

3.7 適用例：ECC を並列壁の境界梁へ適用した高層建築物

3.7.1 実建物概要と地震応答性状と連結梁への要求性能

地震力をコア壁に集中させ、頂部につけた大梁（スーパービーム）とオイルダンパでエネルギーを吸収させる新たな構造が実用化されている（図 3.29 参照）^{1), 2)}。図 3.29 の建物の頂部スーパービームとオイルダンパに替わり、図 3.30 に表すように、高靱性セメント複合材料の一種である ECC を用いた連結梁を設置する構造について検討した。この適用により、以下のメリットが見込まれる。

- ・オイルダンパを支持するサポート柱が不要となり、建築設計上の自由度が増大すること。
- ・オイルダンパに代わり RC 境界梁を採用した場合に問題となる地震時大変形の繰り返し载荷による部材性能劣化が ECC 連結梁では大幅に緩和されること。
- ・同じく RC 境界梁を採用した場合に問題となる地震時大変形を受けた後の再使用性に関し、ECC 連結梁ではひび割れ幅が微細なレベルに抑制されるため補修の必要性がほとんどなくなること。

この構造の具体例として、図 3.31 に表す「グローリオタワー六本木」（港区六本木 7 丁目、高さ 93m、地上 27 階建がある。この建物は、コ形のコア壁が向き合って配置されており、このコア壁に地震力が集中する。このコア壁間に ECC 連結梁を設置し、地震時にはこの ECC 連結梁に大きな変形を作用させるよう意図したものである。

建築基準法施行令第 81 条の 2 に基づき実施した、レベル 1（25 kine 相当）とレベル 2（50 kine 相当）の各 6 地震波による地震応答解析の結果、ECC 連結梁の応答最大変形角はレベル 1 時で約 0.01 rad.、レベル 2 で 0.025~0.035 rad.であった。図 3.32 にグローリオタワー六本木における連結梁のレベル 2 時応答最大部材回転角分布を示す。なお、この際の応答解析用の連結梁モデルは従来の RC 梁と同様な履歴特性とした。以上の結果から、ECC 連結梁の要求性能は①曲げ強度到達

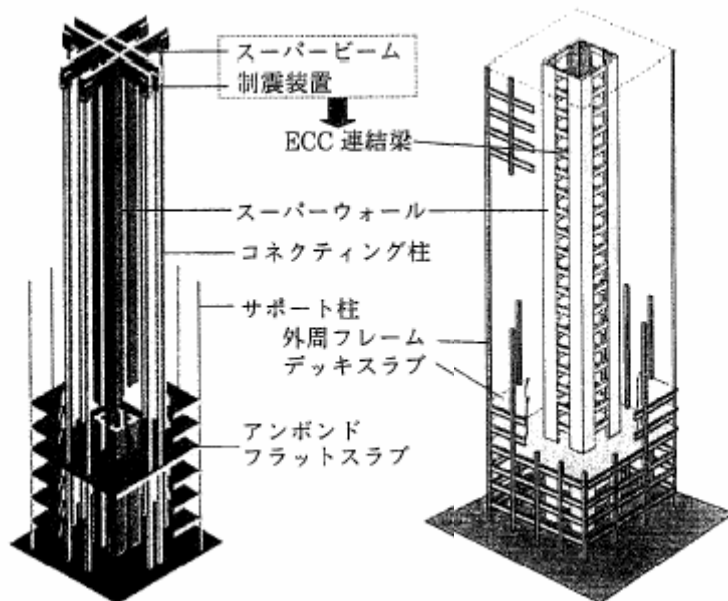


図 3.29 スーパーRC フレーム

図 3.30 新架構概念図

後部材角 4% (0.04 rad.) 程度までは著しい強度低下を生じさせないこと、②地震後に幅が 0.3 mm を超えるような耐久性に影響のある、ひび割れを生じさせないこととした (本文 3.4.1 節における目標性能の設定)。これらの連結梁に要求される性能を満足することにより、構造物における所要性能として、本文 3.4 節に定める(1)使用性、(2)修復性、(3)安全性、(4)耐久性が満足されると判断した。すなわち、前記①により、レベル 2 の大地震を経験した場合でも、構造物の安全性が確保され、さらに②により使用性と耐久性が確保されることになり、再使用に際しての補修が不要になると想定される。



図 3.31 グリーリオタワー六本木

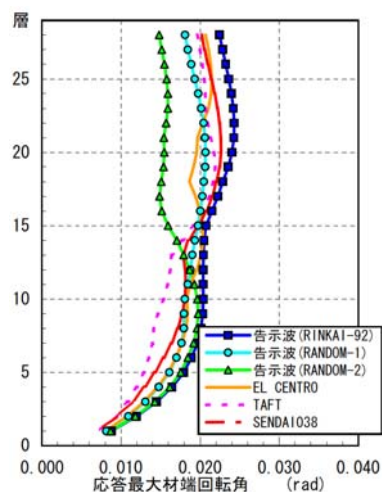


図 3.32 地震応答解析結果 (レベル 2)

