

JASMiRT 第2回国内WS

外部ハザードに対するコンクリート材料の開発

2018年 8月 23日

三菱重工業

山本知史

日立GEニュークリア・エナジー

若杉健一

東芝エネルギーシステムズ

高橋宗孝

概要

- 平成25年に施行された国の新規制基準では、原子力施設に想定する外部ハザードの種類は多くなり、またその大きさは増大傾向にある
- 外部ハザードに対して有効な対策の1つである壁厚の増加は、逆にコンクリートの物量（重量）増加による耐震性の低下等に繋がる可能性がある
- 本研究*は、建屋の安全性向上のため、コンクリートの物量を抑えつつ外部ハザードにも抵抗できる建屋を目指すものであり、原子力施設では採用実績のない高強度等のコンクリート材料（以下、「新材料」という）の適用について平成27年度（2015年度）から継続して検討中である
- 本発表は、平成29年度までに検討した建屋に適用する新材料の有効性およびその基本特性、構造壁として適用する際の設計コンセプトについて纏めたものである

*. 本研究は、平成27～28年度経済産業省「発電用原子炉等安全対策高度化技術基盤整備事業」及び平成29年度経済産業省「原子力の安全性向上に資する共通基盤整備のための技術開発事業」として実施している

2. 開発目的と工程

(1) 目的

- 新規規制基準で強化された外部ハザード (図1)に対応するため、新材料・新構造を適用し、経済合理性にも優れた建屋構造を実現することを目的とする

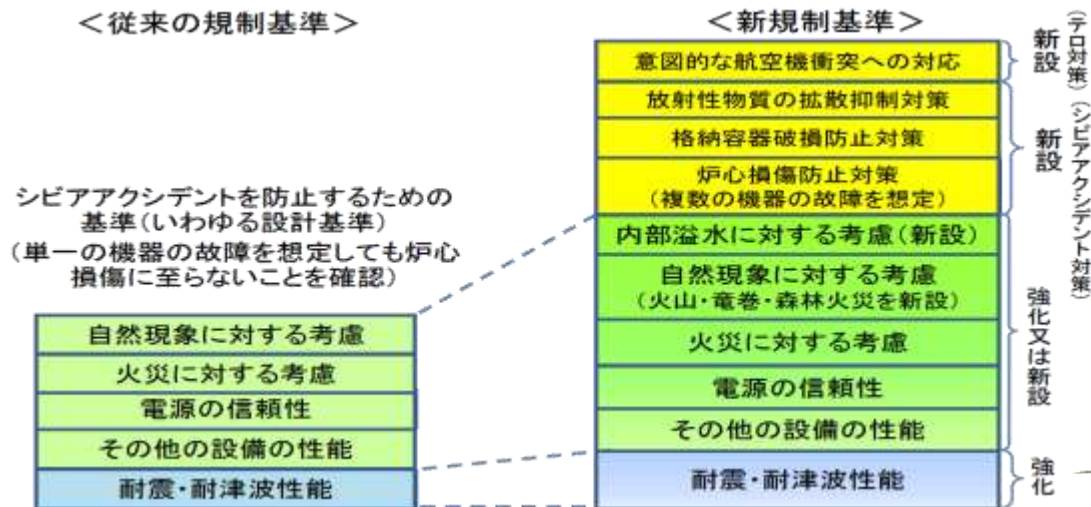


図1 新規規制基準で強化された外部ハザード

(2) 工程

- 2015年度から検討に着手し、建屋に新材料を適用した際の基本構造およびその有効性に対するフィジビリティスタディを経て、2017年度から実機展開のための実証試験等を実施中である

表1 開発工程

	2015	2016	2017	2018
マイルストーン	有効性確認		実証試験・設計手法構築	
1. 有効性検討	材料選定			
2. 基本特性試験		材料試験・施工性検討		
3. 実機の構造安全性検討 (詳細FEM解析)		原子炉建屋の耐震解析		
4. 実証試験			試験体製作	壁体試験
4.1 壁体試験				
4.2 機器定着部試験			基礎試験	健全性確認試験
4.3 施工性試験			施工性試験の検討	施工性試験
5. 設計手法の構築			設計手法の構築	
6. 有効性評価 (経済合理性を含む)				建屋規模・物量評価等

3. 建屋新材料の有効性と適用部位 (1/2)

(1) 原子炉建屋の要求性能に対応した新材料

- 新規制基準で考慮すべき外部ハザードのうち、建屋構造への影響が特に大きいのは、地震荷重、航空機の衝突時荷重である
- また、建屋の一部は原子力特有のものとして遮へい性能を有する必要がある
- 上記荷重及び性能に着目して高強度材料、遮へい性能に優れた新材料を表2の通り選定した

