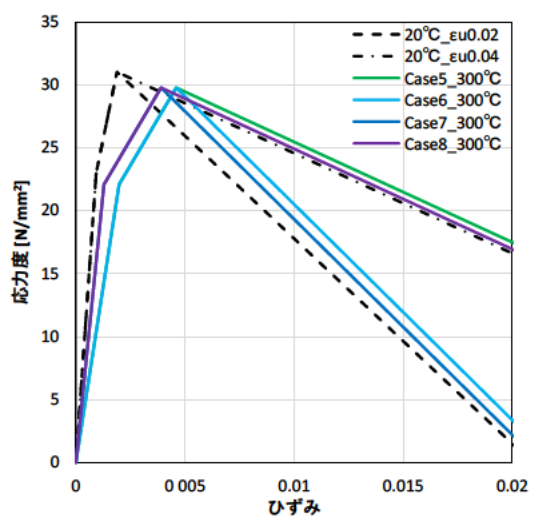
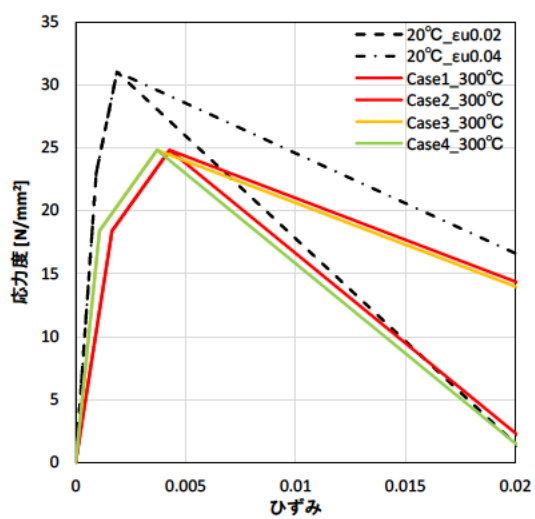
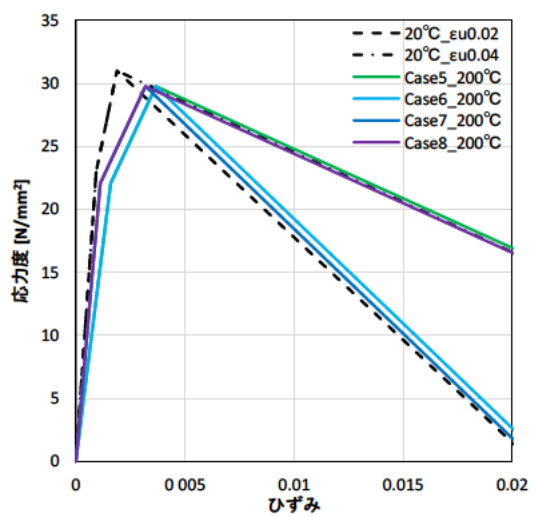
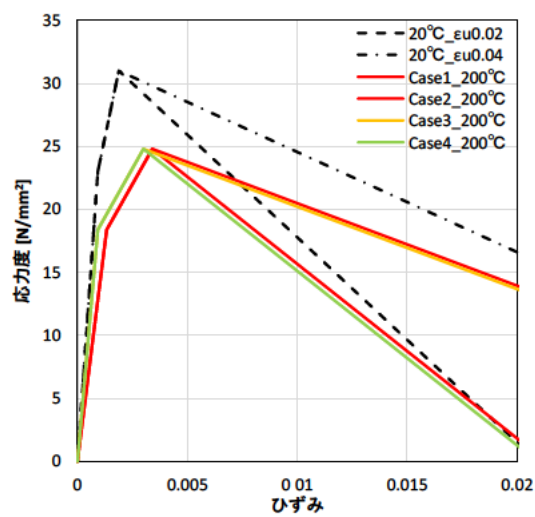
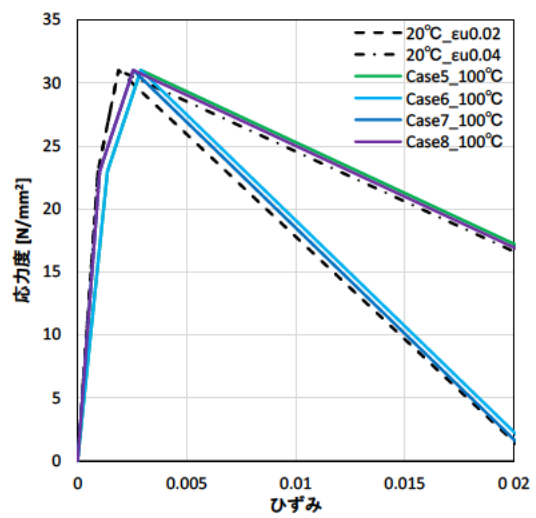
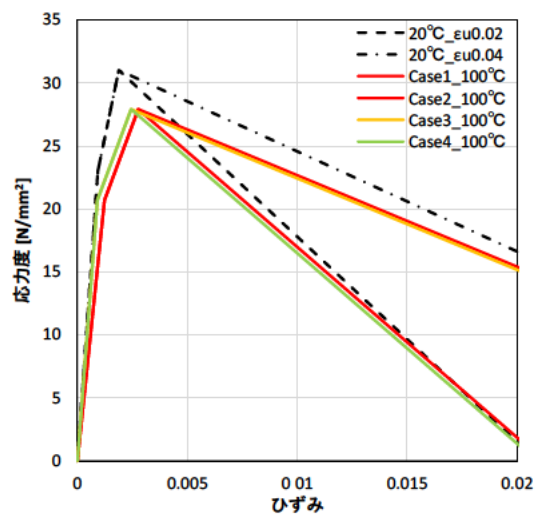
c：付着性状を表すパラメータ)

※2：圧縮弾性強度時のひずみを 0 とした時の圧縮終局ひずみ



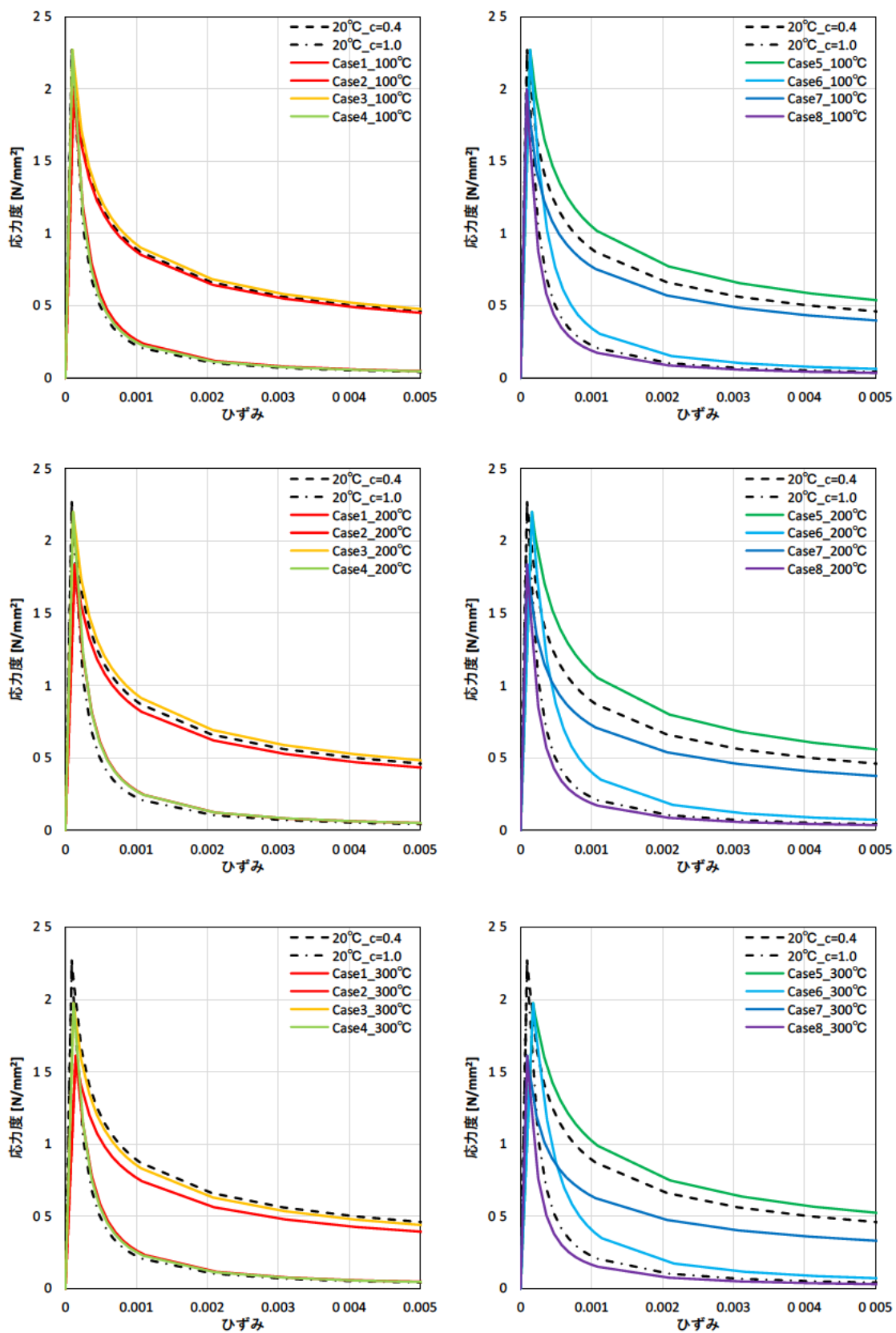
(1) 圧縮 (2) 引張

図 3.5.1-8 コンクリートの応力ひずみ関係 (1/3)



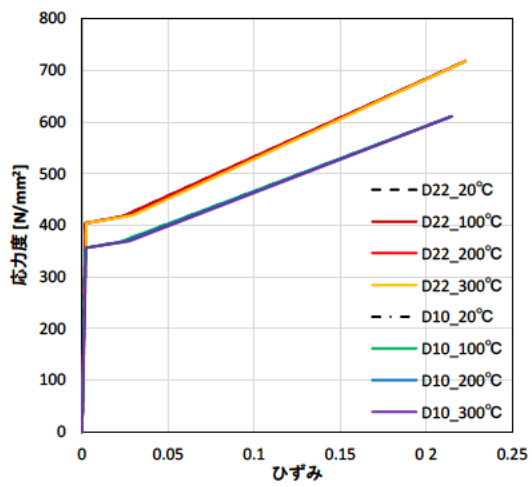
(2) 圧縮 (折れ線部分の拡大)

図 3.5.1-8 コンクリートの応力ひずみ関係 (2/3)

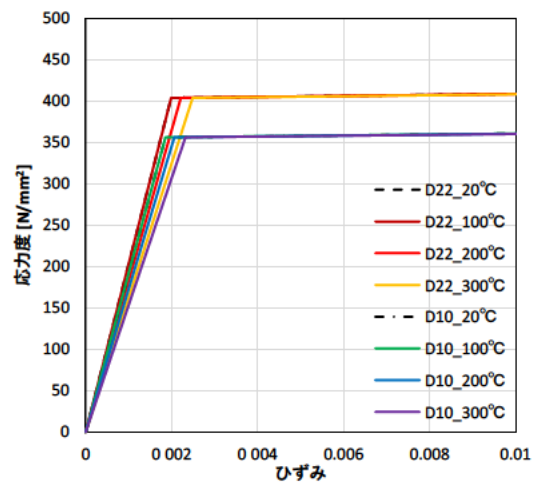


(3) 引張 (折れ線部分拡大)

図 3.5.1-8 コンクリートの応力ひずみ関係 (3/3)



(1) 全体図



(2) 拡大図

図 3.5.1-9 鉄筋の応力ひずみ関係

(4) 解析結果

解析結果の荷重－変位関係を図 3.5.1-10 に、梁の最大耐力時の最小主ひずみのコンター図を図 3.5.1-11 に示す。なお、荷重－変位関係は、加熱による試験体の変形後の変位を 0mm としており、解析も加熱による変形を考慮していない。

荷重－変位関係より、Case5 が最も耐力が大きく、Case8 が最も耐力が小さい結果となった。荷重－変位関係は、(Case1・Case3・Case7)、(Case2・Case4・Case6・Case8)、(Case5) の組み合わせで最大耐力後の傾向が似た結果となった。

梁の最大耐力時の最小塑性ひずみのコンター図より、(Case1・Case3・Case5・Case7)、(Case2・Case4・Case6・Case8) の組み合わせで、最小主ひずみの分布の傾向が似た結果となった。

以上の傾向が似ているケースは、直行表 L₈ の要因 4 (出雲らのモデルに関する係数 c) の組み合わせと一致していることから、本解析の梁の破壊性状に出雲らのモデルに関する係数 c が大きく影響を与えることが分かった。出雲らのモデルに関する係数 c はテンションスティフニング効果に関する係数であることから、テンションスティフニング効果の考慮の仕方が解析に大きな影響を及ぼすことが分かった。

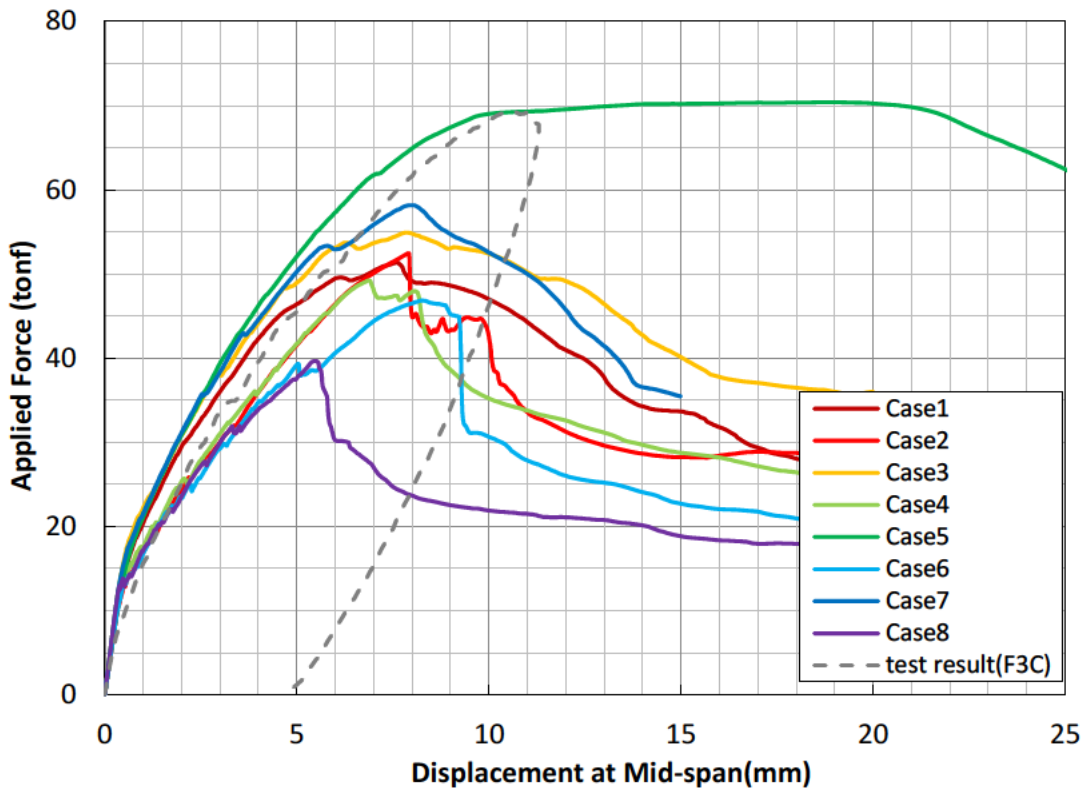
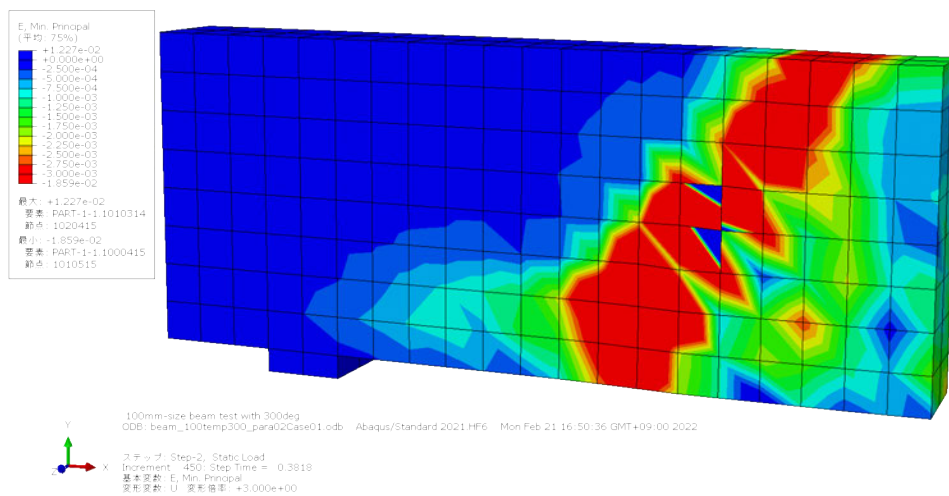
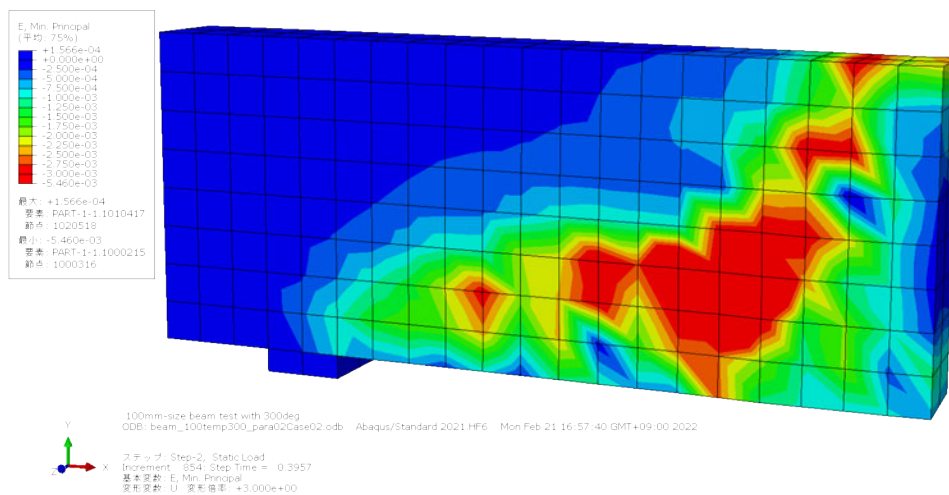