3.7.2 高靱性セメント複合材料の材料特性と品質の確保

ECC 連結梁に関して所要の構造性能を実現するため、ECC の材料性能の設計値を表 3.7 のように定めた。この設計値を実現するための調査を実験に基づき表 3.8 に表すように決定した。採用した PVA 繊維の物性もあわせて表 3.8 に示す。

この調査の決定のため、実機プラントでの試練りを複数回実施し、表 3.8 の調査により表 3.7 の設計値を満足することが可能であることを検証した。引張性能については、図 3.33 に表す引張試験方法を用いて、引張強度および引張終局ひずみの平均値と変動係数のデータを採取し³⁾、不良率 4% を許容した場合の信頼区間下限値が設計値を上回っていることを確認した。

表 3.7 に表した項目のほか、ECC の耐久性について確認した。確認した耐久性項目は、物性長期安定性、中性化抵抗性、凍結融解抵抗性、耐火性などである。物性長期安定性については、有

機材料である PVA 繊維の長期的な力学性能およびセメント硬化物との長期的な付着性能について促進試験を実施して実験的検討を行い、問題がないことを確認した⁴⁾。

中性化抵抗性については、JIS A 1153 に基づき促進中性化試験を実施し、図 3.34 にあるように、通常のコンクリートと比較して評価を行った。文献 5)によれば、高耐久性 RC 造とするためにはこの試験において 26 週の促進期間で中性化深さが 25 mm 以内であることが求められており、図 3.34 の結果はこの許容値を大きく下回り、ECC を用いた場合には中性化抵抗性が非常に大きいことがわかる。

また、図 3.35 は JIS A 1148 に定められる方法により実施した凍結融解試験の結果である。高耐久性 RC 造とするためには、この試験により規定される耐久性指数が 85%以上必要であると定められているが⁵⁾、図 3.35 の結果は、このレベルを大きな余裕度をもって満足しており、ECC は優れた凍結融解特性を有していることがわかる。

耐火性については、建築基準法 68 条の 26 第 1 項の規定に基づく不燃材料としての大員認定、および 1 時間耐火の大員認定を取得することで確認した。ECC は、PVA 繊維を混入しているがモルタル主体の材料であり、その耐火性状は通常のもルタルもしくはコンクリートに類似と推察される。建設省告示第 1399 号（平成 12 年 5 月 30 日）によりコンクリート系構造物の耐火構造の構造方法が定められており、床にあつては RC の場合 10cm 以上の厚さを有する構造、はりにおいては RC 構造であれば耐火構造と認められるとされている。上記の大員認定および告示の内容を勘案し、ECC 連結梁は必要とされる耐火性を有していると判断された。

3.7 ECC の材料性能の設計値と検査基準

	項目	設計値	試験方法	検査頻度
フレッシュ	スランプフロー	53cm	JIS A 1150	(1)力学性能試験用の供試体採取時 (2)打ち込み中に品質変化が認められたとき (3)1日の練り混ぜの最初の1バッチ及び最大混練量バッチの最終バッチにて実施 (4)1日の混練が $10m^3$ 以上の時
	単位容積重量	1.88	JIS A 1116	
	空気量	10%	JIS A 1128	
	練上がり温度	-	温度計による測定	
力学性能	脱型時圧縮強度	10N/mm ²	JIS A 1108	打設 $10m^3$ 毎に1バッチから3本ずつ供試体を採取
	出荷時圧縮強度	36N/mm ²	JIS A 1108	
	出荷時引張強度	2N/mm ²	曲げ試験	
	出荷時引張終局ひずみ	0.50%	JCI-S-003-2005	

表 3.8 調合と PVA 繊維の物性

材料種別	水結合材比 W/B	砂結合材比 S/B	単位水量 W (kg/m ³)	繊維体積率 Vf (%)	空気量 (%)
ECC	0.43	0.76	357	2.0	10
繊維種類	繊維直径 df (mm)	繊維長 Lf (mm)	弾性係数 Ef (N/mm ²)	引張破断強度 (N/mm ²)	備考
PVA	0.040	12	40600	1690	-