表2 原子炉建屋の要求性能と適用する新材料

部位	主な要求性能	適用する新材料	選定理由
屋根	耐衝撃性	UFC Fc 180N/mm ²	約5.5倍の圧縮強度や鋼繊維による粘り強さに期待
外壁	耐衝撃性	高強度コン (鋼繊維、有機繊維入り) Fc 150N/mm ²	約4.5倍の圧縮強度や鋼繊維による粘り強さに期待
耐震壁・床	耐震性	高強度コン(有機繊維入り) Fc 100N/mm ²	約3倍の圧縮強度に期待
遮へい壁・床	遮へい性	重量コン Fc 33N/mm ²	約1.6倍の密度に期待
非耐震壁・床	軽量化	軽量コン Fc 33N/mm ²	約0.85倍の密度(軽さ)に期待

(2) 新材料の原子炉建屋への適用例

- 新材料の配置例を図2に示す
- 新設建屋であれば、支配的な外部ハザード荷重に応じて新材料を配置することが可能である
- 一方、既設建屋は現実的な工事範囲が概ね外壁に限られることから、外壁は、普通コンクリートとの複合構造として新材料を適用する計画である

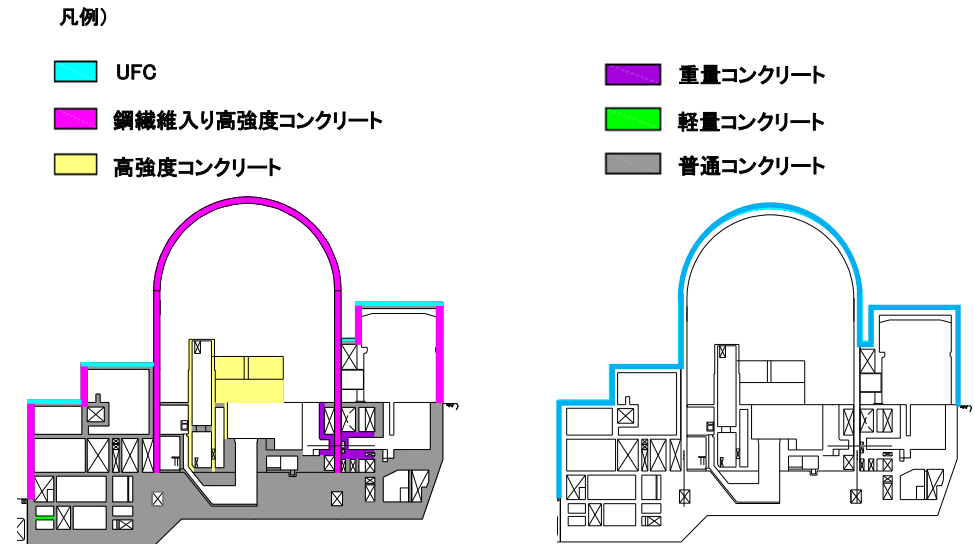


図2 PWR構造種別図(左;新設建屋、右;既設建屋)

3. 建屋新材料の有効性と適用部位 (2/2)

(3) 原子炉建屋の耐震安全性向上

- 新材料を適材適所に配置した新設建屋(前ページの図2)を仮定し、1000gal相当の地震動を入力とした地震応答解析結果を図5に示す
- 新材料を適用することにより従来のコンクリート造の建屋に対してせん断ひずみは約1/3.4となり、耐震安全性の向上及びコンクリート物量等が低減できる見通しが得られた