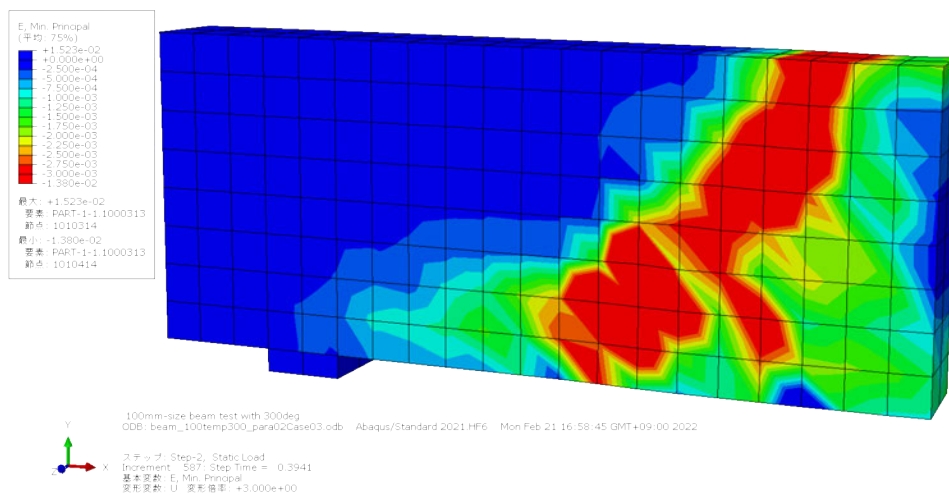
図 3.5.1-10 荷重－変位関係



(1) Case1

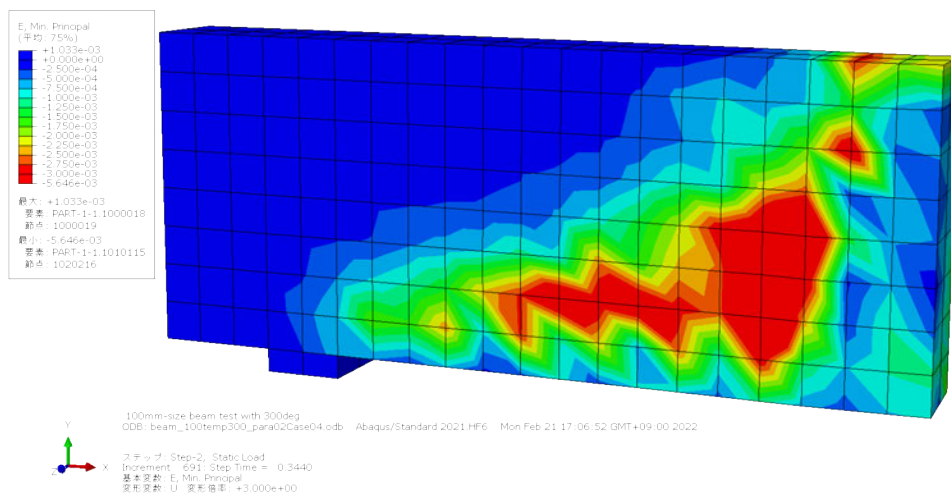


(2) Case2

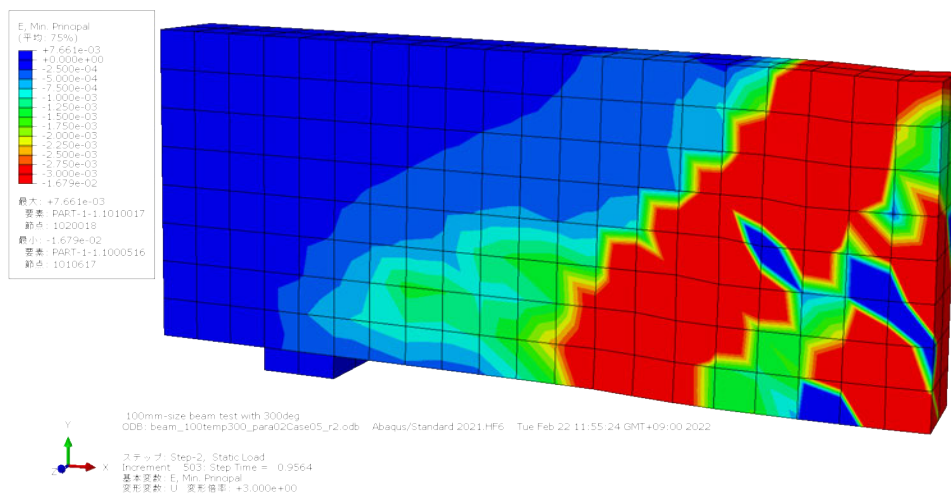


(3) Case3

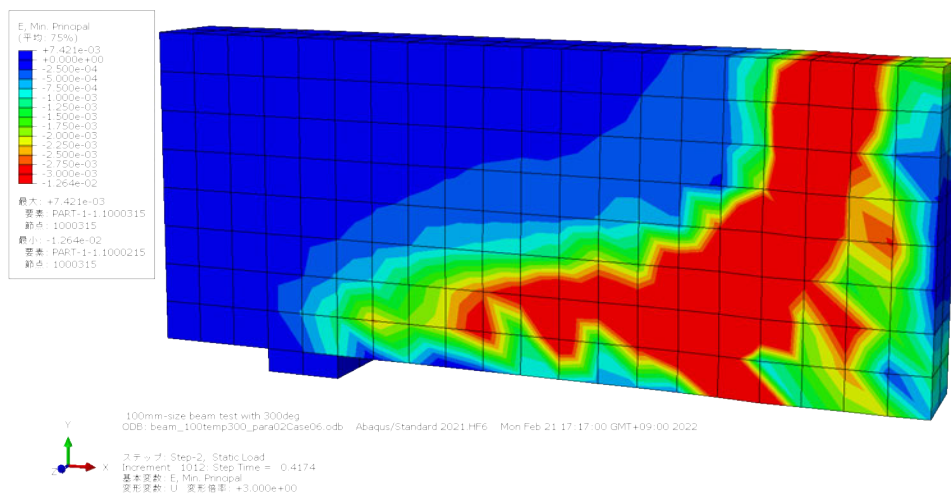
図 3.5.1-11 最大耐力時の最小主ひずみコンター図 (最小ひずみ 3000μ) (1/3)



(4) Case4

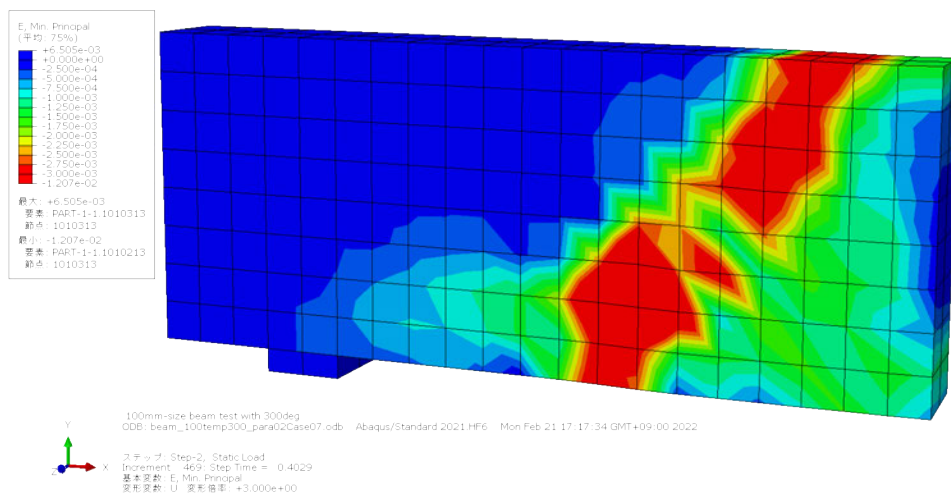


(5) Case5

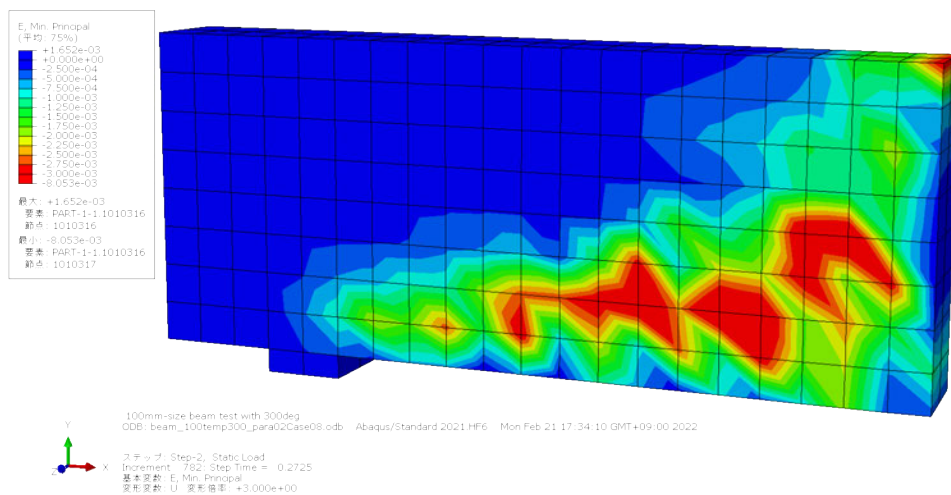


(6) Case6

図 3.5.1-11 最大耐力時の最小主ひずみコンター図 (最小ひずみ 3000μ) (2/3)



(7) Case7



(8) Case8

図 3.5.1-11 最大耐力時の最小主ひずみコンター図 (最小ひずみ 3000μ) (3/3)

(5) 結果の分析

本解析は、直行表 L_8 に従い、組み合わせケースを考慮した解析である。そこで、最大耐力・最大耐力時のひずみ・各変位時の荷重（対象は、3.0・6.0・9.0・12.0・15.0mm）に与えるパラメータの影響の主効果を図 3.5.1-12 に示す。

最大耐力に関する主効果としては、出雲らのモデルに関する係数 c 及び膨張角が最も結果への影響が大きく、圧縮強度及びポアソン比はあまり影響を与えていないことが分かる。

最大耐力時の変位については、いずれかのパラメータが突出した影響力があるという結果にはなっていないが、相対的にはポアソン比は変位に対して大きな影響は与えないようである。

各変位時の荷重に関する主効果を分析すると、全体を通して出雲らのモデルに関する係数 c の影響が最も大きく、変位が大きくなるほど、引張強度及び膨張角の影響も大きいことが観察される。一方で、本試験においては圧縮強度、ポアソン比、及び圧縮終局ひずみは、結果に対する影響があまり大きくはない。

「(4)解析結果」において出雲らのモデルに関する係数 c が梁の破壊性状に大きな影響を与えていることが分かっており、主効果の評価においても、出雲らのモデルに関する係数 c が耐力に大きな影響を与えていることを踏まえると、テンションスティフニング効果については今後も継続的な調査が必要である可能性がある。

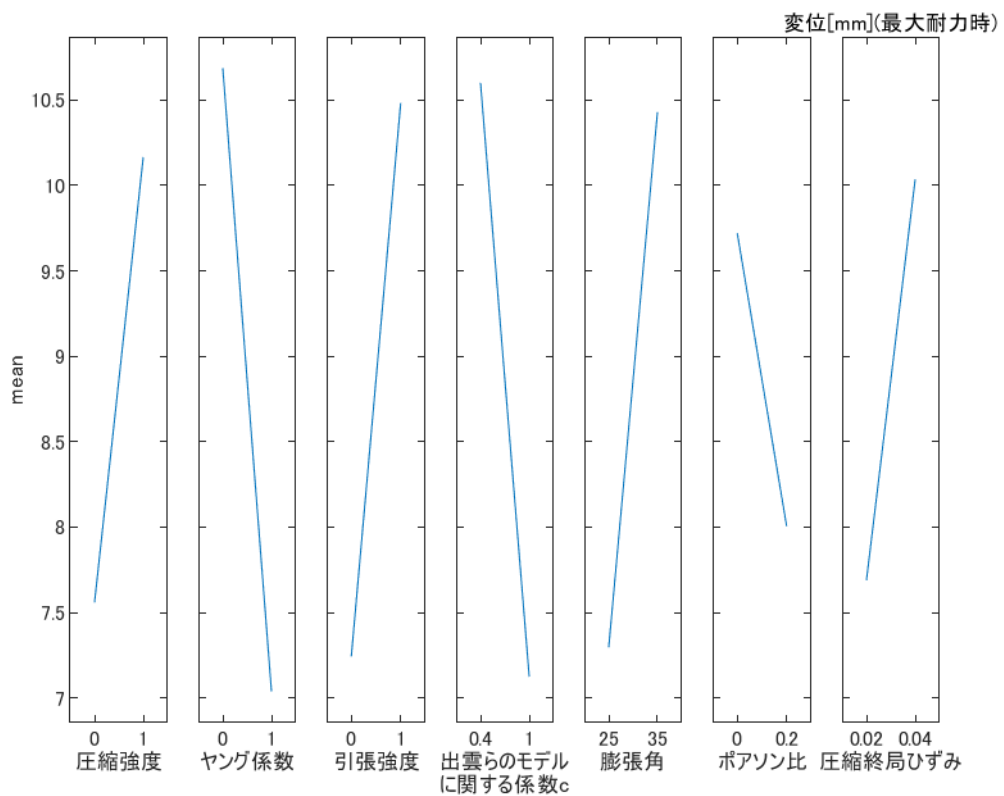
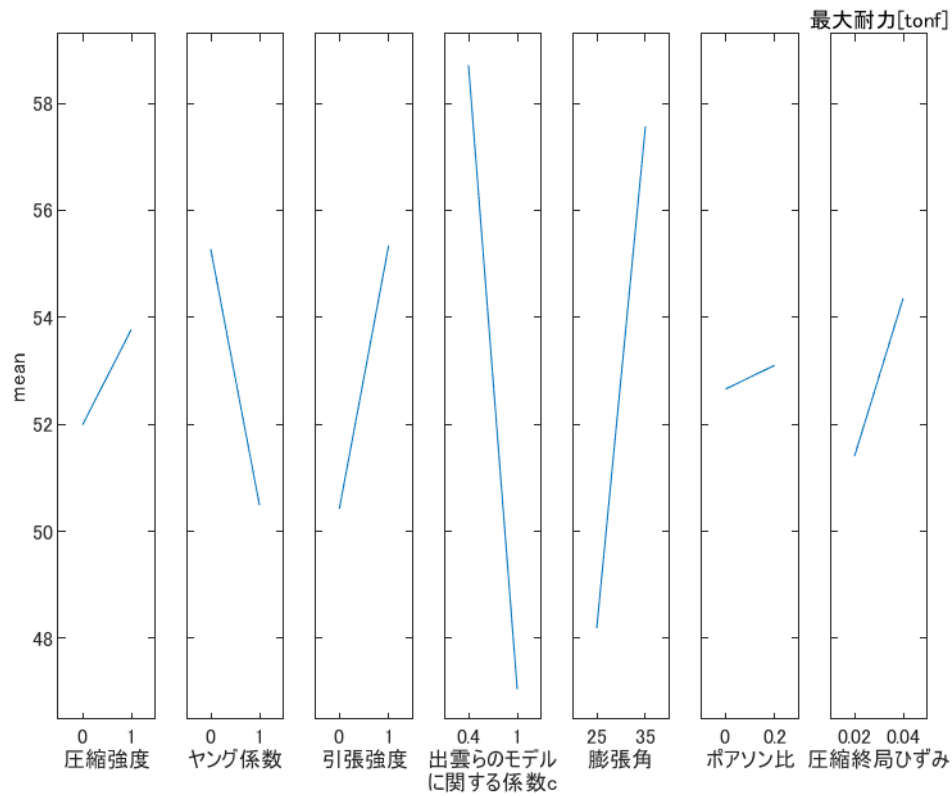


図 3.5.1-12 主効果プロット (1/4)