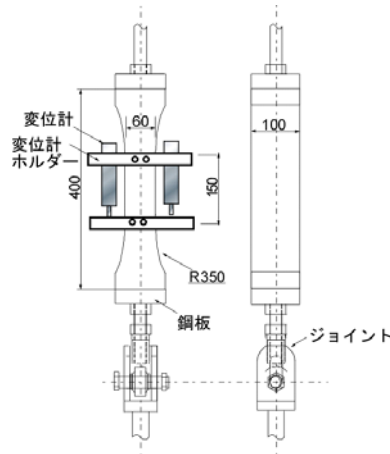


図 3.33 材料性能の検証に用いた引張試験法

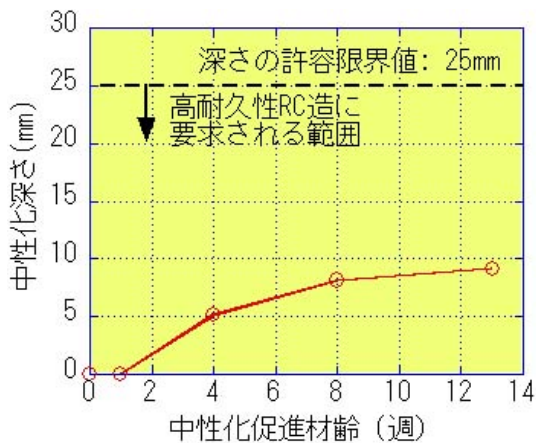


図 3.34 中性化促進試験の結果

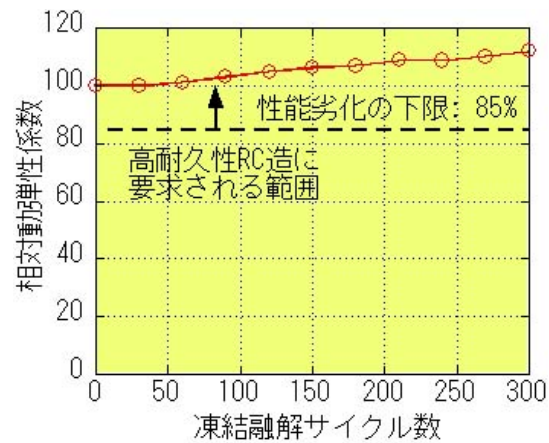


図 3.35 凍結融解試験の結果

3.7.3 高靱性セメント複合材料連結梁の構造安全性の確保

3.7.1 節に示した要求性能を満足できることを検証するため、ECC 連結梁の構造実験を実施した。これらの実験において、ECC 連結梁には、①せん断や付着割裂破壊をさせない、②曲げ降伏後部材角 4%程度までは荷重低下が生じない、③除荷した後の残留ひび割れ幅が 0.3 mm を超えないことが求められる。また、履歴特性についても、実験結果からモデル化を実施した。

構造実験は次の 2 種類実施した。第一は、曲げおよびせん断性状を把握するための曲げせん断実験、第二は付着割裂強度を確認する付着実験である。これらの構造実験から ECC 梁部材の各種強度（曲げ強度、せん断強度、付着強度）、変形性能、履歴性能、損傷程度（各種破壊性状、ひび割れ性状、ひび割れ幅など）を確認し、性能検証に供した。これらの概要については、文献 6) を参照されたい。

3.7.4 環境安全性の確保

ここで用いた ECC 連結梁は、施工時および使用時、さらには地震時、火災時などの罹災時に人体の健康に影響を及ぼすおそれのある物質が、影響がある量を超えて放出されないことがないように配慮されている。ECC に使用される PVA 繊維は、石綿代替材料として、欧州を中心として広く普

及しており、人体への悪影響がないことが広範な実験などにより明らかとなっている。また、火災時に高温になった場合、ECC から放出される物質が生体に深刻な影響を与えるものでないことは、建築基準法 68 条の 26 第 1 項の規定に基づく不燃材料としての大臣認定により確認されている。

3.7.5 責任・管理体制（部材の製作方法、管理方法、および施工方法）

プレキャスト（以下 PCa）工場で ECC の部材を製作するに先立ち実施した実機による製造実験の結果から、PCa 工場においても、試験室と同等の性能を有する ECC が製造可能であること、および表 3.7 に表す検査と判定基準によって、ECC に要求される材料品質の確保が可能であることが分った³⁾。

表 3.7 にあるように、品質管理および検査の方法と頻度を定め、所要の品質が確保されていることを確認した。特に、出荷時の引張強度および引張終局ひずみを検査することを定めた。通常のコンクリート部材と異なり、この引張性能の検査は ECC 部材の製造上重要な項目である。ECC の引張性能の検査は、例えば図 3.33 に示す引張試験を用いて行うことができる。この引張試験は、引張供試体の断面が 60×100 mm と比較的大きく、部材中の ECC の挙動を把握する上で適した方法といえる⁷⁾。しかしながら、このような引張試験は、実施に多大な労力を要すること、および供試体のセットや載荷に熟練を要することなどから、日常的に実施する検査用試験として採用することは現実的でない。