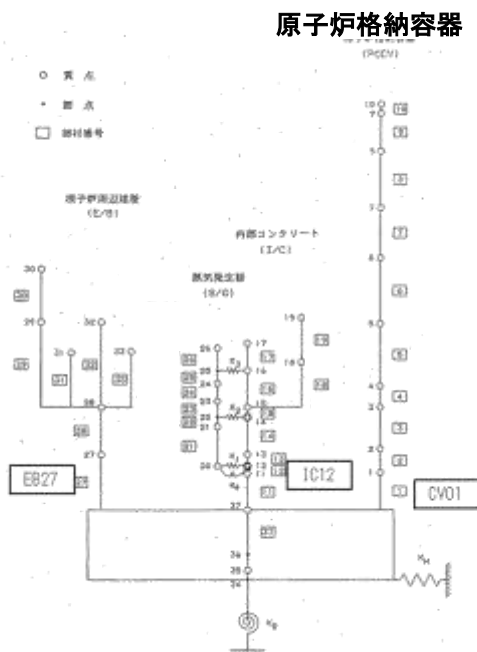


図3 耐震解析モデル

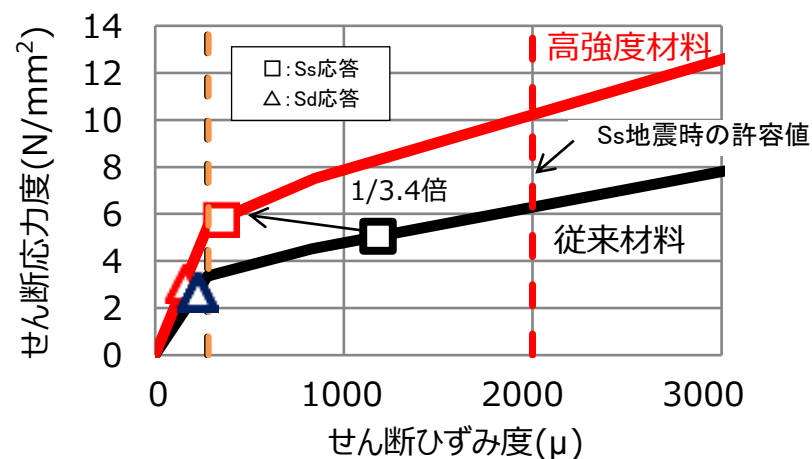


図5 新材料適用の耐震解析結果(CV01:脚部)

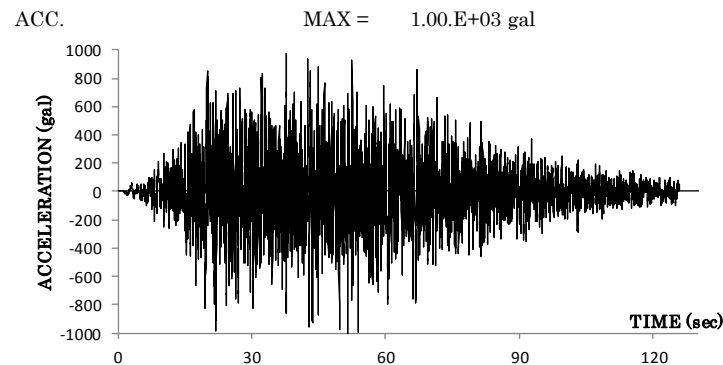


図4 耐震解析に用いた地震動 (1000gal相当)

4. 建屋新材料の基本特性試験計画

(1) 目的

- 新材料を適用した地震応答解析結果から、新材料の有効性が確認できたため、JIS規格に基づいて材料レベルの試験にて基本特性(特徴)を把握することとした
- 表3に試験対象とした新材料を示す

表3 試験材料

期待性能	コンクリート材料		圧縮強度※ (N/mm ²)
	(A)	(B)	
耐震	(A)	超高強度繊維補強コンクリート	180
	(B)-1	鋼繊維入り高強度コンクリート (有機繊維入り)	150
	(B)-2	高強度コンクリート (有機繊維入り)	100
遮蔽	(C)	重量コンクリート	33
軽量化	(D)	軽量コンクリート	33
比較用	(E)	普通コンクリート	33

(2) 試験内容

- 主に新材料の圧縮強度と特徴を把握するための硬化コンクリート試験を実施することとし、JIS規格に基づき試験内容を表4の通り整理した

表4 硬化コンクリート試験内容の整理結果

試験項目	試験内容	コンクリート材料					試験体形状
		(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	
圧縮強度試験	JIS A 1008	○	○	○	○	○	円柱 (φ100×H200)
静弾性係数試験	JIS A 1149	○	○	○	○	○	
乾燥単位容積質量試験	JASS 5N T-602	—	—	○	○	—	
割裂引張強度試験	JIS A 1113	○	○	△	△	○	(φ100×H100)
引張軟化特性試験	JCI-S-002-2003	○	(B)-1 ○	—	—	○	角柱 (100×100×400)
曲げ強度試験	JIS A 1106	○	○	○	○	—	
複合材曲げ強度試験	JIS A 1106	○	(B)-1 ○	—	—	○	

○: 基本特性試験で実証が必要
 △: 既往の知見で説明可能であり、試験まで必要ない
 —: 対象材料への要求性能に関係しない項目

- ✓ なお、既往の知見を有する材料及び要求性能に関係しない試験項目については対象外としている
- ✓ 次葉以降に基本特性試験結果を示す
 (その1) 重量・軽量コンクリート
 (その2) 高強度コンクリート・鋼繊維入り高強度コンクリート
 (その3) 超高強度繊維補強コンクリート(UFC)