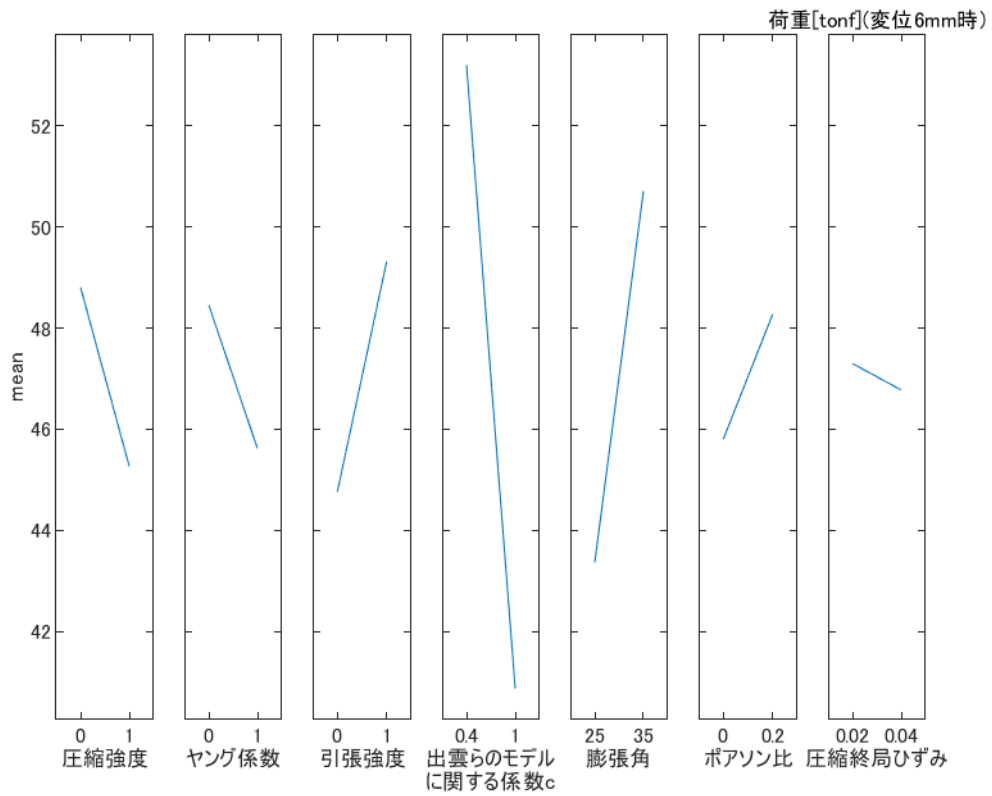
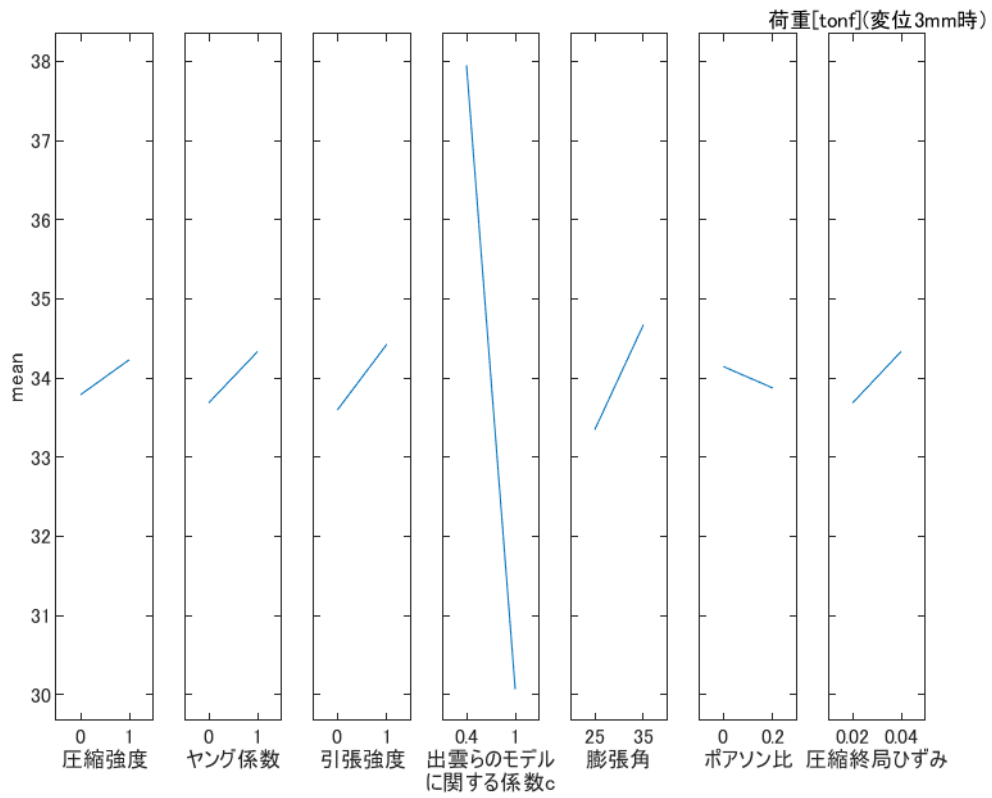


図 3.5.1-12 主効果プロット (2/4)

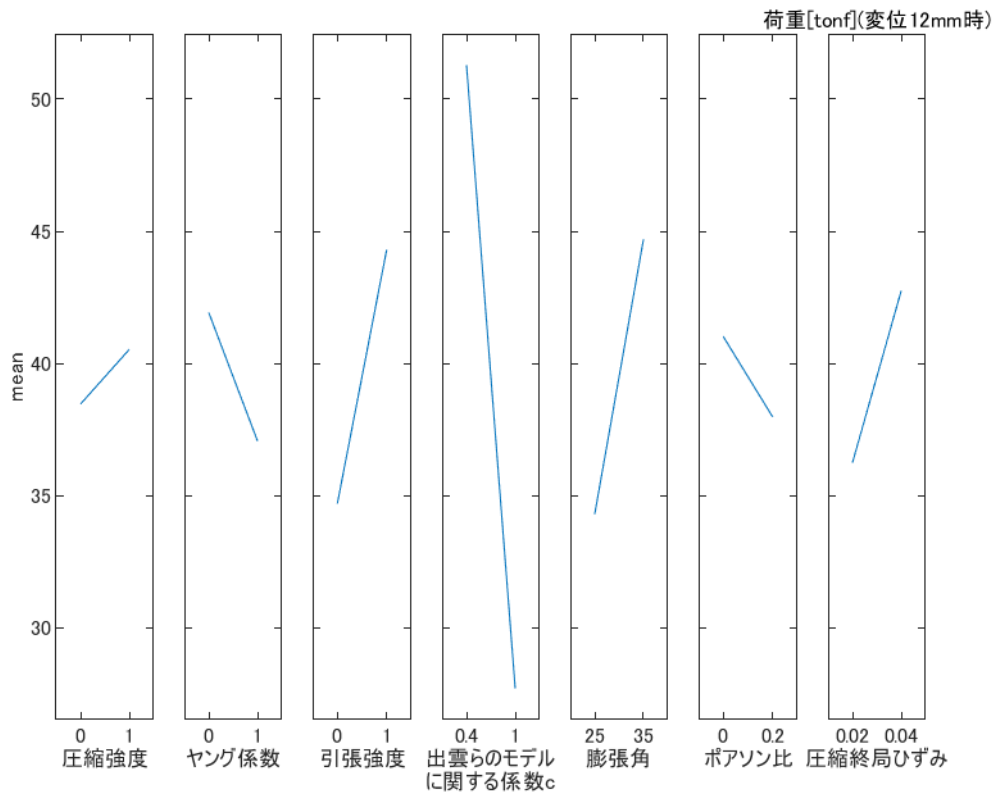
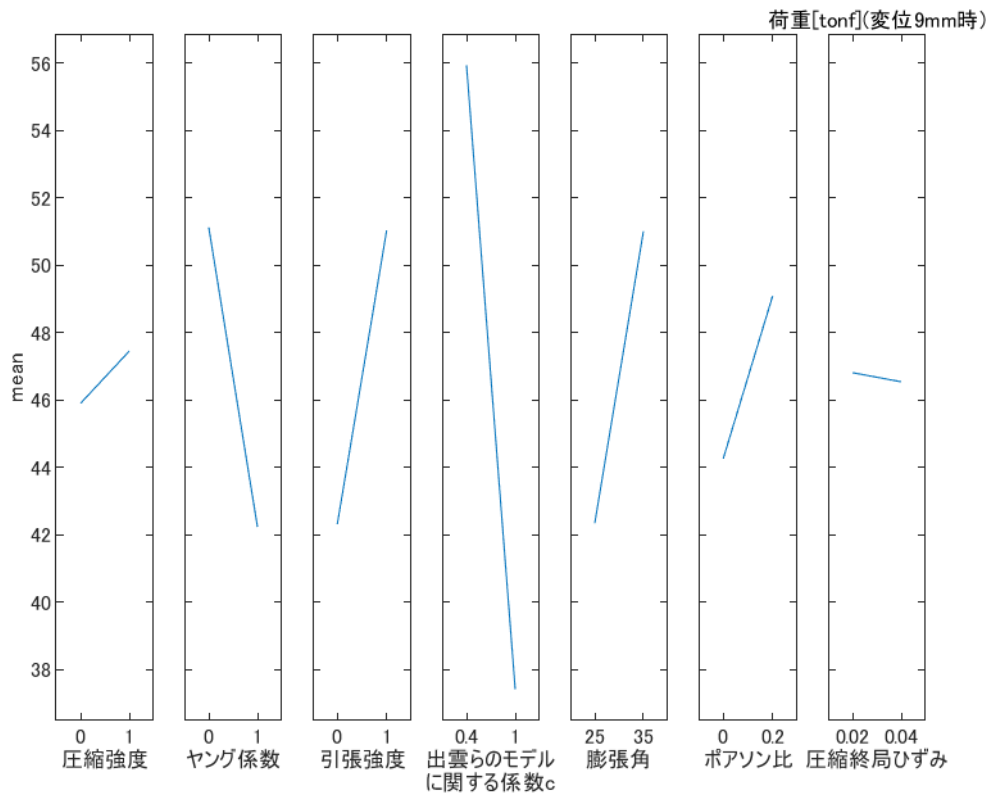


図 3.5.1-12 主効果プロット (3/4)

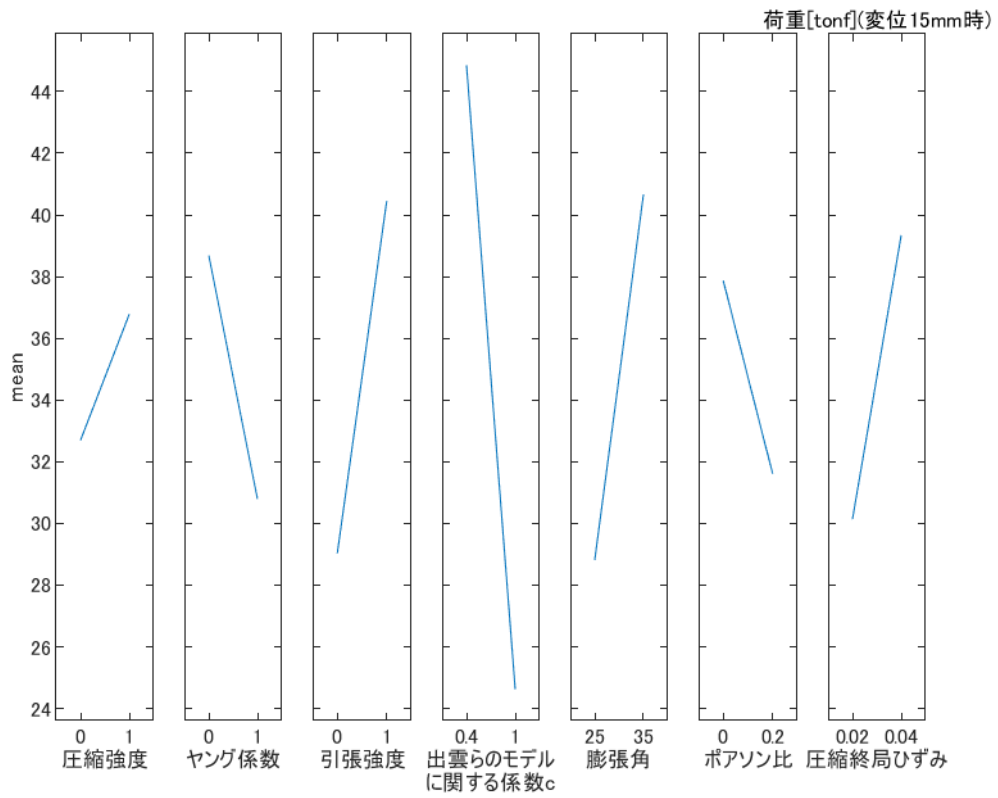


図 3.5.1-12 主効果プロット (4/4)

(6) 追加の感度解析

(5)までで検討した感度解析に加えて、Best Estimate パラメータを把握するために、追加の感度解析を実施する。(5)までで検討した感度解析の Case5 が最も実験結果と整合していたため、Case5 を基準としてパラメータを変動させた感度解析を行う。Case5 では、耐力は概ね実験結果をとらえているものの、荷重－変位関係の初期の傾きに差異があることから、荷重－変位関係の初期の傾きに影響を与える可能性があるパラメータを選定し、感度解析を実施する。「(5)結果の分析」の結果より、最も解析への影響が大きいパラメータは、出雲らのモデルに関する係数 c である。そのため、出雲らのモデルに関する係数 c を変動させて感度解析を行う。

出雲らのモデルに関する係数 c は感度の大きいパラメータであり、Case5 において、出雲らのモデルに関する係数 c を 0.4 としていることから、2 倍の 0.8 まで 0.1 刻みで変更した感度解析を実施する。解析に用いたパラメータにおける、Case5 より変更されたコンクリートの応力ひずみ関係(引張)を図 3.5.1-13 に示す。また、解析結果を図 3.5.1-14 及び図 3.5.1-15 に示す。なお、荷重－変位関係は、加熱による試験体の変形後の変位を 0mm としており、解析も加熱による変形を考慮していない。

解析結果より、出雲らのモデルに関する係数 c が増加するに従い、荷重－変位関係の傾きは小さくなるが、耐力が減少する傾向を示した。「(5)結果の分析」の結果より、出雲らのモデルに関する係数 c は感度の大きいパラメータであることを確認していたが、剛性及び耐力への影響が大きいことを改めて確認することができた。

また、本解析で実施したパラメータの感度解析では、Case5 の出雲らのモデルに関する係数 c を 0.4 または 0.5 とした場合が、最も実験結果と整合する結果となった。

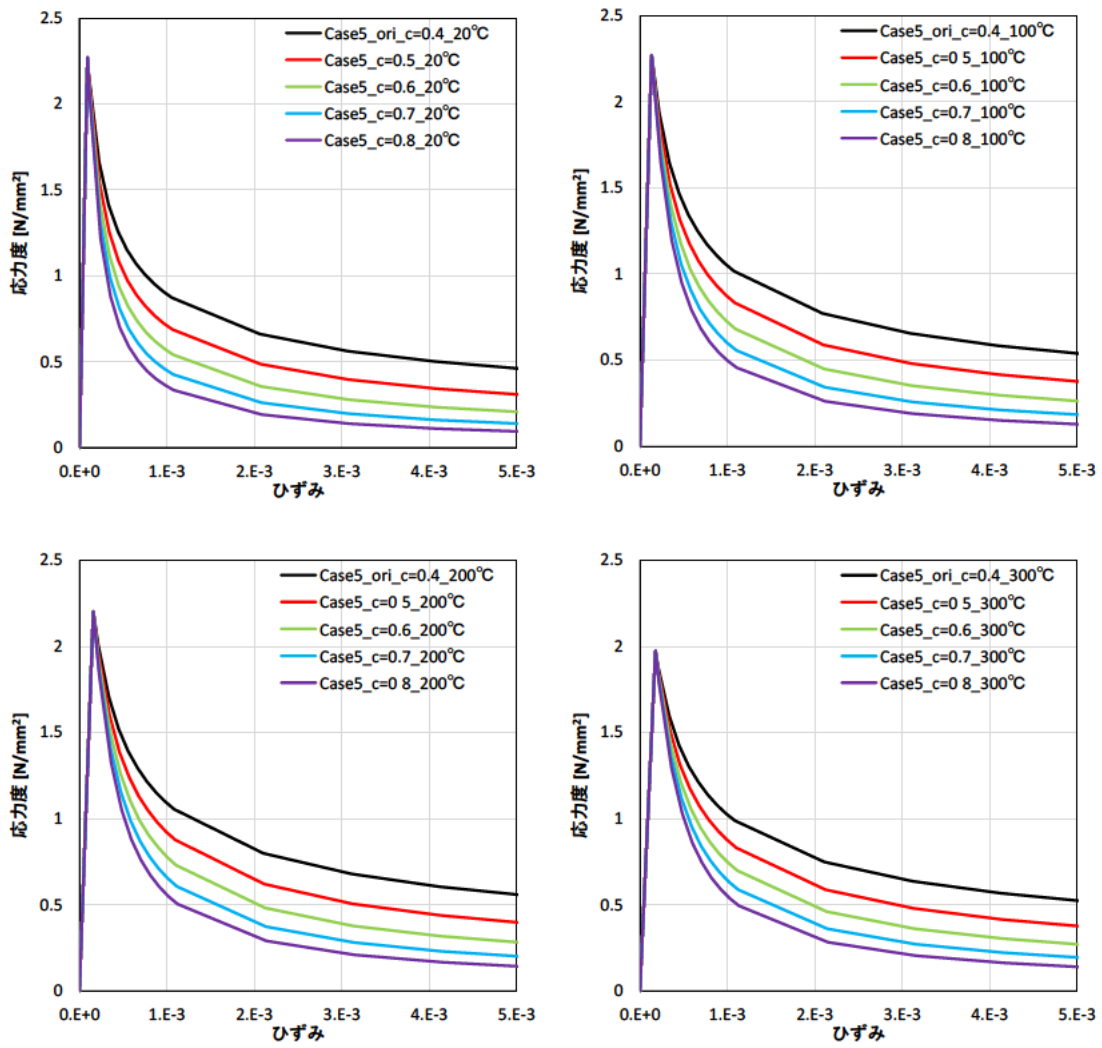


図 3.5.1-13 コンクリートの応力ひずみ関係 (引張)