これらのことから、引張性能の検査用試験として、より実施が容易な曲げ試験を採用することとした（本文 3.3.1 (1) 2)参照）。採用する試験法は、JCI-S-003-2005 として標準化された 100×100×400 mm の供試体を用いた 3 等分点載荷による方法である（図 3.36）。この試験法では、曲げ荷重に加え、中央 100 mm 幅の曲げ区間について、上下 2 箇所にて載荷直交方向のひずみを計測する。さらに、計測された荷重とひずみから、モーメントー曲率関係に変換し、これをもとに引張強度と引張終局ひずみの推定値を簡単な関係式を介して算出するものである。

この曲げ試験方法を用いるにあたり、材料特性である引張性能を構造性能である曲げ性能から推定することによって生じる誤差の取扱いが問題となる。ここでは、事前の実験により修正係数を算出し、これを曲げ試験による推定値に乗じることで対処した。この修正係数算出のため、実機試験における製造試験を実施した³⁾。その結果、図 3.37 にあるように、引張強度および引張終局ひずみとも曲げ試験による推定値に 0.7 の修正係数を乗じることで安全側に評価が可能であることが分った。

ECC の PCa 部材は、図 3.38 に示すように連結梁部分に周辺スラブ部分に取り付いた形で製作した。これは連結梁が大変形した場合に、周辺スラブが変形に追従して大きな損傷を受けることが考えられ、境界ばり周辺の床スラブにも ECC を用いることでこの損傷の低減を意図した。

ECC の PCa 部材による現場組立ては、図 3.39 に示すように実施した。その手順は、(1) RC コア壁の端部を PCa 化し現場にて設置、(2) そのコア壁端部 PCa をガイドとしてコア壁の残り部分の配筋を実施、さらに(3) コア壁端部 PCa 部材のかぶりコンクリート部分に ECC 部材を位置決めする方法で行った。図 3.39 は ECC 部材の設置後の状況である。この設置工程の後、床スラブ配筋およびコア壁の型枠建込みを経て、コア壁および床スラブのコンクリートを現場打設し完成させる。ECC 部材のコア壁および床スラブへの定着は、ECC 部材から突出した接合筋を介して行われ

ることとなる。

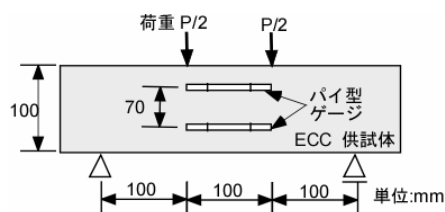


図 3.36 曲げ試験方法

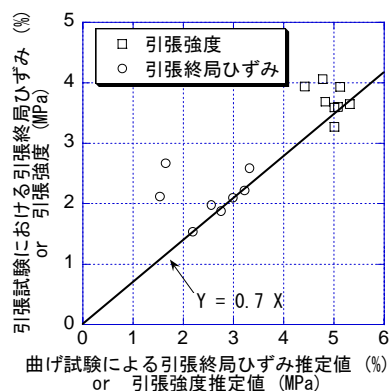


図 3.37 曲げ試験を用いた場合の修正係数の算出



図 3.38 ECC 連結梁の施工状況



図 3.39 ECC 連結梁の設置状況

【参考文献】

- 1) 小堀鐸二, 五十殿侑弘, 大川潤他: 制震装置を用いた新しい RC 架構の開発, 日本建築学会 学術講演梗概集 (北海道) 構造IV, pp. 803-806, 1995.8
- 2) 丸田誠, 鈴木紀雄, 別所佐登志: 鉄筋コンクリート造立体耐震壁の構造性能に関する研究: 日本建築学会構造系論文集, 第 520 号, pp. 109-116, 1999.6
- 3) 閑田徹志, 金久保利之, 永井覚, 丸田誠: 曲げ試験を用いた高靱性複合材料 ECC の引張力学性能管理に関する実験的検討, 鹿島技術研究所年報, 第 52 号, pp. 131-138, 2004
- 4) 閑田徹志, 小川敦久, 浜田敏裕: PVA 繊維を用いたひずみ硬化型高靱性セメント複合材料の耐久性に関する基礎的実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 24, No. 1, pp. 219-224, 2002
- 5) 日本建築学会: 高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針 (案)・同解説, 日本建築学会, 1991
- 6) 丸田誠, 閑田徹志, 永井覚, 山本幸正: プレキャスト ECC 連結梁を用いた高層 RC 新架構, コンクリート工学, Vol. 43, No. 11, pp. 18-26, 2005
- 7) 清水克将, 金久保利之, 閑田徹志, 永井覚: HPFRCC の一軸引張および曲げ性状に及ぼす打設方向の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 1, pp. 281-286, 2003