5. 基本特性試験結果 (その1)

【重量コンクリート・軽量コンクリート】

(1) 圧縮強度 (図6,表5)

- 重量コンクリートおよび軽量コンクリートの圧縮強度は4週強度でそれぞれ55.6N/mm²,43.6N/mm²であり、普通コンクリートに対して約1.7倍、約1.3倍の強度を有していることを確認した
- なお、圧縮強度と曲げ強度の比は普通コンクリートと同様に約1/10であった

(2) 単位容積質量 (表6)

- 重量コンクリートおよび軽量コンクリートの特徴である単位容積質量は、材齢4週で以下の通りであり、建設時に使用するコンクリートに対して性能が高いことを確認した

重量コンクリート: 約1.6倍 (遮へいコンクリート2.15t/m³との比較)

軽量コンクリート: 約0.85倍 (普通コンクリート2.3/m³との比較)

表6 乾燥単位容積質量試験の結果

項目	材齢 (日)	試験結果	
		重量コン	軽量コン
気乾単位容積質量 (t/m ³)	28 (乾燥日数0日)	3.71 (3.0以上)	1.95 (1.85程度)
乾燥単位容積質量 (t/m ³)	65 (乾燥日数37日)	3.57	1.68

注)試験結果の()内は目標値を表す。

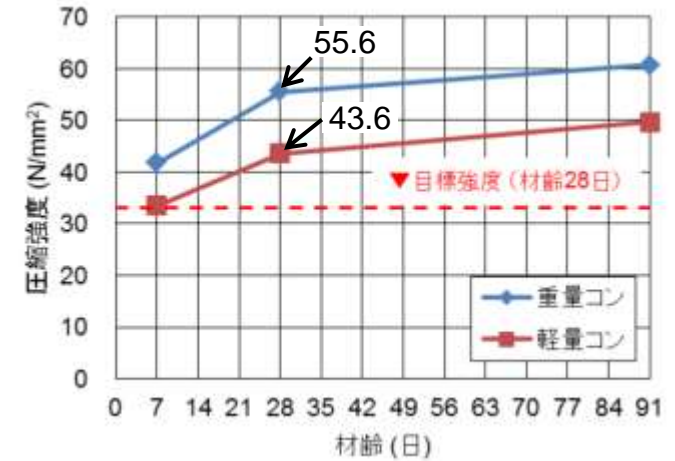


図6 圧縮強度と材齢の関係

表5 圧縮強度試験・静弾性係数試験・曲げ強度試験の結果

項目	材齢 (日)	試験結果	
		重量コン	軽量コン
圧縮強度 (N/mm ²)	7	41.8	33.5
	28	55.6(33)	43.6(33)
	91	60.7	49.7
ヤング係数 (×10 ³ N/mm ²)	7	37.5	16.9
	28	43.1	19.2
	91	44.1	20.7
曲げ強度 (N/mm ²)	28	5.44	3.96
	91	6.41	4.63

注)試験結果の()内は目標値を表す。

5. 基本特性試験結果 (その2)

【高強度コンクリート・鋼繊維入り高強度コンクリート】

(1) 試験体仕様

- 試験体はJIS規格に基づいて製作しているが、高強度コンクリートに混入される鋼繊維の量をパラメータに3体の試験体を製作した
 - No. 1試験体 (鋼繊維量: 0.5vol.%)
 - No. 2試験体 (鋼繊維量: 1.0vol.%)
 - No. 3試験体 (鋼繊維量: 0%)

(2) 圧縮特性 (図7)

- 3体の試験体による材齢4週の圧縮強度は、3体のうち簡易断熱養生をした2体が約160N/mm²で材齢13週では全ての試験体が約160N/mm²となった
- 高強度コンクリートは材齢初期から高い圧縮強度が発現し鋼繊維の量による強度差はなかった

(3) 割裂引張特性 (図8)