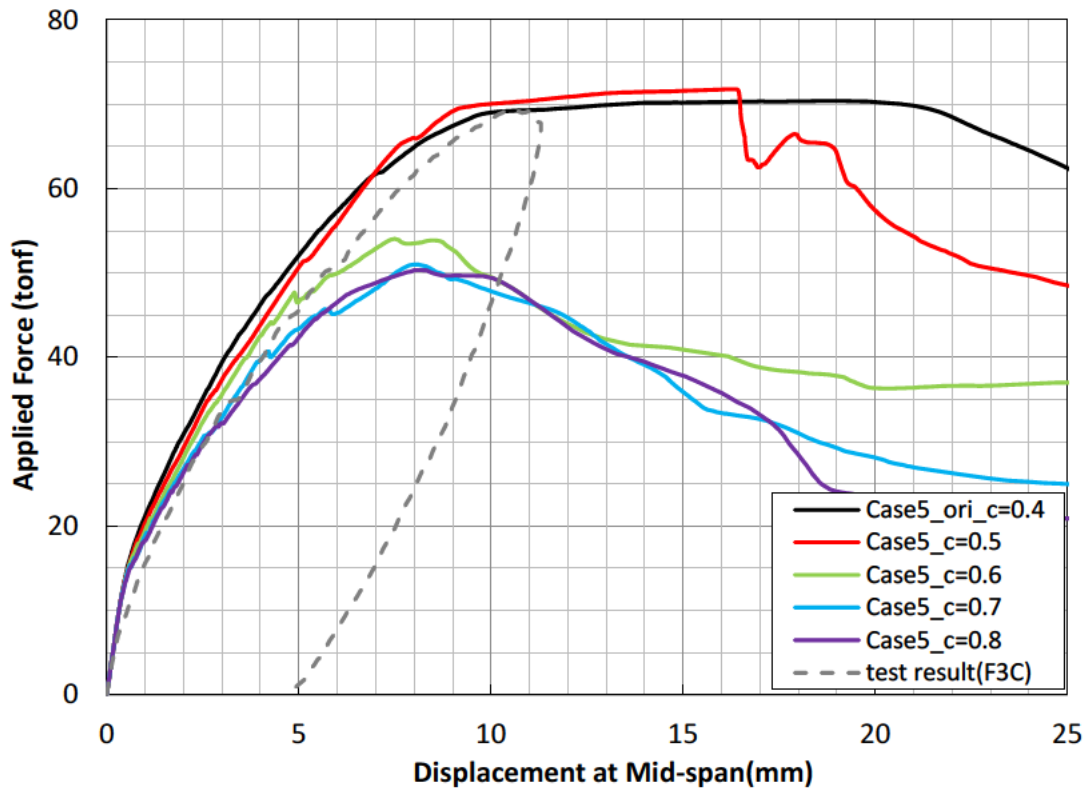
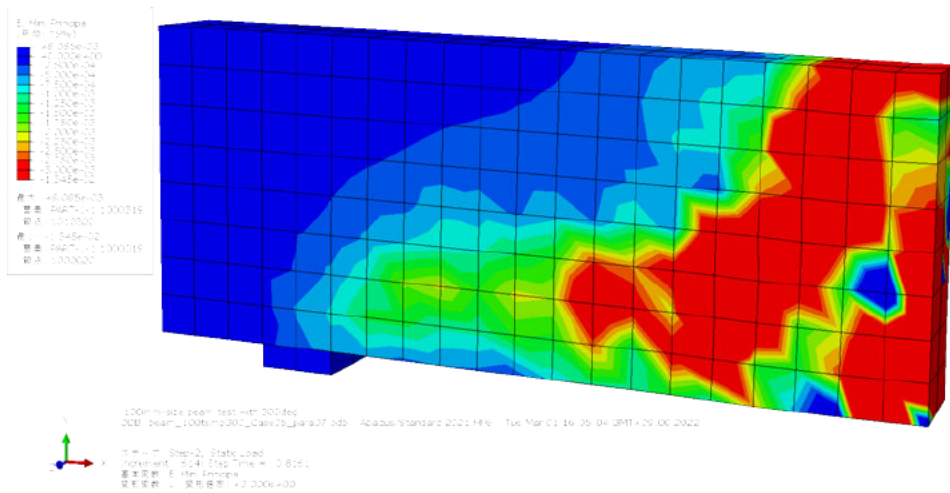
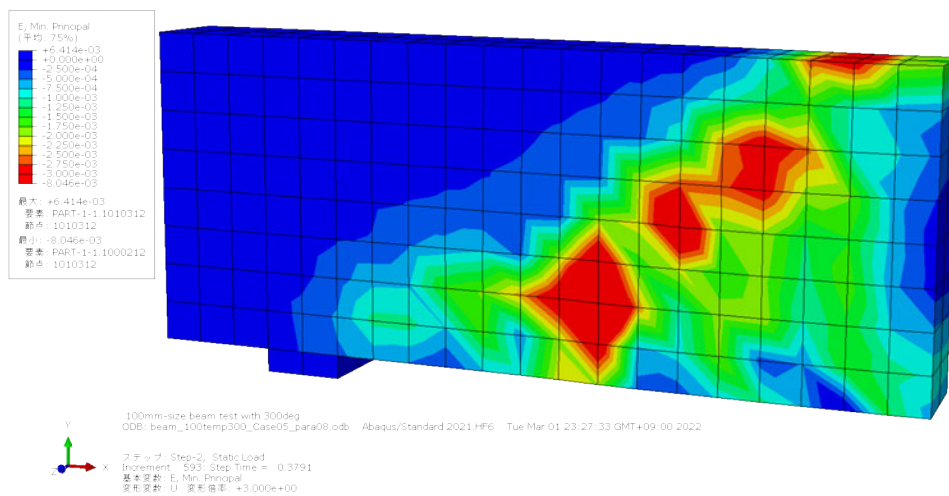


図 3.5.1-14 荷重-変位関係

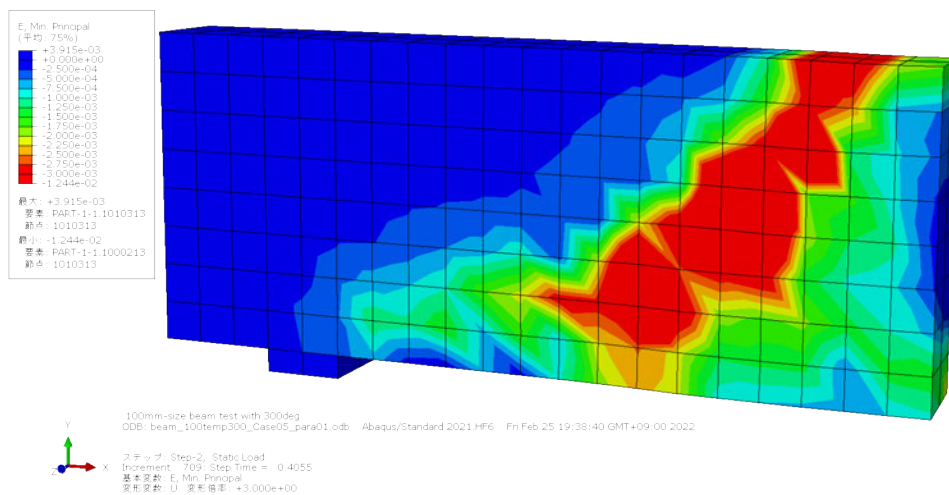


(1) Case5_c=0.5

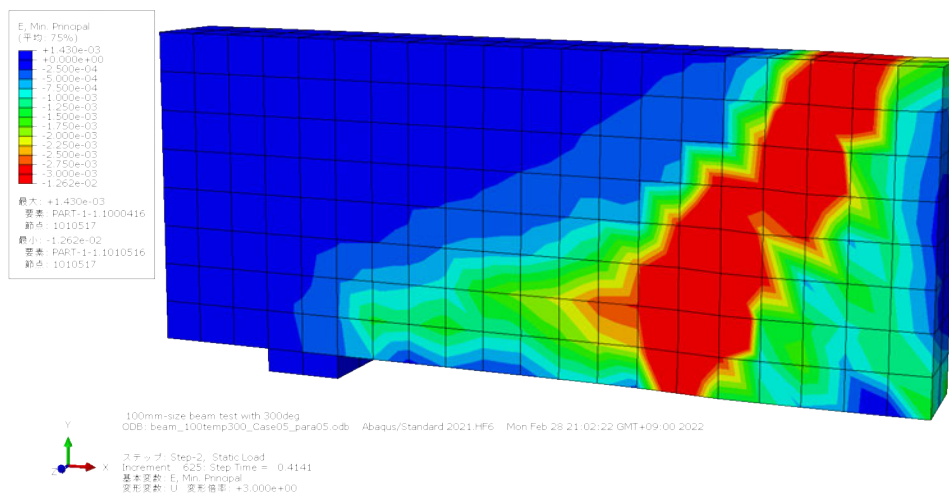
図 3.5.1-15 最大耐力時の最小主ひずみコンター図 (最小ひずみ 3000μ) (1/2)



(2) Case5_c=0.6



(3) Case5_c=0.7



(4) Case5_c=0.8

図 3.5.1-15 最大耐力時の最小主ひずみコンター図 (最小ひずみ 3000μ) (2/2)

【3.5.1 の参考文献】

- [3.5.1-1] N. Yamazaki, M. Yamazaki, T. Mochida, A. Mutoh, T. Miyashita, M. Ueda, T. Hasegawa, K. Sugiyama, K. Hirakawa, R. Kikuchi, M. Hiramoto, K. Saito: Structural behavior of reinforced concrete structures at high temperatures, Nuclear Engineering and Design 156 (1995), pp.121-138.
- [3.5.1-2] 財団法人原子力発電技術機構：重要構造物安全評価（原子炉格納容器信頼性実証事業）に関する総括報告書、平成 15 年 3 月
- [3.5.1-3] 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック, 2017
- [3.5.1-4] Eurocode 4, Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design, CEN EN 1994-1-2:2005
- [3.5.1-5] 出雲, 島, 岡村: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学, No.87.8-1, Vol.25, No.9, 1987.9
- [3.5.1-6] 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2018
- [3.5.1-7] 土木学会: コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 2002
- [3.5.1-8] Eurocode 2, Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design, CEN EN 1992-1-2: 2004
- [3.5.1-9] H. Nakamura and Takeshi Higai: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, JCI-C51E Seminar on Post-Peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Loads 2, pp.259-272, 1999.10

3.5.2 解析検討②：高温時耐震壁試験

米国 New York 州立大学 Buffalo 校が主体となって実施した高温時の低アスペクト比の耐震壁に関するせん断試験の報告^{[3.5.2-1], [3.5.2-2]}を対象として、汎用 FEM プログラム「Abaqus 2021」を用いて合計 3 ケース（詳細については後述）の解析を行った。

(1) 試験概要（文献 [3.5.2-1]及び[3.5.2-2]）

原子力発電所の耐震壁の健全性が事故時温度に曝された場合に受ける影響を検討するために、鉄筋比(W1, W4 : 0.93%, 及び W2, W3 : 2%)をパラメータとする合計 4 体の低アスペクト比のせん断壁を製作し、温度+水平方向の繰り返し載荷の試験を実施している。

試験体のサイズはいずれも高さ×幅×厚さ=1.37m×1.52m×0.25m である。

温度は壁の両面から放射加熱パネルにより最高 232℃まで与えられている。水平荷重は基礎表面から約 0.94m 上の部分を軸として正負の方向に繰り返し載荷されている。なお鉛直軸力は考慮していない。

荷重の載荷手順は次の通りで、①雰囲気温度条件下で所定の荷重値に達するまで正負交番載荷をすることで初期剛性を確認し、②その後加熱を行いながら所定の変位に達するまで正負交番載荷を行い、③最後に試験体は雰囲気温度まで冷却され、破壊に至るまで正負交番載荷が継続される。

本検討では両側鉄筋比が国内 ABWR の RCCV に近い 2%であり表面温度 232℃で加熱しながら試験を実施している W3 のケースを解析対象として選定した。

(2) 解析条件

本検討では、非定常熱伝導解析を実施して試験体の温度分布を得た後、得られた温度分布を構造解析において与え水平方向の加力を行う。以下に熱伝導解析及び構造解析の解析条件について記述する。

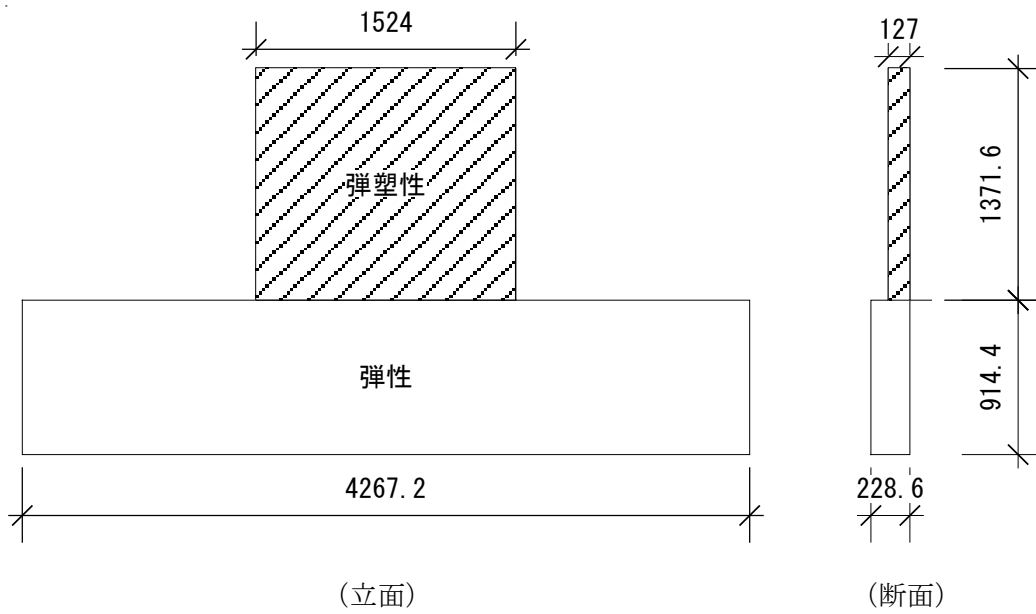
a) 解析モデル

解析モデルは試験体形状及び荷重、境界条件の対称性を踏まえて試験体の中心から半分としたハーフモデルとする。コンクリートについてはソリッド要素、鉄筋についてはトラス要素でモデル化をする。要素サイズ=25.4 mm (1 in.) 角を基本として要素分割を行う。

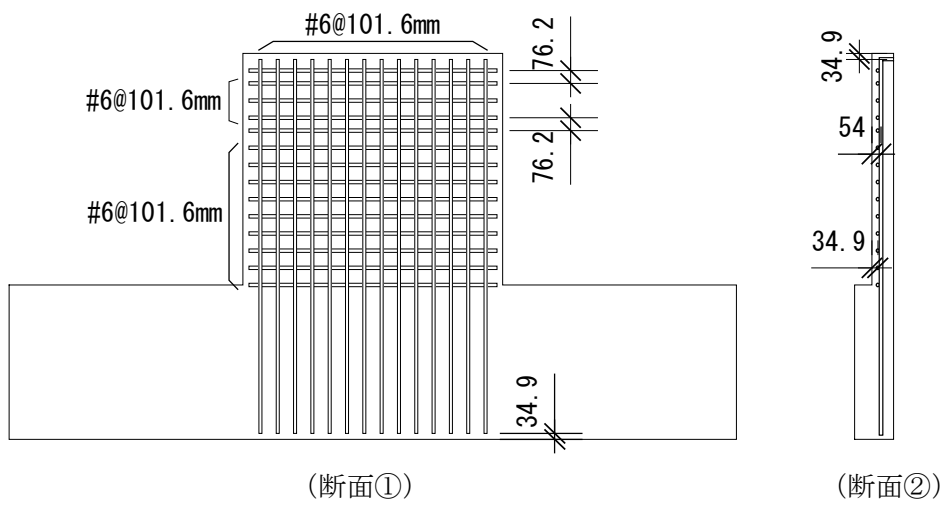
熱伝導解析では、コンクリート部分を伝熱要素によりモデル化する。鉄筋部分は、コンクリートの温度分布から内挿する。

構造解析では、コンクリートは低減積分要素を用いる。鉄筋 (#6: 直径=約 19mm) については前述のようにトラス要素でモデル化し、コンクリートのソリッド要素に埋め込む。

解析モデルの形状情報及び解析モデル図をそれぞれ図 3.5.2-1 及び図 3.5.2-2 に示す。

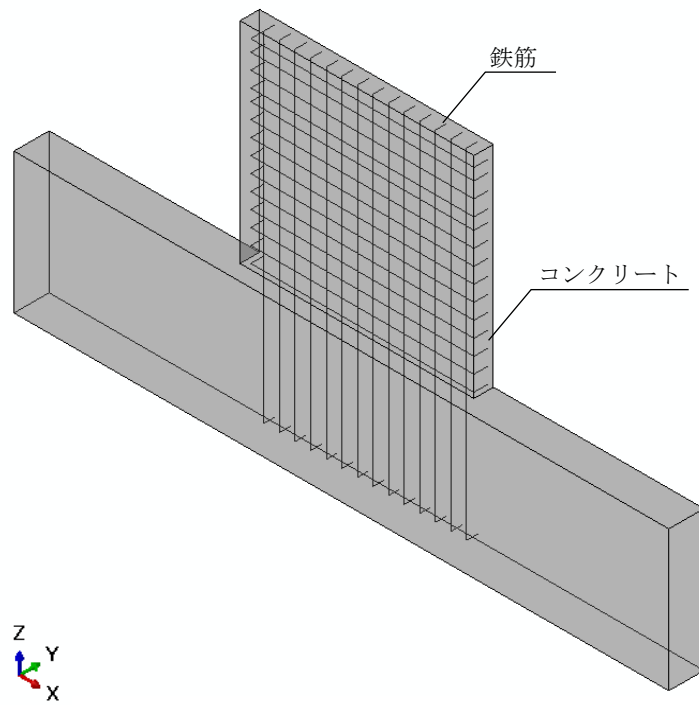


(a) コンクリート部のモデル化

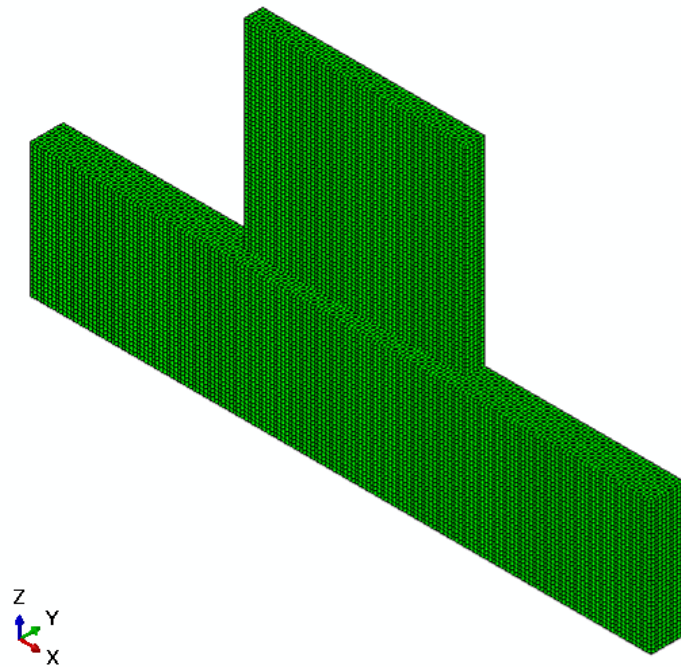


(b) 鉄筋のモデル化

図 3.5.2-1 解析モデルの形状



(a) 解析モデル概観



(b) 要素分割

図 3.5.2-2 解析モデル図

b) 材料特性

非定常熱伝導解析ではコンクリートの比熱、熱伝導率及び単位体積質量を EuroCode 2^[3.5.2-6]に基づき温度依存性を考慮して設定をした。

構造解析で用いる構成則について、コンクリートは Abaqus コンクリート塑性損傷モデルを採用し膨張角は 30° とした。また、鉄筋については古典的金属塑性モデルを用いた。材料特性（一軸応力-ひずみ関係、線膨張係数）については、文献[3.5.2-1]、[3.5.2-2]に示される材料試験結果及び EuroCode2^[3.5.2-6]に基づき定めた。詳細は以下の通りである。

