

3次元材料非線形解析を用いた高加速度加振試験の事前解析

東電設計（株） 正会員 ○大塚 鎮
東電設計（株） 正会員 渡部龍正
（一財）電力中央研究所 正会員 酒井俊朗
（一財）電力中央研究所 正会員 酒井理哉

1. はじめに

原子力発電所の屋外重要土木構造物である海水管ダクトの地震に対するフラジリティ評価では、ボックスカルバート躯体の層間変形角を限界値とする評価体系で規定されている¹⁾が、実際のフラジリティは、内包する海水管がバウンダリとして冷却水を通水する機能を限界と規定すべきである。このため、海水管ダクト（土木）フラジリティと配管（機器）フラジリティの両面からの高度化研究を行い、従来考慮できていない構造物と機器の連成によるフラジリティ評価法を構築する。本検討では、高加速度加振試験の事前解析を3次元材料非線形解析で実施し、ボックスカルバートの破壊性状を確認した。

2. 検討概要

試験体は、振動台に搭載可能な実機海水管ダクトの1/2～1/3程度のスケールのボックスカルバート模型を製作した。重錘の重量は2tである。試験に用いたボックスカルバート試験体の配筋図を図1に示す。配筋設計として、表1に示すように曲げ耐力に対しせん断耐力が2倍以上とすることで、曲げ破壊先行型の配筋設計とした。設計に用いたコンクリートと鉄筋の材料物性値を表2に示す。設計ではコンクリートと鉄筋の材料強度は設計基準強度（ $f'_{ck}=24\text{N/mm}^2$, $f_y=290\text{N/mm}^2$ ）を1.1倍した値とした。

上記の配筋条件、材料強度を用いて、3次元材料非線形解析を実施した。解析コードはCOM3^{2),3)}を用いた。解析モデルを図2に示す。構造物および重錘はともにソリッド要素（1次要素）でモデル化した。重錘のみ弾性要素でモデル化し、その他はRC要素として非線形性を考慮した。コンクリートの引張強度は乾燥収縮の影響等も考え、設計強度の1/2とした。境界条件は、解析モデル底面全節点を固定とした。検討用加速度波形を図3に示す。最大加速度5,000gal、振動数は加振できる最大振動数の10Hzとし、最大加速度に到達するまで（2.5秒付近まで）はテーパを付けた。

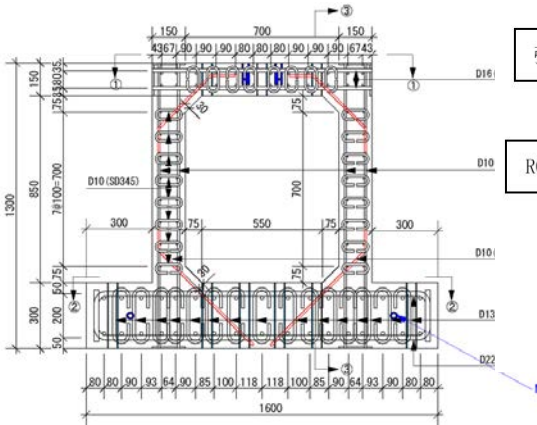
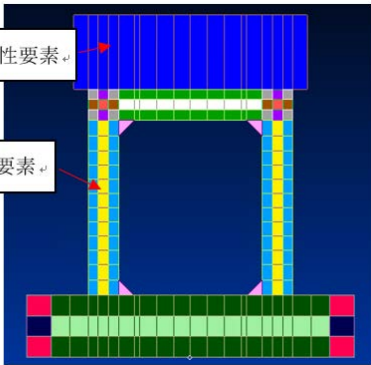
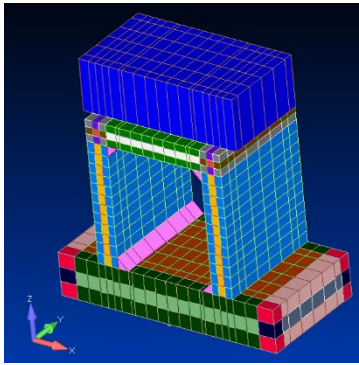


図1 配筋図



(a) 正面図



(b) 鳥瞰図

図2 解析モデル

表1 曲げせん断耐力比

曲げ耐力	$V_{mu}(kN)$	150
せん断耐力	$V_c+V_{sd}(kN)$	362
曲げせん断耐力比	$(V_c+V_{sd})/V_{mu}$	2.41

表2 材料物性値一覧

	弾性係数E N/mm ²	設計基準強度 f'_{ck} 降伏強度 f_y N/mm ²
コンクリート	2.5×10^4	26.4
鉄筋	2.0×10^5	319

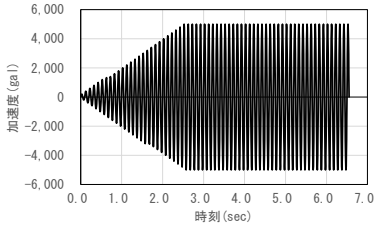


図3 検討用加速度波形

キーワード：三次元材料非線形解析，ボックスカルバート，海水管ダクト，フラジリティ評価
〒135-0062 東京都江東区東雲 1-7-12 KDX 豊洲グランスクエア 9F 東電設計（株） TEL：03-6372-5947