- 材齢13週の割裂引張試験からひび割れ発生強度は6.5~7.5N/mm²で、鋼繊維量が多い程大きくなった

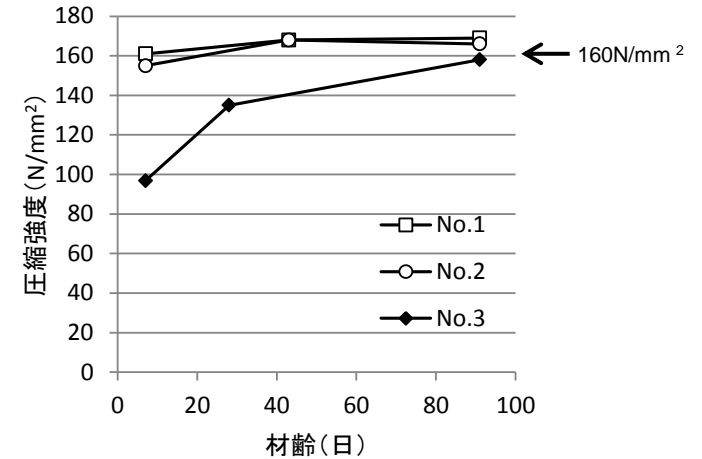


図7 材齢と圧縮強度の関係

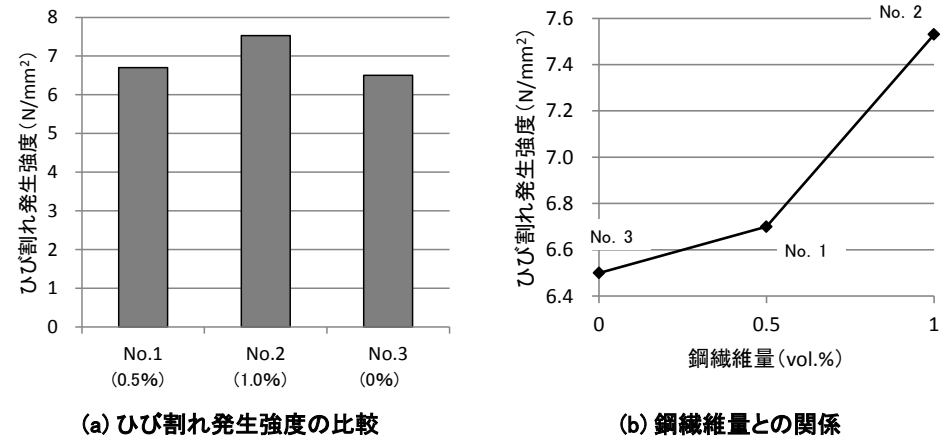


図8 割裂引張試験によるひび割れ発生強度

5. 基本特性試験結果 (その2)

【高強度コンクリート・鋼繊維入り高強度コンクリート】

(4) 曲げ特性(図9,図10)

- 鋼繊維が混入することによる曲げ特性を把握するため、材齢13週における3等分点曲げ試験を実施した
(試験体寸法: 100×100×400mm)
- 応力度-たわみ関係を図9に示すが、鋼繊維が混入する試験体(No.1, No.2)では、コンクリートにひび割れが発生した後で、鋼繊維が荷重を負担し、曲げ強度が上昇している
- ひび割れ発生時と最大荷重時の荷重からそれぞれ算出した曲げ強度を図10に示す
- ひび割れ発生時には鋼繊維量0.5%(No.1)と鋼繊維が入っていない(No.3)試験体の曲げ強度は概ね同等であるが、最大荷重時には鋼繊維量に比例して曲げ強度は増加する傾向であった

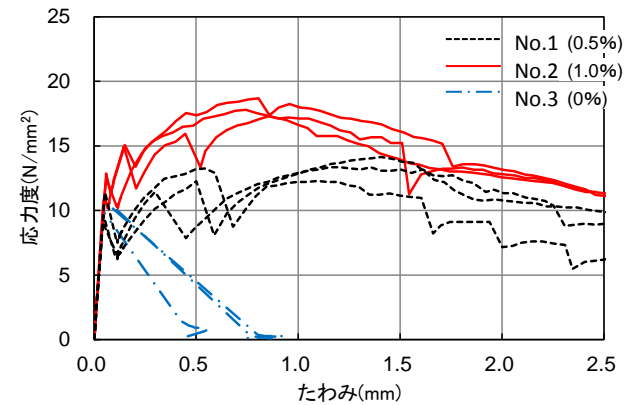
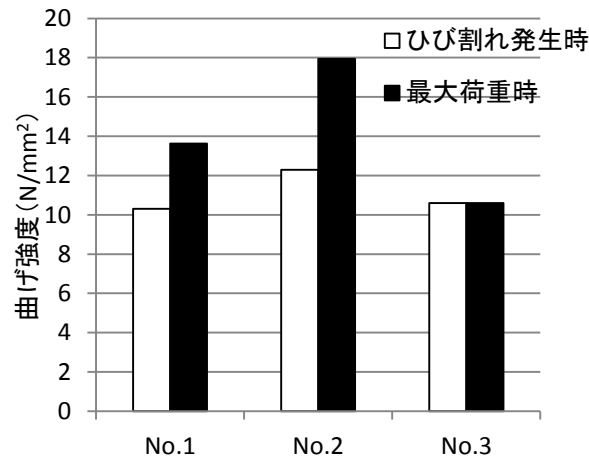
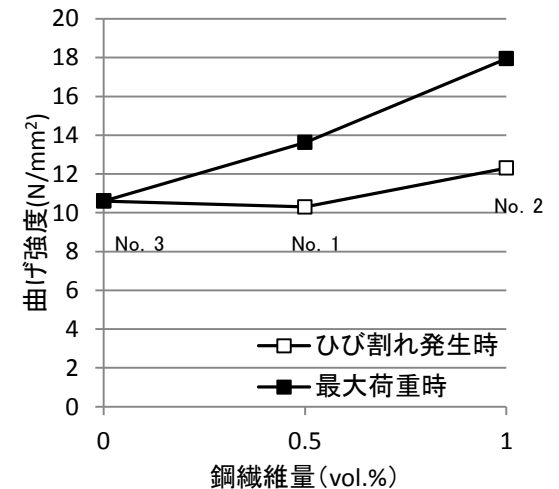