- ・コンクリート圧縮側（図 3.5.2-3）
 - ・常温時の圧縮強度及び弾性係数は文献[3.5.2-1]及び[3.5.2-2]に基づいて設定をする。
 - ・圧縮／引張り強度の温度による低減率は EuroCode2（石灰質骨材）^[3.5.2-6]に拠る。
 - ・圧縮側の強度時ひずみ、終局ひずみ及び応力-ひずみ関係を定めるカーブは EuroCode2（石灰質骨材）^[3.5.2-6]に基づき設定するものとするが、強度以前のカーブは面積等価の 2 折れ線に置き換える。
- ・コンクリート引張り側（図 3.5.2-4）
 - ・引張り強度は EuroCode 2^[3.5.2-5]の算定式から上記の圧縮強度に基づいて求める。
 - ・引張り側の応力-ひずみ関係はテンションスティフニングを考慮して岡村・出雲モデルを用いることし、係数 $c=0.4$ とする^[3.5.2-7]。
- ・鉄筋（図 3.5.2-5）
 - ・鉄筋の降伏強度は材料試験結果^[3.5.2-1]、^[3.5.2-2]に基づき設定をした。弾性係数及び応力-ひずみ関係については EuroCode 2^[3.5.2-6]に基づき定めた。

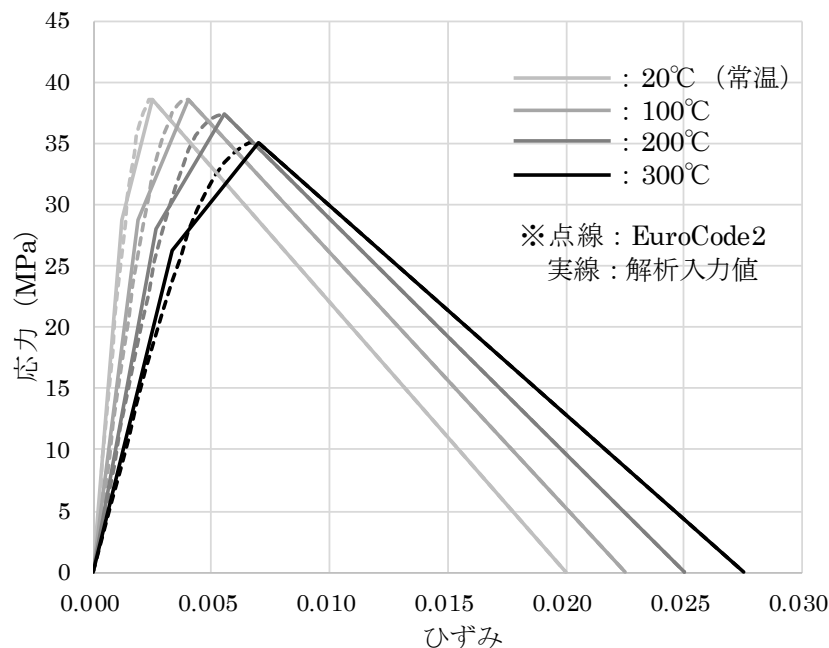


図 3.5.2-3 コンクリートの 1 軸応力-ひずみ関係（圧縮側）

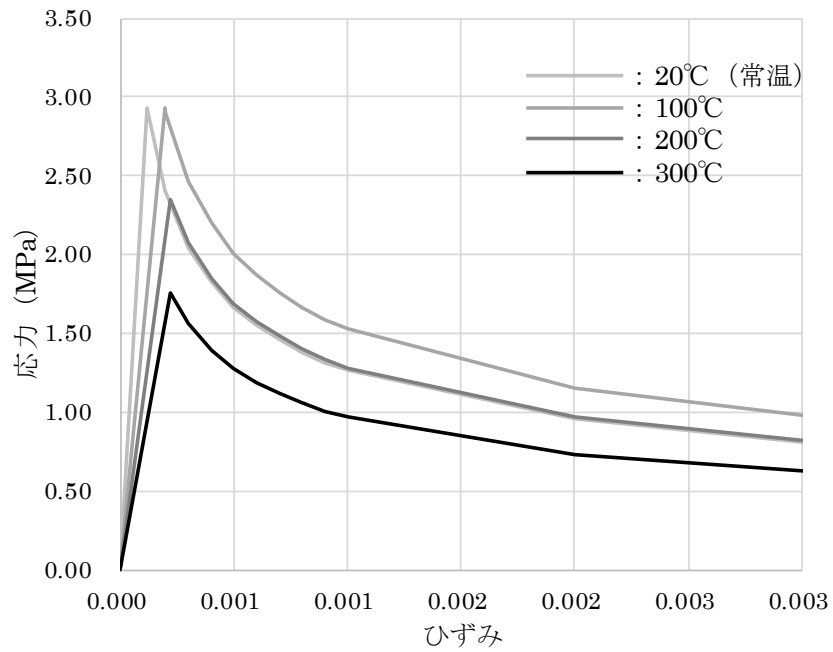


図 3.5.2-4 コンクリートの1軸応力-ひずみ関係 (引張り側)

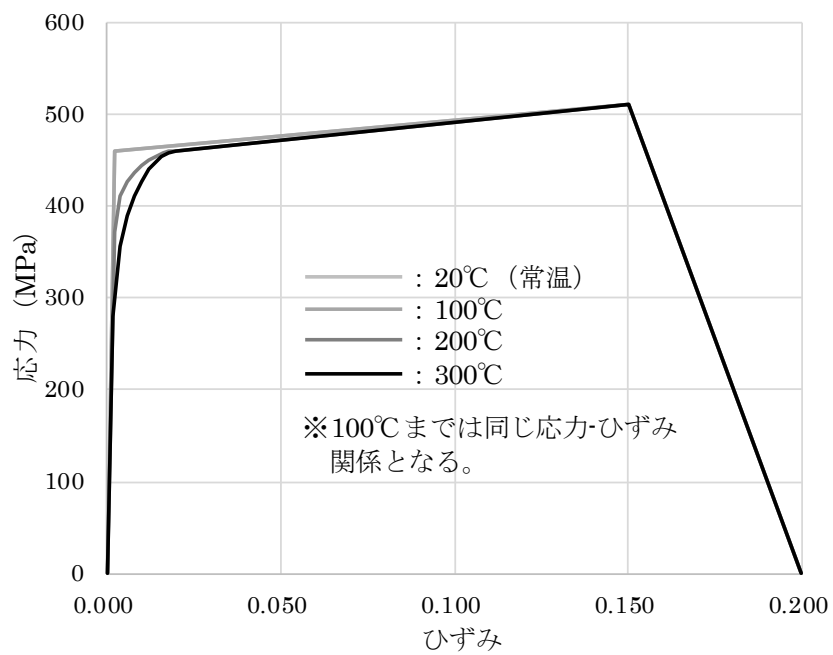


図 3.5.2-5 鉄筋の1軸応力-ひずみ関係

c) 荷重条件

熱伝導解析においては図 3.5.2-6 に示す加熱範囲の表面のノードに強制温度 (232℃) を与え 5.7 時間加熱を行う。

構造解析では水平力は一方向に載荷するものとし、文献[3.5.2-3]及び[3.5.2-4]も参考に、以下の 3 通りの方法で荷重を入力した。なお、水平方向の荷重は図 3.5.2-6 に示す水平荷重の中心から上下に 25.4 mm (合計 50.8 mm) の範囲で載荷する。

・ 荷重パターン①

ステップ 1 : 常温 (25℃) の状態で設計耐力の 40%まで水平方向に加力

ステップ 2 : 上記の水平方向の荷重はキープしたまま加熱

ステップ 3 : 水平方向に強制変位として、荷重を載荷

・ 荷重パターン②

ステップ 1 : 加熱

ステップ 2 : 水平方向に強制変位として、水平荷重を載荷

・ 荷重パターン③

ステップ 1 : 常温の条件で水平方向に強制変位として、水平荷重を載荷

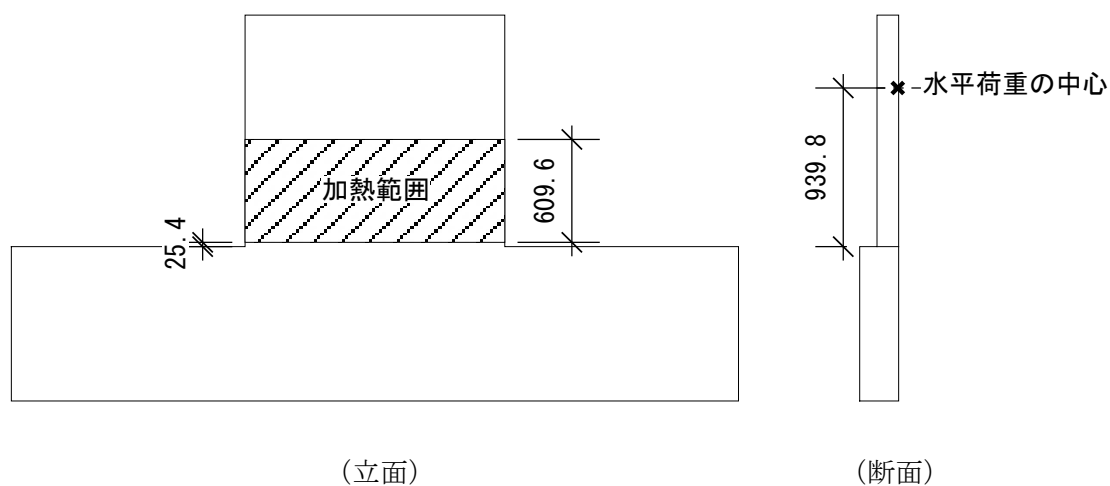


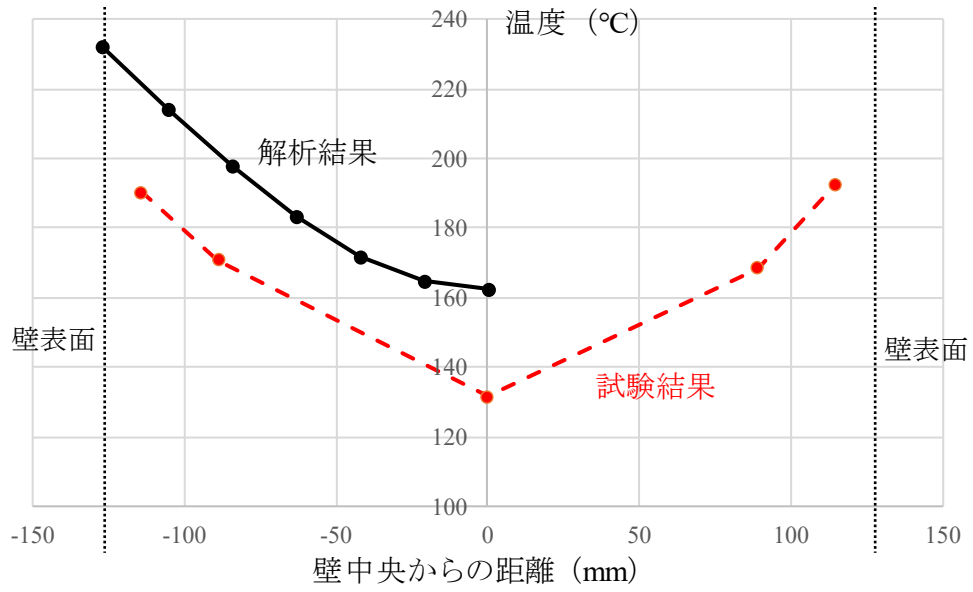
図 3.5.2-6 荷重の載荷範囲

(3) 解析結果

a) 熱伝導解析

試験体の加熱面中央点での断面方向の温度分布の比較を図 3.5.2-7 に示す。また、図 3.5.2-8 に熱伝導解析結果の温度分布コンター図を示す。

図 3.5.2-7 では文献[3.5.2-2]に示される試験結果と解析結果で差異がみられる。解析ではノードに強制温度を与え加熱している一方で、実際の試験では加熱パネルをコンクリート躯体表面に接触させることで加熱しており、試験結果では温度計測箇所により温度分布に若干ばらつきもみられ、解析と実際の試験でのコンクリート表面への熱伝達の仕方に相違がある可能性がある。



※試験結果は文献[3.5.2-1]及び[3.5.2-2]より読み取り

図 3.5.2-7 温度分布解析結果 (約 5.7 時間加熱後)

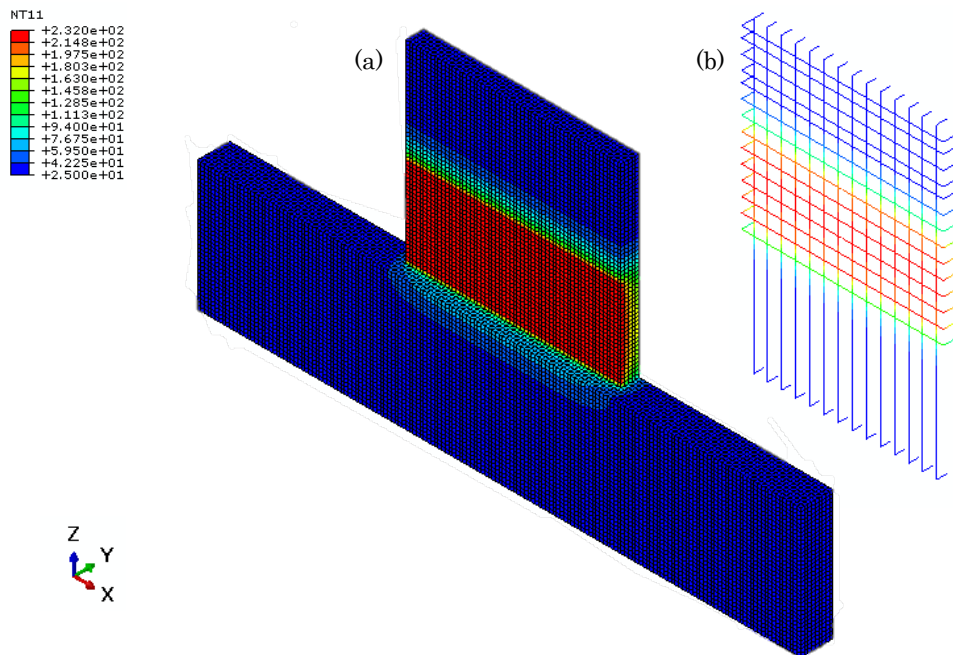


図 3.5.2-8 温度分布解析コンター図 (5.7 時間加熱後) : (a) コンクリート部分及び (b) 鉄筋部分

b) 構造解析

荷重-変形（層間変形角）関係を図 3.5.2-9 に示す。

ケース①のカーブには荷重-変形関係の途中で荷重は増減せず変形のみ進む棚の部分がみられる。これは、ケース①では荷重ステップ 2 で水平荷重を維持したまま加熱をしており、モデルの弾性係数が温度に応じて低下しする一方で釣合い保持のために変形のみが進んでいることが理由と考えられる。

試験体全体の剛性の推移については、高温状況を考慮したケース①及び②よりも常温のケース③の方が試験結果と良く合致している。実際の試験では加熱をしながら加力を行っており、特に初期の加力サイクル付近では常温に近い試験条件になっていると推測される。

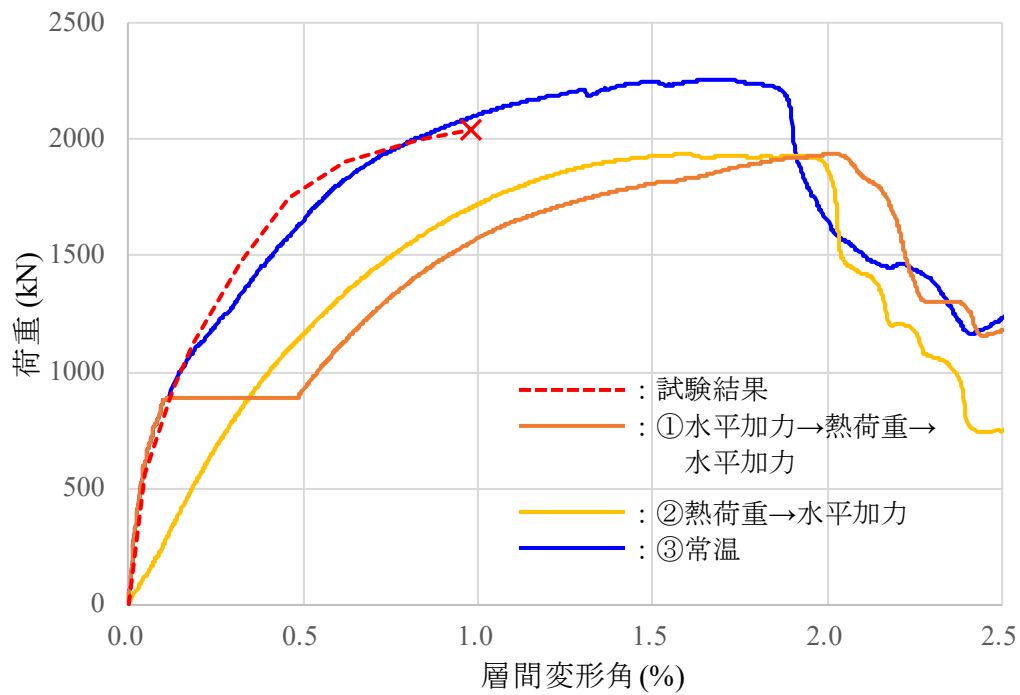
耐力については高温状況を考慮したケース①及び②の方が、実際の試験により近い結果を与えた。また、ケース①と②では温度荷重を載荷するタイミングが異なるが、最大耐力時点での変形及び最大耐力に大きな差異は見られなかった。