3. 解析結果および考察

カルバート試験体の荷重-変位関係を図4に示す。COM3の荷重は底版反力からフーチング部分の荷重（フーチング重量×入力加速度）を引いて算出した。実験結果は、重錘重量（2.093t）に頂版重量（0.331t）を足して重錘頂部の水平加速度を乗じることによって荷重を算出した。変位はともに頂版水平変位である。実験結果は、入力加速度4,000galまで加速度を上げたところ、主鉄筋が降伏したことで試験体の固有振動数が低下し、加速度の入力ができなくなったため終了した1回目の加振である。COM3での荷重-変位関係は実験での最大荷重程度まで概ね再現しており、入力加速度4,000gal到達時は概ね実験結果の荷重と整合的であった。

加振実験終了後のカルバート試験体のひび割れ状況写真を図5に示す。ひび割れの状況は、鉛直部材のハンチ端部付近に概ね水平方向のひび割れが確認され、ひび割れ状況からも曲げ変形モードであったことが示唆された。また、そのひび割れは奥行方向にほぼ一様に確認され、ハンチ端部以外にはほとんどひび割れが発生しなかった。COM3の入力加速度4,000gal到達時（図4の○時）の変形+主ひずみ分布図を図6に示す。最大主ひずみはハンチ端部付近で大きなひずみが確認され、鉄筋の降伏ひずみを超える2,000 μ 以上のひずみが生じていた。曲げ破壊モードとなることは再現していたものの、鉄筋破断に至るような挙動は再現されていない。最小主ひずみは1,000 μ 以下と小さい結果であった。これは、軸力比が0.005程度と小さく、また、層間変形角も0.5%程度の挙動であったためと考えられる。

4. おわりに

3次元材料非線形解析（COM3）を用いて高加速度加振実験の事前解析を実施したところ、4,000gal到達時までの荷重-変位関係は概ね実験結果と整合的で、曲げ破壊先行型の破壊性状を再現したものであった。今後は、解析モデルの再検討も含めて実験条件を反映した解析を行い、また、せん断破壊先行の試験体での検討も実施することで、海水管ダクトの fragility 評価方法の高度化につなげる。

参考文献

- 1) 土木学会原子力土木委員会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル，2021。
- 2) 岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991。
- 3) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, SPON PRESS, 2003。

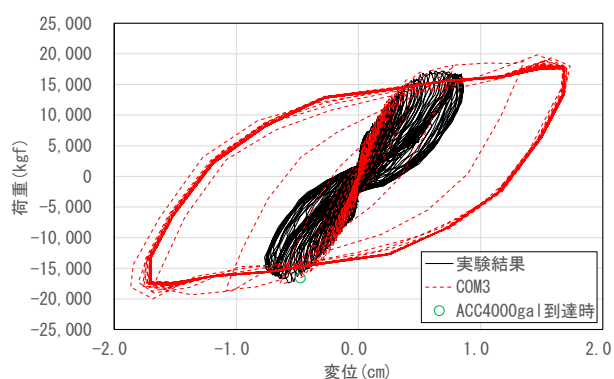
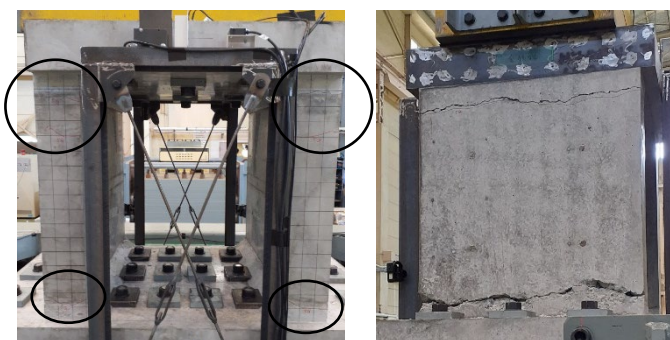
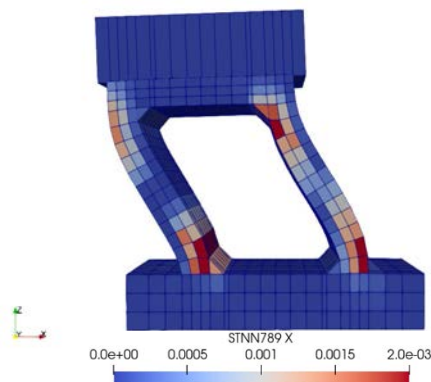


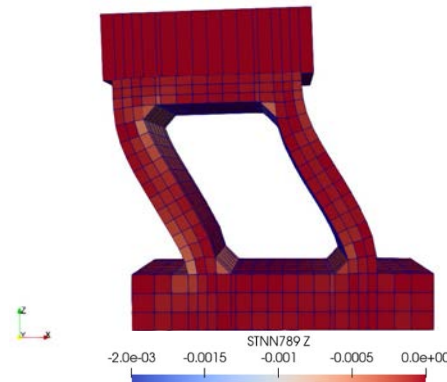
図4 荷重-変位関係



(a) 正面 (b) 側面
図5 ひび割れ発生状況（加振実験終了後）



(a) 最大主ひずみ



(b) 最小主ひずみ

図6 変形+主ひずみ分布（加速度4000gal到達時_図4○時）変形倍率：100倍