図9 3等分点曲げ試験の応力度-たわみ関係



(a) 曲げ強度の比較



(b) 鋼繊維量との関係

図10 曲げ強度(ひび割れ発生時と最大荷重時)

5. 基本特性試験結果 (その3)

【超高強度繊維補強コンクリート: UFC】

(1) UFCの性能

- 土木学会の指針*1によれば、UFCの基本的な性能は以下のように設定されている
 圧縮強度: 150N/mm^2 、ひび割れ発生強度: 4N/mm^2
 引張強度: 5N/mm^2 以上で繊維補強したセメント質複合材
 鋼繊維混入量: 2.0vol.%以上

(2) 圧縮特性(表7)

- 3体の試験体による材齢4週の平均圧縮強度は 169N/mm^2 であり13週では 187N/mm^2 まで上昇した (これは、普通コンクリートの5.5倍に相当する)

(3) 割裂引張特性(図11)

- 割裂引張試験から得られた応力-ひずみ関係から線形性がなくなった点をひび割れ発生強度と定義し、試験体3体の平均値は 9.84N/mm^2 であった
- UFCの特徴として、ひび割れ発生後の応力度は一定となるが、ひずみが $600\mu \sim 800\mu$ を越えると再び応力度が上昇する特性を有している

表7 圧縮・割裂引張試験結果一覧

材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)	ひび割れ発生強度 (N/mm^2)
7	143	48.1	-----
28	169	51.4	-----
91	187	51.9	9.84

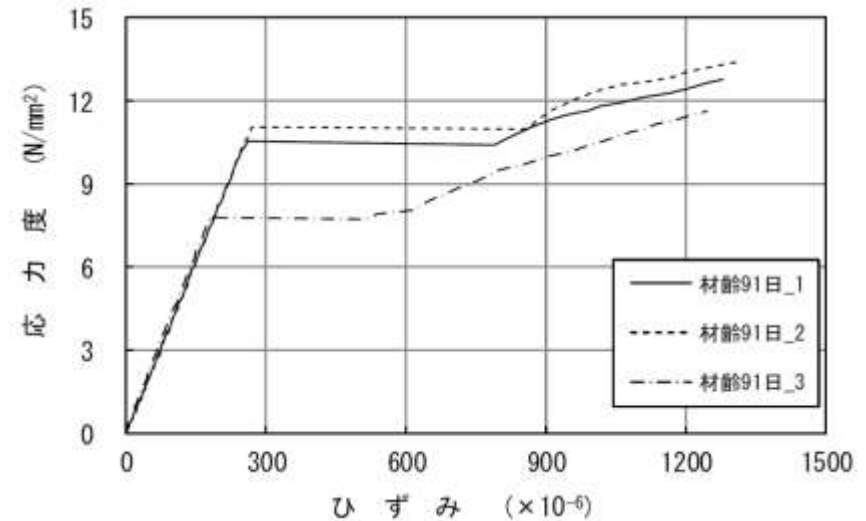


図11 応力度-ひずみ関係(割裂引張試験)

*1: 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)

5. 基本特性試験結果 (その3) 【超高強度繊維補強コンクリート: UFC】

(4) 曲げ特性(図12)

- UFCの曲げ特性を把握するため、図13に示すとおり、UFCと普通コンクリート(FC33)を組合せた2種類の複合材を用いて、曲げ試験を実施した
- 3等分点曲げ試験から得られた材齢13週での応力度-たわみ関係を図12に示すが、以下のような特性が得られた

UFC下面側: 19.1N/mm²(ひび割れ発生強度)

UFC上面側: 6.01N/mm²(同上)