最大耐力時の変形量については、試験結果と比べて解析結果の方が進んでいる。**Eurocode2**^[3.5.2-6]に示されているコンクリートの一軸応力-ひずみ関係は遷移クリープを含んでおり、コンクリートの強度時ひずみが通常の試験結果と比較してかなり大きいことが指摘されている（「3.2 既往規格・基準類及び設計事例等の調査 (1) 国内の既往規格基準 iii) 構造材料の耐火性ガイドブック」参照）。一方で実験での加熱時間は 5.7 時間程度となっており、温度によるクリープが発生する状況とは考えにくく、それと比してクリープを含んだ**Eurocode2**^[3.5.2-6]のモデルを採用している解析ではやや過剰に変形している可能性がある。

ピーク荷重時のコンクリートの圧縮側相当塑性ひずみの分布を図 3.5.2-10 に示す。いずれのケースでも斜めに圧縮ストラットが形成されており、図中右下の支持点で最大の圧縮側相当塑性ひずみが発生していることが分かる。

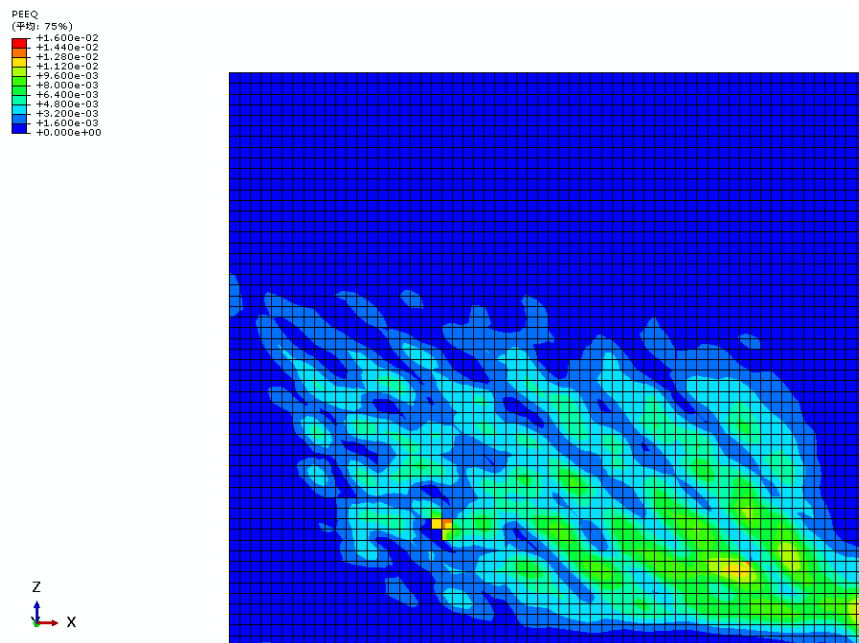
図 3.5.2-11 にコンクリートの引張り側相当塑性ひずみの分布図を示す。引張り側相当塑性ひずみの分布はコンクリートのおおよそのクラックパターンとして考えることも出来る。いずれのケースでも図中の左下に曲げ引張りによるクラックが生じていること、また全体にせん断クラックが発生していることが確認できる。

図 3.5.2-12 に鉄筋の相当塑性ひずみ分布図を示す。曲げ引張りにより図中左下の縦筋が降伏しており、また一部の縦筋が曲げ-せん断変形のために降伏していることが観察できる。



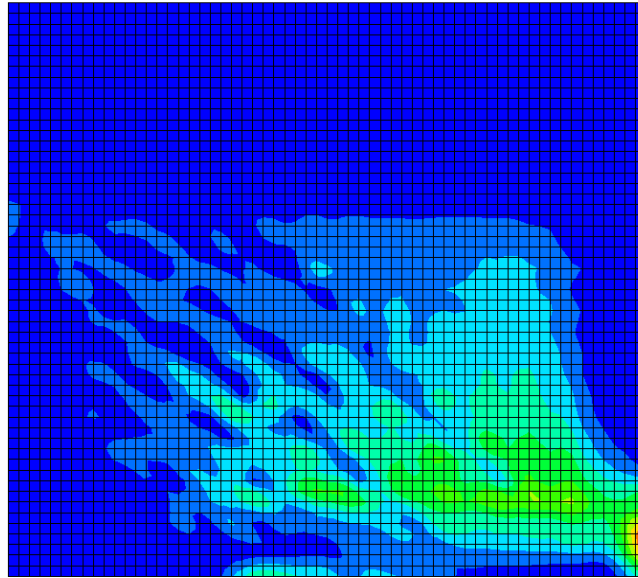
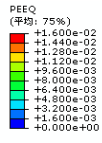
※試験結果は文献[3.5.2-1]及び[3.5.2-2]より読み取り

図 3.5.2-9 荷重-変形（層間変形角）関係

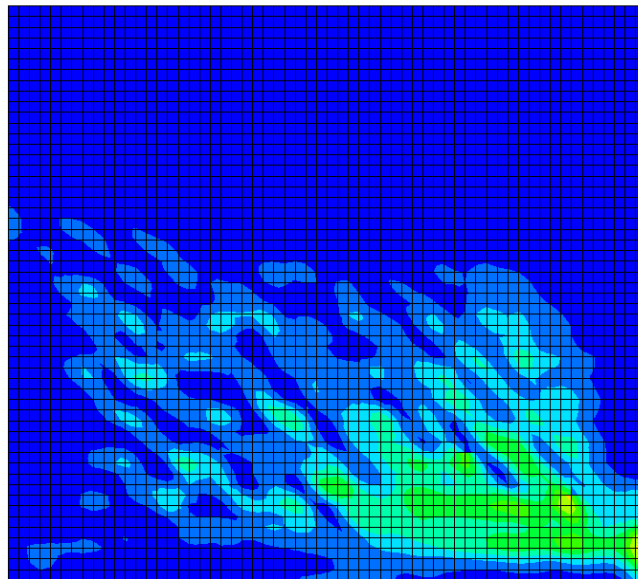
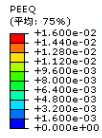


(a) ①水平加力→熱荷重→水平加力ケース

図 3.5.2-10 コンクリート 圧縮側相当塑性ひずみ（ピーク荷重時）（1/2）

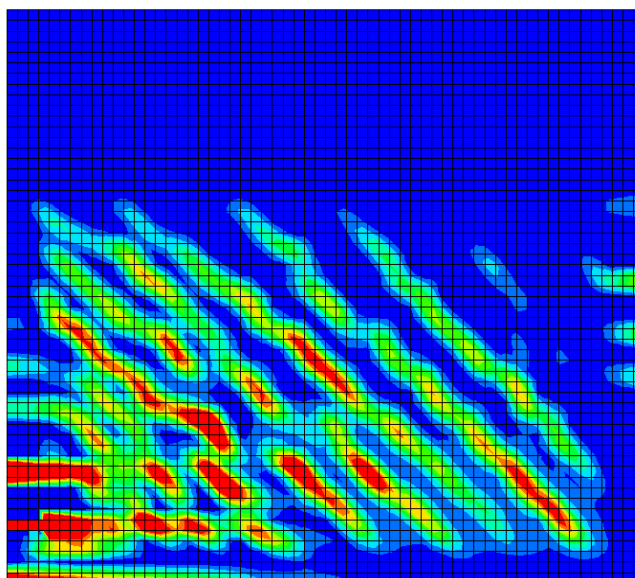
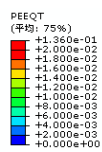


②熱荷重→水平加力 ケース

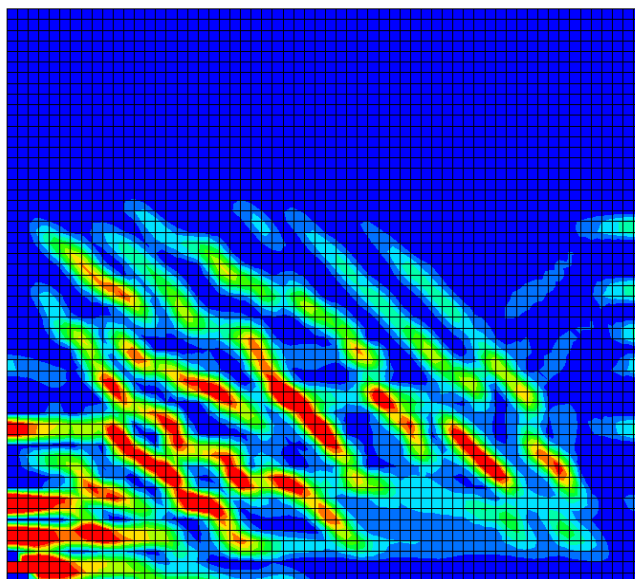
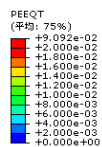


③常温水平加力 ケース

図 3.5.2-10 コンクリート 圧縮側相当塑性ひずみ (ピーク荷重時) (2/2)

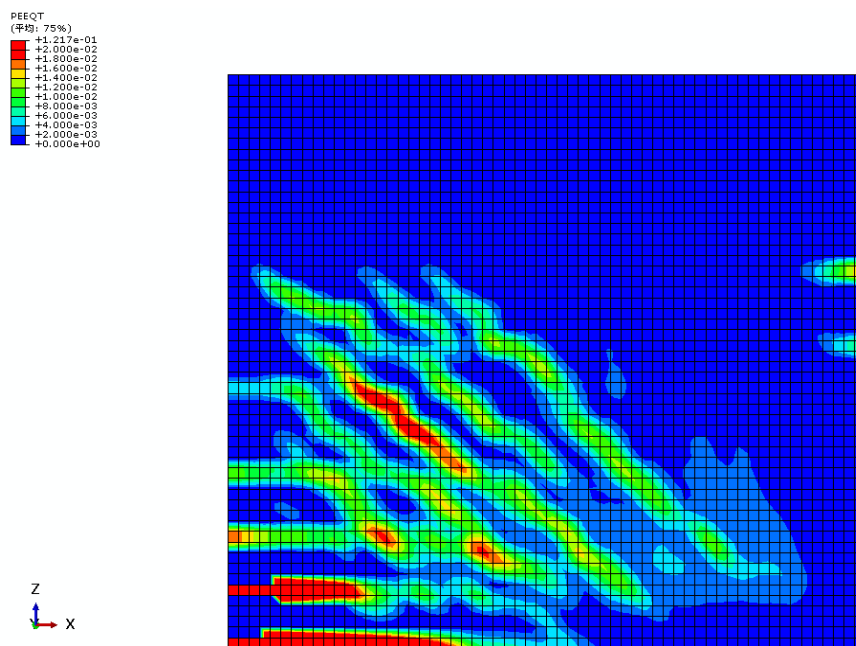


①水平加力→熱荷重→水平加力 ケース



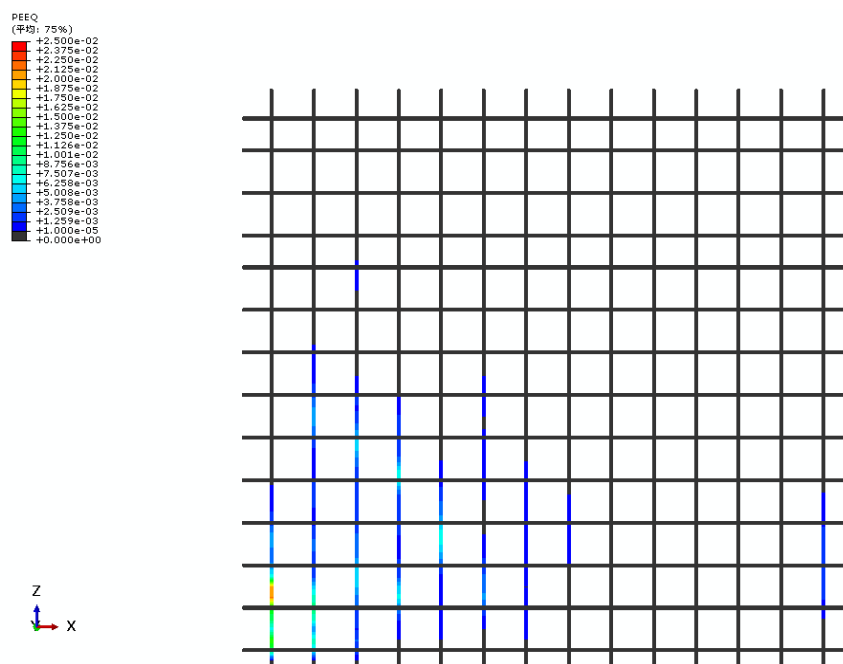
②熱荷重→水平加力 ケース

図 3.5.2-11 コンクリート 引張り側相当塑性ひずみ (ピーク荷重時) (1/2)



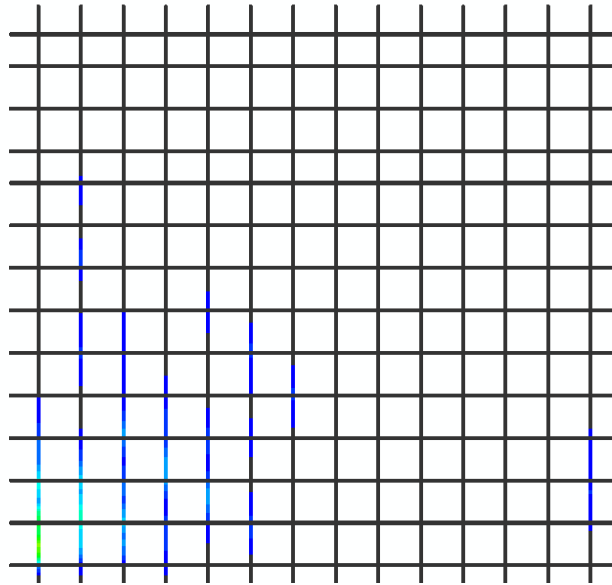
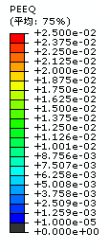
(c) ③常温水平加力 ケース

図 3.5.2-11 コンクリート 引張り側相当塑性ひずみ (ピーク荷重時) (2/2)

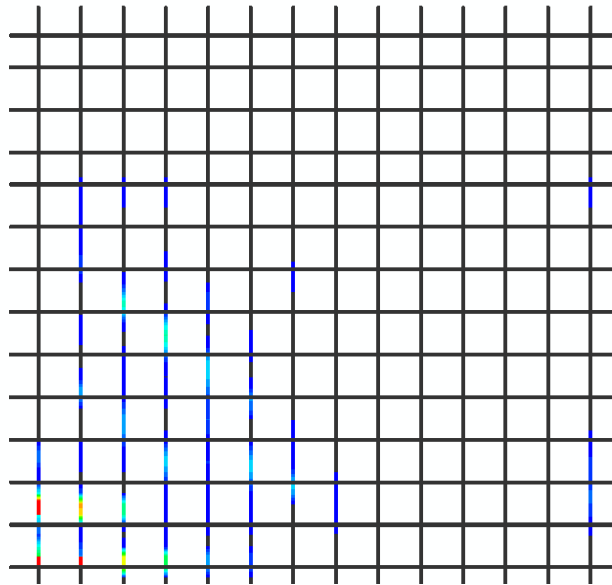
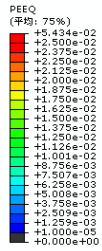


(a) ①水平加力→熱荷重→水平加力 ケース

3.5.2-12 鉄筋 相当塑性ひずみ (ピーク荷重時) (1/2)



(b) ②熱荷重→水平加力 ケース



(c) ③常温水平加力 ケース

図 3.5.2-12 鉄筋 相当塑性ひずみ (ピーク荷重時) (2/2)

【3.5.2 の参考文献】

- [3.5.2-1] A.A. Deshpande and A.S. Whittaker: A CYCLIC BACKBONE CURVE FOR REINFORCED CONCRETE SHEAR AT ELAVATED TEMPERATURES, SMiRT 25, 2019.
- [3.5.2-2] A.A. Deshpande: A multiple study of concrete subjected to elevated temperatures, PhD Dissertation, the University at Buffalo, State University of New York, 2019.
- [3.5.2-3] H.S. Anwar, S.R. Bhardwaj, and A.H. Varma: ON THE RESPONSE OF SQUAT REINFORCED CONCRETE WALLS FOR COMBINED LATERAL AND ACCIDENT THERMAL LOADING, SMiRT25, 2019.
- [3.5.2-4] H.S. Anwar: NUMERICAL INVESTIGATION OF THE IN-PLANE BEHAVIOR OF REINFORCED-CONCRETE (RC) WALLS: CYCLIC AND ADDCIDENT THERMAL LOADINGS, MS Theis, Purdu University, 2018.
- [3.5.2-5] Eurocode 1, Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN EN 1992-1-1: 2004.
- [3.5.2-6] Eurocode 2, Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design, CEN EN 1992-1-2: 2004.
- [3.5.2-7] 出雲, 島, 岡村: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学, No.87.8-1, Vol.25, No.9, 1987.9

4. まとめ

高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動について、既往知見の収集、材料・構造実験の調査、解析手法の調査等を行い、実験・解析による応答挙動の把握のための具体的な計画等について検討を実施した。各検討項目における成果の概要を 4.1～4.5 に示す。また、地震随件事象に対するコンクリート製原子炉格納容器の要求性能を定量化するために重要である、今後の技術課題を 4.6 に示す。

4.1 地震随件事象等の整理・分析

地震随件事象及び重大事故等の進展状況を踏まえた 2 つの重畳シナリオを想定するとともに、地震随件事象に対するコンクリート製原子炉格納容器の要求性能を定量化するための重要な問題点として、次の 3 項目を抽出した。

- ①コンクリート、鉄筋及びライナ等の各構成材料の損傷評価（材料レベルの観点）
- ②構造部材の損傷評価、各材料間の境界条件変化の評価（部材レベルの観点）
- ③各構造部材からなる格納容器全体としての損傷評価（構造物全体の観点）

また、上記の問題点を解決するための実験計画及び実機解析を含む全体像を提案した。

4.2 既往規格・基準類及び設計事例等の調査

国内外の温度影響を考慮したコンクリート製原子炉格納容器の耐震設計・評価に関する規格基準について、損傷履歴の有無及び放射性物質の大規模放出リスクに関する機能損傷の観点から、温度レベルに応じた温度荷重の考え方、地震応答を評価する際の温度荷重の扱い及びコンクリートの材料物性(圧縮強度、引張強度、弾性係数等)を調査した。また、調査した規格・基準類で参考又は引用している論文等での温度荷重の扱い及び温度によるコンクリートの材料物性に関する知見の整理を実施した。調査結果の一例として、国内外の CCV 規格におけるコンクリートの許容温度に関して、短期許容力度体系としては 175°C程度となっている。また、国内の CCV 規格における熱応力の評価方法に関して、剛性の一律低減法又は塑性剛性を評価する方法が挙げられており、前述の許容温度以内では荷重状態 III（短期）で 1/3、荷重状態 IV（機能維持）で 0 の値が示されている。

最後に、損傷履歴の有無の影響及び構造・機能損傷的な観点から、次に示す 3 つの国内外のコンクリート製原子炉格納容器の耐震設計・評価事例を調査し、耐震設計・評価における温度荷重の扱いに関する考え方をまとめた。

- ①国内の事例 コンクリート製格納容器の設計法
- ②米国 ESBWR (Economic Simplified Boiling Water Reactor)
- ③米国 AP1000

米国の規格である ASME BPVC SECTION III では、コンクリートが経験する温度の許容値と温度荷重を考慮することが示されているのみであり、国内の CCV 規格とは異なり、

熱応力の評価方法については記載されていない。そのため、基本的には設計者が熱応力評価法の妥当性の説明をする必要がある。例えば、上記②及び③文は、線形解析によって得られた熱応力を地震時の水平力を含めたその他の荷重と組み合わせて設計することを前提としており、事故時温度条件下の断面力／モーメントや建屋剛性の低減率について、弾塑性解析と線形解析の比較の中で議論を行っている。

4.3 既往研究の調査

4.3.1 温度影響を受けたコンクリート及び鉄筋コンクリート部材に関する実験

加熱中又は加熱後のコンクリートについて調査した事例を対象として、温度影響を受けたコンクリートの材料物性（圧縮強度、引張強度、弾性係数等）に関する国内外の材料実験例を調査し知見を整理した。その結果、4.2 での調査では不足していた、次の要因に対する材料物性（物理特性及び熱特性）としての温度影響に関する知見が得られた。

- ①加熱履歴・加熱時間の相違が材料物性に与える温度影響
- ②コンクリート中のセメント種類の相違（フライアッシュ使用）が材料物性に与える温度影響
- ③長期高温加熱下での大型部材コア抜き試験に基づく材料物性の温度影響

また、温度影響を受けた鉄筋コンクリート部材の構造特性に関する国内外の構造実験事例を3例程度調査し、知見を整理した。なお、対象とする構造実験が加熱中または加熱後の鉄筋コンクリート部材を対象とし、変形特性、耐力などについて整理した。その結果、300℃までの加熱条件下での鉄筋コンクリート部材の終局強度に与える温度影響は、材料実験強度のそれと比べると小さい実験結果となっている知見が多いことが分かった。

4.3.2 温度影響を受けた構造実験のシミュレーション解析

上記4.3.1の調査等により収集した情報に基づいて、文献に示されている構造実験のシミュレーション解析から有限要素法解析を含む2種類程度の解析手法を調査し、各解析手法の詳細な内容について検討を行った。具体的には、構造解析は一般的には有限要素法(FEM)で実施されることが多い。その中でも商用の有限要素ソフトウェア「Abaqus」は原子力分野においても特に広く使用されているソフトウェアであるため、調査の対象とした。また、同じFEMでも陽解法の解析で使用されることが多いLS-DYNAに関する解析についても調査を行った。FEM以外の手法として、RBSM (Rigid Body - Spring Model, 剛体ばねモデル) を用いた温度応力解析についても調査を行った。

また、文献に示されているシミュレーション解析と実験結果との比較結果について考察を行い、その結果を論文リスト表にコメントとして記載している。

4.4 材料および構造実験の検討

4.4.1 材料実験

4.3.1 で調査・収集した情報に基づき、既往知見で不足あるいは拡充すべき温度影響（熱応力も含む）を受けるコンクリートの材料物性を評価する次の 3 つの材料実験計画を作成した。

①シリンダー試験

実機コンクリート単体材料としての高温時損傷評価モデルへ適用することを目的とした材料実験計画を作成した。

②実大ブロック試験

実機での構成材料（鉄筋及びライナの存在）における実機コンクリート単体材料の高温時損傷評価モデルへ適用することを目的とした材料実験計画を作成した。

③RC 供試体両引き試験

鉄筋コンクリート材料としての高温時損傷評価モデル（ひび割れたコンクリートと鉄筋との間の引張応力分担（応力再配分）特性に関する高温時損傷評価モデル）へ適用することを目的とした材料実験計画を作成した。ただし、この材料実験に関しては、実施例が極めて少なく、熱ひずみによる初期ひび割れの影響を受けやすいために、試験方法に関する更なる検討を実施することが望ましいこととした。

なお、実験計画には供試体サイズ、加熱温度、加熱温度持続時間、養生条件（水分逸散の有無）、鋼製ライナ、熱応力等の影響を試験項目に反映した。

4.4.2 構造実験

4.3.1 で調査・収集した情報に基づき、次に示す、既往知見で不足あるいは拡充すべき温度影響（熱応力も含む）を受ける鉄筋コンクリート部材の構造実験の実験方法（実験対象部位、載荷方法等）を検討した。

・円筒壁水平加力試験

材料実験で得られる材料レベルの知見を構造部材としての損傷進展評価モデルへ拡張するために、実機 RC 部材の高温時構造特性（円筒形状、鉄筋比、シアスパン比、軸応力度、損傷モード等）を反映した縮小試験計画を作成した。

4.5 解析検討

4.3.2 で調査・収集した情報に基づき、文献に示されている構造実験から 2 つの異なる鉄筋コンクリート部位（壁及び梁）を対象とした構造実験を選定し、市販解析コード（3次元有限要素法）「Abaqus」を使用してシミュレーション解析を行った。文献調査結果から解析

結果への影響が大きいと判断できたモデル化等について、その影響度合いを感度解析により確認し、高温時の RC 部材耐力に与える影響が大きいパラメータとして、コンクリート-鉄筋間の相互作用 (テンションスティフニング特性) に関連するパラメータであることが分かった。

4.6 今後の技術課題

ここでは、地震随伴事象に対するコンクリート製原子炉格納容器の要求性能を定量化するために重要である、今後の技術課題を示す。

まず、3.5 において、既往の高温時 RC 梁試験を対象にシミュレーション解析及び感度解析を実施し、高温時の RC 部材耐力に与える影響が大きいパラメータとして、コンクリート-鉄筋間の相互作用 (テンションスティフニング特性) に関連するパラメータが抽出された。その重要性の観点も踏まえて、3.4.1(3)では高温時のテンションスティフニング特性を定量化するための鉄筋コンクリート供試体両引き試験を提案しているが、留意事項で示したように解決すべき技術課題が残されている。さらに、3.4.1(3)で示した実験計画に関する留意事項に示した対応案だけではなく、詳細な計測データを活用してコンクリート-鉄筋間の相互作用モデルを高度化していくことも今後の技術課題の対応案としては考えられる。

次に、付録 2 に示しているが、3.4 の材料及び構造実験の検討内容に関して、有識者から参考意見を頂戴している。参考意見の中には、今後の技術課題が含まれているために、継続的な最新知見調査を含めた高度化検討を今後実施していくことが望ましい。

最後に、重大事故及び地震時 (本震及び余震) における実機コンクリート製原子炉格納容器の性能を定量化するための重要な課題及びそれらの課題に対する対応案の例を次に示す。

(1) 評価クライテリアの定量化

①概要

要求性能に対応する評価クライテリアの設定に際しては、多数の事象進展パターン (シナリオ) をグルーピングすることで、重大事故及び地震時 (本震及び余震) における実機コンクリート製原子炉格納容器の要求性能を分類・整理することが重要である。次に、その分類化した要求性能を満足しているか否かの評価クライテリアを定量化する必要があるが、この業務で提案した実験成果及び妥当性確認解析のみでは外挿性の観点からは不十分である。従って、実機数値実験等を実施し、評価クライテリア設定のための定量的な根拠データを蓄積していくことが望ましいと考えられる。

②対応案の例

重大事故と地震との重畳シナリオに対する評価指標の候補案を次に示す。

- ②-1 大規模破損に直結する原子炉建屋の全体損傷（崩壊相当）
 - ②-1A 終局強度（最大耐力）
 - ②-1B 終局変形（進行性破壊を防止する観点で、最大耐力以降の変形能又は靱性能）
- ②-2 FP大量放出につながるCCV及び原子炉建屋の局部損傷
 - ②-2A コンクリートひび割れ分布（表面及び内部）
 - ②-2B コンクリート圧縮主ひずみ分布（表面及び内部）
 - ②-2C コンクリートせん断主ひずみ分布（表面及び内部）
 - ②-2D 鉄筋ひずみ分布
 - その他 ライナ構成材料のひずみ分布

各評価指標に対して、重大事故と地震との重畳シナリオに対する評価クライテリアを定量化する必要があるが、②-2 に関しては、全体損傷と関連する局部損傷グレードを階層化することに加えて、各損傷グレードにおいて評価クライテリアを定量化する必要がある。

一般的に、熱応力は温度変化に伴い発生する『自己ひずみ』に起因しており、拘束条件に左右される応力である。従って、熱応力は、部材が塑性化しその時点での剛性が低下するに従って低下し、終局状態においては無視できると考えられる^[4-1]。例えば、青山ら^[4-2]は『自己ひずみ』を持つ鉄筋コンクリートラーメンに関する一連の破壊実験を行い、ラーメンの剛性、降伏点、終局耐力等に関する影響を報告している。初期応力として曲げひび割れが発生するレベルから曲げ降伏が発生するレベルまでの応力を与えた結果、『自己ひずみ』が大きい程、ラーメンの剛性が低くなり、明瞭な降伏点が見られなくなることから振動特性に影響があるとしている。しかし、どのケースにおいても終局耐力は『自己ひずみ』がない場合と変わらず、終局強度設計を行う場合には『自己ひずみ』を無視できるとしている。秋野ら^[4-3]は、コンクリート製原子炉格納容器の設計法のうち、温度荷重に対する設計に関する留意事項を報告している。これによると、前述に示した知見と同様に、温度荷重による熱応力は自己限定的応力（前述の『自己ひずみ』に対応）であり、部材の塑性化に伴って減少する性質の応力であるとし、実験結果によって温度負荷時の構造耐力は温度なしの場合と変わらないことを確かめ、終局耐力評価において熱応力は基本的に無視してよいとしている。

以上の知見を踏まえると、②-1A の評価指標に関しては、この事業で計画している構造実験（事前損傷の有無を含む）で熱応力の影響がないことを再確認するとともに、実機拘束条件を反映した数値実験においても熱応力の影響がないことを確認しておくことが重要である。一方、②-1B 及び②-2 の評価指標に関しては、この事業で計画している構造実験（事前損傷の有無を含む）及び実機拘束条件を反映した数値実験の両者の結果を踏まえて、評価手法及び評価クライテリアをセットで定量的に提案する必要があると考えられる。

なお、上記に示す実機拘束条件を反映した数値実験は、実機の設計及び評価仕様を可能な限り反映した現実的な地盤－建屋連成系モデル（詳細モデル）を用いた数値実験とすることが望ましい。なお、現状の実機審査に資する観点から、前述の詳細モデルよりも簡易な設計モデルの保守性を確認するプロセスを取り入れることも可能である。

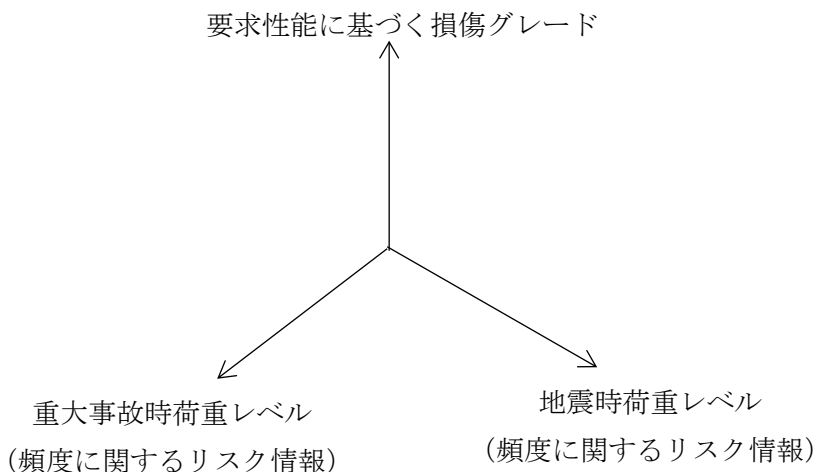
(2) 頻度（リスク）情報を活用した重大事故時荷重と地震時荷重との組合せ

①概要

上記に示した評価クライテリアとも対応するが、重大事故の時間推移を予測する以上に、本震及び余震が発生する時間推移を概算でも予測することはほぼ不可能であろう。従って、多数の事象進展パターン（シナリオ）のグルーピング化を踏まえた上で、頻度（リスク）情報を活用して、重大事故時荷重と地震時荷重との組合せを定量的に検討していくことが現実的であると考えられる。

②対応案の例

頻度（リスク）情報を活用した重大事故時荷重と地震時荷重との組合せ手法に関しては、(1)で示した評価手法及び評価クライテリアごとに検討していくことが望ましい。その際には、下図に示すような 3 次元評価軸に対する荷重組合せ手法マトリクス（荷重係数及び耐力係数を含む）を用いて整理することで、(1)で示した評価手法及び評価クライテリアの適用範囲を明示することができると考えられる。



なお、設計用事故時荷重に関しても、基本的には同様な考え方が適用できると考えられる。その場合には、決定論的で基本的には無相関な地震と事故との荷重組合せが炉心損傷防止のための設計重畳事象になるであろうと想定される。従って、事故進展等に係る不確実さに起因する保守性を、専門家意見等を活用することによって、どの程度定量的に担保できるのかが、深層防護の観点からは重要となるであろう。

【4.の参考文献】

- [4-1] 中島秀雄：建築物の構造設計における温度荷重と荷重組合せに関する研究、東京大学大学院工学系研究科建築学専攻博士論文、2016年2月
- [4-2] 青山博之：自己歪を持つ鉄筋コンクリートラーメンの終局耐力、日本建築学会論文報告集、第63号、1959年10月
- [4-3] 秋野金次、渡部征男：コンクリート製原子炉格納容器の設計法、コンクリート工学、Vol.19、No.7、pp.79～97、1981

5. あとがき

令和3年度は本事業の初年度であることから、高温時における原子炉建屋の地震時応答挙動について、既往知見の収集、材料・構造実験の調査、解析手法の調査等を行い、実験・解析による応答挙動の把握のための具体的な計画等の検討を実施した。

本年度の成果のみならず、今後の技術課題を含めてまとめているので、次年度以降の本事業の継続的な進展・高度化に向けて、この報告書の成果が活用されることが期待される。

付録 1 材料の各種詳細分析方法について

本資料では、以下の分析方法に関して、概要を示す。

- ①粉末 X 線回折 (XRD : X-ray Diffraction)
- ②蛍光 X 線分析 (XRF : X-ray fluorescence analysis)
- ③熱重量測定/示差熱分析 (TG/DTA : Thermogravimetry/Differential Thermal Analysis)

付図 1-1 に X 線と物質の相互作用を利用した分析方法の概要を示す。この中から、X 線回折と蛍光 X 線分析について、以下に概要を示す。

著作権者から利用許諾を得ていないため非表示

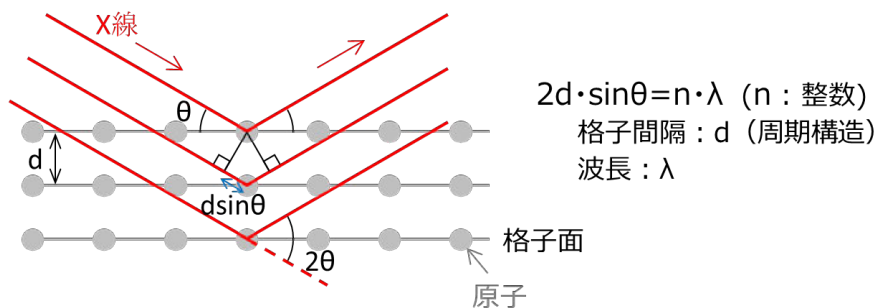


付図 1-1 X 線と物質の相互作用を利用した分析方法

① 粉末 X 線回折 (XRD : X-ray Diffraction)

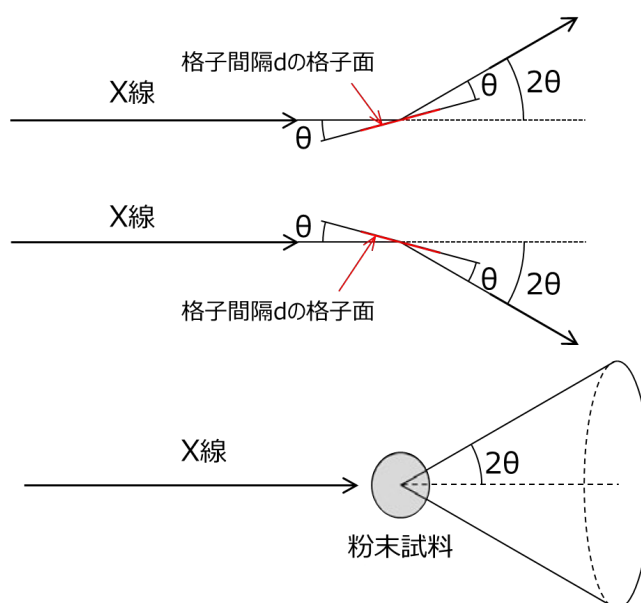
粉末 X 線回折は、サンプルに含まれる結晶構造を検出するための方法であり、結晶構造を持たないアモルファスの検出はできない。

付図 1-2 にブラッグ (Bragg) の法則について示す。間隔 d の周期構造に波長 λ の X 線を入射すると、電子の振動により球面状の散乱波 (新たな電磁波) が発生する。この散乱波が回折条件を満たすと、すなわち、X 線の干渉がおきて、光路差が波長の整数倍になった場合に、回折線が現れる。