- なお、UFCが下面側の場合はUFC単体の曲げ試験結果(21.2N/mm²)とほぼ同程度であった

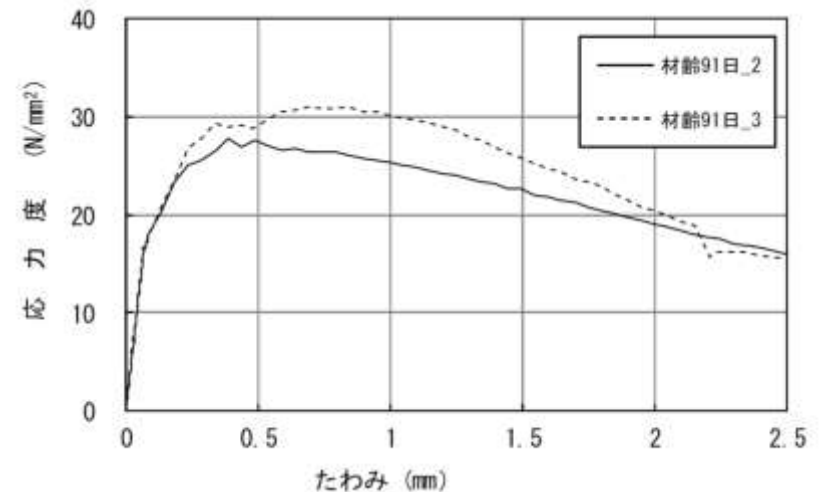


図12 曲げ試験の応力度 — たわみ関係

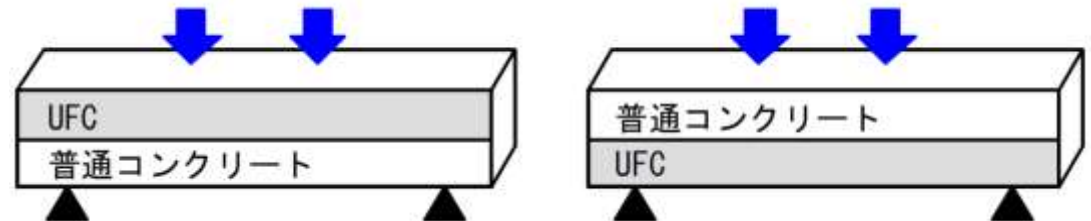


図13 複合体の曲げ試験方法

6. 新材料を用いた構造壁の設計コンセプト (1/2)

(1) 基本方針

- 新設建屋については、構造壁・床を新材料と鉄筋で構成し、外部ハザードの荷重を負担することを基本とする(図14)
- ただし、経済合理性の観点から、普通コンクリートとの合わせ材も考慮する
- 既設建屋は、構造壁・床の普通コンクリート面に新材料を増打ちした構造とすることを基本とする(図15)

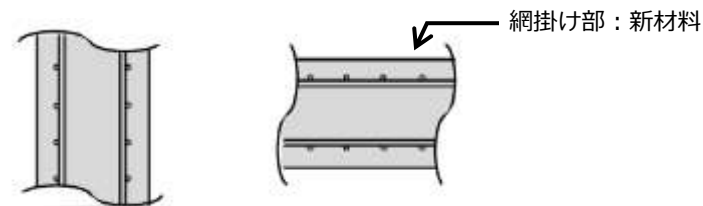


図14 新設構造(壁/スラブ)

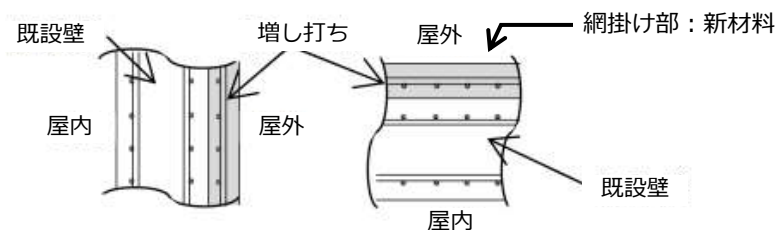


図15 増し打ちの既設RC構造(壁/スラブ)

(2) 復元力特性の評価法

- 新材料を適用した構造壁の多くは、復元力特性の評価法が確立されていない
- このため、実証試験として新材料を用いた壁体試験体に正負漸増の繰り返しせん断力を破断に至るまで載荷し、構造壁としての力学的特性を取得し、復元力特性を提案する予定である(図16)