付図 1-2 ブラッグ (Bragg) の法則

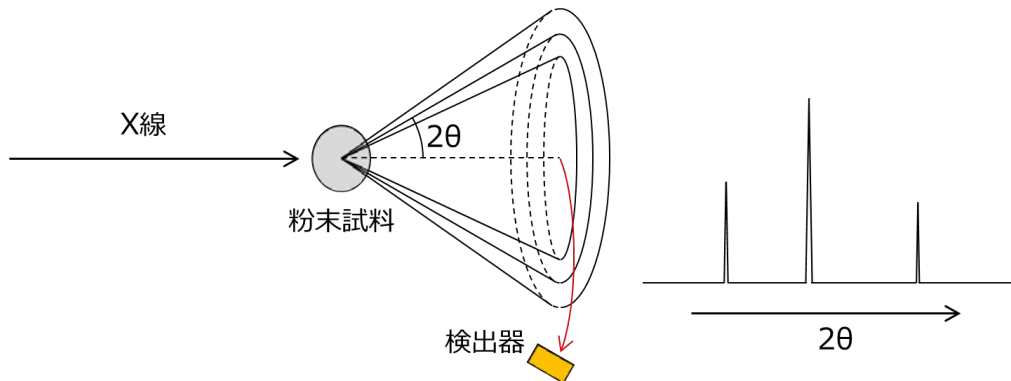
粉末サンプルを用いる場合は、結晶の粉末がランダムに存在すると考える。間隔 d の周期構造に単波長 λ の X 線を入射すると、無数の粉末のうちほんのわずかなものだけが λ と d に対して回折条件を満たして回折線が発生する。そのうち、ある粉末は上方に回折線を出し、別の粉末は下方に回折線を出す。また、紙面に垂直方向に回折線を出す粉末もある。重要なのは、どの場合でも、回折光は入射 X 線から見て 2θ の角度をなす方向に回折されることである。粉末の方向が完全にランダムでかつ粉末の粒の数が十分多い粉末試料であれば、個々の回折をすべて足し合わせると、回折線は頂角が 2θ の円錐状に広がる。従って、結晶の向こう側にスクリーンを置けば、円錐状の回折パターンが得られる。以上の状況を付図 1-3 に示す。



付図 1-3 粉末サンプルの場合の回折線パターン

粉体サンプルの場合、いろいろな d を持つ周期構造があるため、それぞれの d に応じて、複数の円錐状の回折線が生じる。それらはスクリーン上では同心円状のパターン（デバイー・シェラー環）となる。X 線検出機をスクリーンの中心にあたる位置から徐々に動かしていけば、検出器がデバイー・シェラー環を横切るときに回折 X 線が検出される。このようにして、Intensity vs. 2θ のスペクトルを得ることができる。また、ピーク位置の θ の値と、ブラッグ条件を用いれば結晶の周期構造 d を求めることができる。

付図 1-4 に XRD による分析結果のイメージを示す。付図 1-5 に回折パターンと結晶性について示す。



付図 1-4 XRD による分析結果のイメージ

著作権者から利用許諾を得ていないため非表示

単結晶領域

多結晶領域

非晶質領域

付図 1-5 回折パターンと結晶性

https://www.ube-ind.co.jp/usal/documents/m231_143.htm

② 蛍光 X 線分析 (XRF : X-ray fluorescence analysis)

物質に一定以上のエネルギーを持つ X 線を照射すると、物質中の原子の内殻電子が励起され、それによって生じた空孔 (ホール) に外殻電子が移る際に内殻と外殻のエネルギー差に対応した X 線が放出され、この X 線を蛍光 X 線と呼ぶ。付図 1-6 に蛍光 X 線の発生のイメージを示す。

内殻と外殻のエネルギー差は元素ごとに固有であり、蛍光 X 線のエネルギーは元素ごとに固有である。また、原子核に近い殻ほどエネルギーが高く、「K 殻>L 殻>M 殻」となっており、電子が L 殻から K 殻へ遷移する時に放出される蛍光 X 線を K α 線、M 殻から K 殻へ遷移する時に放出される蛍光 X 線を K β 線と呼ぶ。

蛍光 X 線のエネルギーが元素ごとに固有のものであることから、対象試料の蛍光スペクトルを分析することにより構成元素の分析が可能となる。また、スペクトルの強度を測定すれば、対象試料中の特定元素の濃度を評価することも可能である。

著作権者から利用許諾を得ていないため非表示



付図 1-6 蛍光 X 線の発生のイメージ

<https://www.matsusada.co.jp/column/words-xfz.html>

分析試料の準備方法としては、粉末試料をガラスビード化するガラスビード法と加圧成型する粉末加圧成型法とある。均質なサンプルという点で、ガラスビード法の精度が高いが、高温加熱処理が必要なため、揮発性の高い成分を含む場合は不向きである。付図 1-7 に蛍光 X 線分析で用いるサンプルイメージを示す。

著作権者から利用許諾を得ていないため非表示



ガラスビードの外観

粉末加圧成型試料の外観

付図 1-7 蛍光 X 線分析で用いるサンプル

③ 熱重量測定/示差熱分析 (TG/DTA : Thermogravimetry/Differential Thermal Analysis)

TG/DTA とは、試料及び基準物質の温度をプログラムに従って変化させながら、試料の重量変化測定(TG)及び試料と基準物質の温度差を測定する示差熱測定(DTA)を同時に行う手法であり、試料の水分量、灰分量測定や分解、酸化、耐熱性などの物性評価が可能である。

著作権者から利用許諾を得ていないため非表示

付図 1-8 TG 曲線

付図 1-9 DTA 曲線

TG により、試料から離脱、分解気化した成分の減少量、試料への吸着や酸化等で起こる重量の増加量、また、分解温度や酸化温度の評価が可能である。

DTA により、DTA 曲線からは、生じた反応が発熱なのか吸熱なのかを評価することにより、反応の由来を推定できる。また TG と合わせて、試料の変化（現象）を詳しく解析することができる。

付表 1-1 に、TG/DTA 曲線モデルと熱変化について示す。

付表 1-1 TG/DTA 曲線モデルと熱変化

著作権者から利用許諾を得ていないため非表示

付録 2 本事業に関する有識者からの参考意見

(1) 東京大学丸山一平教授からの参考意見をお伺いする会

日 時：2022年3月9日（水） 10:00～11:30

場 所：WEB会議（Teams）

議 事：

1. 事業の概要について
2. 材料及び構造実験の計画について
3. 質疑・討論

出席者（敬称略）：

東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 丸山一平教授
鹿島建設(株)：紺谷，美原，澤田，稲葉，片山（記）

配布資料：

令和3年度報告書ドラフト「3.4 材料及び構造実験の検討」

議事概要：

1. 事業の概要について
 - ・鹿島建設より本事業の目的及び令和3年度の実施内容について概要説明を行った。
2. 材料及び構造実験の計画について
 - 2.1 材料実験の「(1) シリンダー試験」について
 - ・加熱による体積変化や初期ひずみを把握するため、測定項目に線膨張係数を加えると良い。また、モルタル及び骨材のみの線膨張係数についても別途試験しておくことで、体積変化の要因を分析することが出来る。（丸山教授）
 - ・XRD, TG/DTA の分析に加えて、加熱後の試験体にどのようなひび割れや変質が生じているかを把握するために、X線CT、SEM（Scanning Electron Microscope）マッピングまたは顕微鏡写真の撮影などを実施することを検討してはどうか。（丸山教授）
 - ・割裂試験については200mmではなく、長さ100mmの試験体を用いても良く、その方が精度の良い試験結果が得られると考えられる。（丸山教授）
 - ・試験体の養生について、20℃で28日封緘養生してから6ヶ月、もしくは12ヶ月の30℃封緘養生を実施した方が良い。（丸山教授）

2.2 材料実験の「(2) 実大ブロック試験」について

- ・試験体の拘束を加熱面側のみとしているが、可能であれば、熱だけではなく力学的な境界条件を実機に近づけることを考慮して加熱面の反対側も拘束すると、加熱による境界面方向の広がりを抑えることができ、熱-構造の試験として実施出来るのではないか。さらに拘束のあり／なしの2水準の実験を出来れば、構造的にも様々な分析が出来ると思う。
(丸山教授)

2.3 材料実験の「(3) RC 供試体両引き試験」について

- ・加熱による初期状態を確認するために、コンクリートのみの試験も実施をするべき。
(丸山教授)
- ・鉄筋のひずみ計測に光ファイバーを用いてみてはどうか。(丸山教授)

2.4 構造実験について

- ・画像相関法などで面的に変形を計測出来ると、その後のシミュレーション解析にも資するデータが得られる。(丸山教授)

3. 打ち合わせ後コメント

- ・全般として、温度に対して弾性的挙動としては線膨張の問題が生じるが、セメントペーストについては脱水して収縮する。つまり、膨張後の収縮、さらに温度低下後の収縮によるダメージの増大という現象があるため、それを念頭に議論することが大事である。(丸山教授)
- ・FA コンクリートでは、FA とセメントのポゾラン反応によってできた C-A-S-H の Ca/Si 比が小さいため、密度が低く、低い温度では強度がしやすいものの、高温・加熱・脱水後の収縮後では、強度が大幅に下る可能性がある。これは、低密度 C-A-S-H なので、脱水後、普通のセメントの Ca/Si 比の大きな C-S-H より大きく収縮するためである。この基礎的なデータは、ペーストで取得するとよい。(丸山教授)
- ・2.2 の材料実験の「(2) 実大ブロック試験」について、水分移動とともに線膨張後、収縮挙動があるはずである。これらがどういったタイミングで生じるかは温度解析上、ダメージ評価上も重要である。(丸山教授)
- ・2.2 の材料実験の「(2) 実大ブロック試験」について、試験後には、ドライコアによる含水率評価を行うということであったが、ダメージ評価 (SEM、X-CT による細孔量、ひび割れの評価) が大事になる。マトリックスの強度自体を議論するのであれば、マイクロインデンテーションを行い、ペースト部分の強度が、はじめ、加熱後、加熱・脱水後、でどうなるかを確認しておくといよい。(丸山教授)
- ・実機への適用なども考えると、載荷前に衝撃弾性波などによる非破壊検査で得られるデータを取得することにより、適用範囲が広がる可能性がある。弾性波の伝搬速度や超音波伝搬速度を用いて、全体剛性やダメージの程度を一定程度類推するのであれば、浜岡プロジェクトなどとも将来的に結びつけることができる。これは、先のスキャナによる変形計測なども、実機との関係性を考える上でも興味深いテーマになる。(丸山教授)

(2) 東京大学楠浩一教授からの参考意見をお伺いする会（速報）

日 時：2022年3月18日（金） 10:00～11:30

場 所：WEB会議（Teams）

議 事：

1. 事業の概要について
2. 材料及び構造実験の計画について
3. 質疑・討論

出席者（敬称略）：

東京大学地震研究所災害科学系研究分野 楠浩一教授

鹿島建設(株)：紺谷，美原，稲葉，片山（記）

配布資料：

令和3年度報告書ドラフト「3.4 材料及び構造実験の検討」

議事概要：

1. 事業の概要について
 - ・鹿島建設より本事業の目的及び令和3年度の実施内容について概要説明を行った。
2. 材料及び構造実験の計画について
 - 2.1 材料実験の「(1) シリンダー試験」について
 - ・材料試験において、175℃及び200℃を温度の水準としているが、温度を刻みすぎると強度が逆転する可能性がありし、結果の整理が難しくなる。この2水準は必要か。（楠教授）
 - 2.2 材料実験の「(2) 実大ブロック試験」について
 - ・コメントなし。
 - 2.3 材料実験の「(3) RC 供試体両引き試験」について
 - ・RC 供試体両引き試験は、コンクリートと鉄筋の付着を求めるためによく使われる試験であり、例として朴・兼松・野口（2007）「劣化した鉄筋コンクリート造建築物用断面修復材の付着性に関する研究」でも試験を実施している。（楠教授）
 - ・クラックを制御するために、断面欠損を設ける方法もある。（楠教授）
 - ・テンションスティフニングを把握するための試験としては、玉井らの実験と同じ方法の高温条件下の試験を実施する方法もある。（楠教授）
 - ・コンクリートを高温にすると、ひび割れが複数発生するため、コンクリートにプレストレスを入れておくことで、ひび割れを制限する方法もある。ただ、コンクリートと鉄筋との相互関係が実際と異なる状態になる。（楠教授）
 - ・高温の試験結果の解釈について、常温の結果やシリンダー試験の結果からの推定などをするとよい。（楠教授）

2.4 構造実験について

- 事前損傷のせん断ひずみを 1000μ としている根拠が弱いため、この結果をどのように説明するかが難しいと思う。可能であれば、設計時のせん断ひずみである 2000μ なども試験できるとよい。(楠教授)
- 事前に解析を行い、せん断ひずみ 1000μ の事前損傷では、事前損傷なしと差がない場合は、試験のばらつきにより強度が増す可能性もあるため、事前損傷のせん断ひずみを 2000μ として試験を実施するのもよい。(楠教授)

付録3 用語説明

①テンションステイフニング効果（出雲らのモデルに関する係数 c ）：

コンクリートは単体では、一度引張強度に達しクラックが発生すればそれ以降引張力を負担することは出来ない。しかし、異形鉄筋と一体となると、ある箇所に引張りによりコンクリート部分にクラックが入った後もクラック間に残ったコンクリートは鉄筋の節を介して付着により引張力を負担し続ける。そのため、鉄筋コンクリートという複合材料としてはコンクリート引張強度に達した後も鉄筋の単体材料として以上に引張力を負担することとなる。このことをテンションステイフニング効果と呼ぶ。FEM 等による巨視的な鉄筋コンクリートの解析では、鉄筋コンクリートの両引き試験等から得られた鉄筋コンクリートのトータルの負担荷重から鉄筋の負担荷重分を引き算した見掛け上のコンクリートの負担荷重を応力度に換算したものをコンクリートの引張側の一軸応力-ひずみ関係として扱うのが一般的である（図-1）。出雲ら*は鉄筋コンクリートの両引き試験の結果を基に、テンションステイフニング効果を考慮したコンクリートの引張側応力-ひずみ関係を、引張強度 f_t と引張り強度時ひずみ ε_{cr} を用いて以下のような式でモデル化している。

$$\sigma_t/f_t = (\varepsilon_{cr}/\varepsilon_t)^c$$

式中の c は鉄筋形状等による付着性状を考慮するための係数であり、 c の値が大きいほど引張強度以後に負担可能な応力が少なくなり、テンションステイフニング効果が小さいということになる。なお、出雲らの論文では異形鉄筋が用いられる通常の場合には $c=0.4$ とすることを提案している。

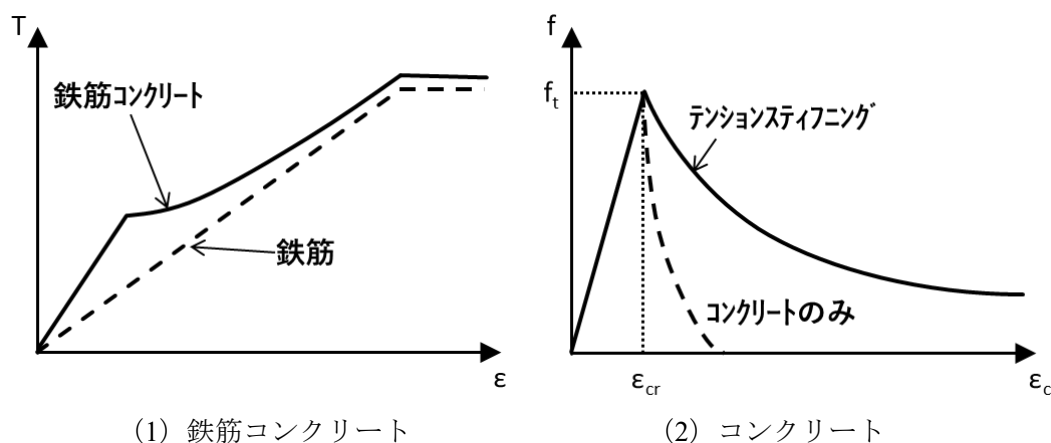


図-1 テンションステイフニング効果を考慮した FEM モデルの応力ひずみ関係イメージ

* 出雲, 島, 岡村: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学, No.87.8-1, Vol.25, No.9, 1987.9

②ダイラタンシー効果（膨張角 ϕ ）：

土や砂の様な粒状体の場合、せん断変形に伴って体積膨張が生じるが、このことをダイラタンシー（dilatancy）効果と呼ぶ。コンクリートでも同様の効果が確認出来、塑性化後、クラックの噛み合い（inter-locking）によりせん断変形の進行とともに体積膨張が生じる（図-2）。Abaqus コンクリート塑性損傷論モデルでは塑性化した材がせん断変形をする際の体積膨張を膨張角（dilation angle）と呼ばれるパラメータによりコントロールしている。膨張角 ϕ が大きいほど塑性変形中のせん断変形に対する体積膨張が大きくなり、部材としてはせん断変形に対する抵抗が増す傾向となる。

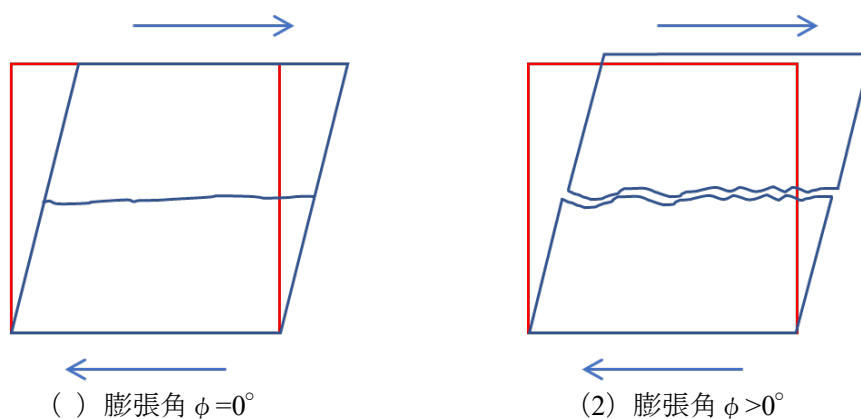


図-2 ダイラタンシー効果の概念図