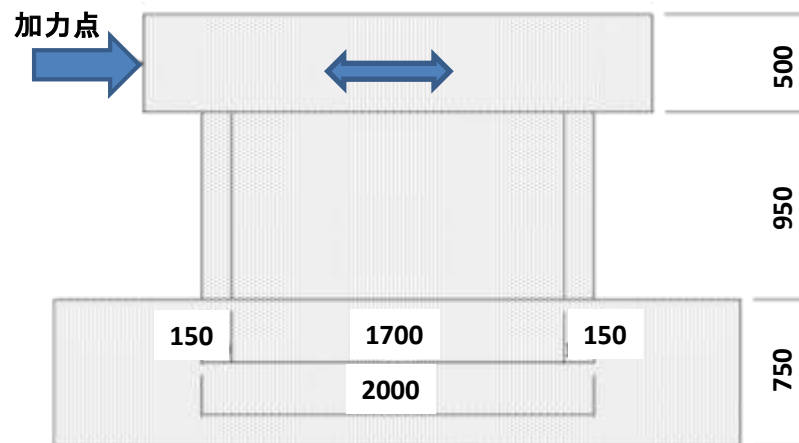


図16 壁体試験体(例)

6. 新材料を用いた構造壁の設計コンセプト (2/2)

(3) 復元力特性の設定方法 ($\tau - \gamma$ 特性 / $M - \phi$ 特性)

- 基本的な考え方はRC構造壁の評価式と同様と考えてJEAC4601*の評価法を参考にせん断と曲げの復元力特性を分離して取扱うこととする(図17)
- ただし、各折点の設定については、今後実施する新材料を用いた壁体せん断試験の結果を踏まえて設定する予定である

*: 日本電気協会 原子力発電所耐震設計技術規定 (JEAC4601-2008)

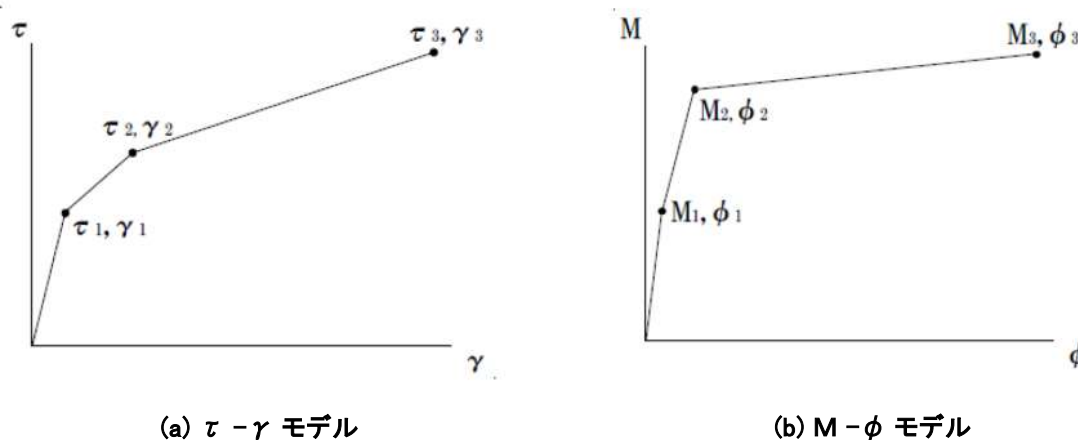


図17 JEAC4601の復元力モデル

7. まとめ

- 外部ハザードに対応する新材料・新構造の適用部位及び概略の構造性能を下表にまとめた

適用部位		新材料・新構造	期待する基本特性 (普通コンクリートとの対比)	備考
外壁	屋根	超高強度繊維補強コンクリート	約5.5倍の圧縮強度	鋼繊維による粘り強さにも期待
	壁	鋼繊維入り高強度コンクリート	約4.5倍の圧縮強度	
耐震壁		高強度コンクリート	約3倍の圧縮強度	
		軽量コンクリート	密度は約0.8倍	
遮へい壁		重量コンクリート	密度は約1.6倍	

今後の課題と展望

- 今後、壁体せん断試験体を用いた実証試験を実施し、新材料・新構造の力学的特性を取得する予定である
- また、実機の打設が可能であることを施工性試験で確認する
- 最終的には、試験で得られた力学的特性を用いて新材料・新構造の設計手法を構築するとともに民間規格に提案する予定
- プラント経済性向上の観点から新材料に適した建設工法(プレハブ工法等)の開発も望まれる

【謝辞】

本開発を遂行するにあたり、東京工業大学 瀧口名誉教授、宇都宮大学 榊田名誉教授、東京大学 野口教授、防衛大学校 別府教授、(財)電力中央研究所 伊藤様、梅木様、東京電力(株) 榎本様、関西電力(株) 巽様、日本原子力発電(株) 奥谷様に御指導いただきました。ここに記して謝意を表します。