

コンクリート製地中構造物の合理的な耐震性能評価指標に関する検討

松尾豊史¹・金津努²・大友敬三³・福本彦吉⁴

- ¹(財)電力中央研究所 材料構造部・主任研究員 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)
E-mail:matsuo@criepi.denken.or.jp
- ²(財)電力中央研究所 材料構造部長・上席研究員 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)
E-mail:kanazu@criepi.denken.or.jp
- ³(財)電力中央研究所 地盤耐震部・上席研究員 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)
E-mail:ootomo@criepi.denken.or.jp
- ⁴関西電力株式会社 土木建築室・土木建設グループ (〒530-8270 大阪市北区中之島3-3-22)
E-mail:k450247@kepc.co.jp

本研究は、鉄筋コンクリート製地中構造物の合理的な耐震性能評価指標について検討したものである。曲げ破壊先行型の鉄筋コンクリート製ボックスラーメン構造が横断面方向に崩壊しないことを保証できる限界状態を「かぶりコンクリートの剥落」時点とし、この限界状態を照査するための評価指標とその限界値として、コンクリートの圧縮ひずみ1% (10000×10^{-6}) と層間変形角1/100をそれぞれ選定し、その妥当性を確認した。

Key Words : reinforced concrete, underground structure, seismic performance, FEM, limit state

1. はじめに

現在、コンクリート構造物の各種基準類に性能照査の概念が取り入れられる趨勢にある¹⁾。当所では、原子力発電所の非常用冷却施設を構成する鉄筋コンクリート製地中構造物を対象として性能照査概念に基づいた耐震性能照査法の高度化を進めてきた²⁾³⁾。耐震性能照査に用いる解析手法は、構造物の応答挙動の非線形性程度と照査の対象となる限界状態に

応じて適宜選択する必要がある(表-1)。本研究は、この観点から、鉄筋コンクリート製地中構造物の耐震性能照査に用いる合理的な耐震性能評価指標を提案することを目的としている。

なお、本研究で対象とするのは、原子力発電所におけるボックスラーメン構造形式の鉄筋コンクリート製地中構造物・横断面方向である。

表-1 耐震性能と解析手法との対応関係³⁾

目標性能		選択される標準的な解析手法と耐震性能の照査に用いる物理量
区分	限界状態	
1	構造物の構成部材が降伏に至らない	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>線形解析</p> <ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋およびコンクリートの最大応力 ・最大せん断応力 </div>
2	構造物が最大耐力に至らない	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>等価線形解析</p> <ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋およびコンクリートの最大応力 ・最大せん断応力 ・最大せん断力 ・最大曲げモーメント </div>
3	構造物が崩壊しない	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>部材非線形の解析</p> <ul style="list-style-type: none"> ・最大曲げモーメント ・最大曲率 ・最大せん断力 ・最大変位 ・最大層間変形角 </div>
		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>材料非線形の解析</p> <ul style="list-style-type: none"> ・最大変位 ・最大せん断力 ・最大層間変形角 ・最大ひずみ </div>

2. 既往の研究

(1) 地中RC構造物の耐震性能照査手法

a) 各種基準の現状

「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全性照査マニュアル(1992)」²⁾では、等価線形モデルを用いた地盤・構造物連成系の地震応答解析手法が採用された。

道路橋示方書・耐震設計編(2002)⁴⁾や鉄道構造物等設計標準(1998)⁵⁾では、部材非線形モデルを用いた動的解析手法が取り入れられている。道路橋示方書・耐震設計編では、震度法や地震時水平耐力法によって耐震設計した結果を、動的解析により照査する手法が示されている。鉄道標準では、耐震設計における地盤および構造物の応答値の算定について示されており、それぞれ動的解析法によることを原則としている。

LNG 地下タンク躯体の構造性能照査指針(1999)⁶⁾や土木学会コンクリート標準示方書・耐震性能照査編(2002)⁷⁾では、材料非線形解析モデルを用いた動的解析手法が取り入れられている。LNG 地下タンク指針では、解析手法には種々の方法があるので、それぞれの特徴を把握して、照査する耐震性能に応じて、それにふさわしい解析手法を用いる必要があるとしている。また、解析手法が高度化、厳密化することによって、簡易な解析手法を用いるよりも設計の合理化につながると述べている。土木学会コンクリート標準示方書・耐震性能照査編では、想定する地震動や構造物の耐震性能に応じて、適切に解析モデルを選択することとしている。特に、材料の力学モデルおよび部材の力学モデルについて、応力履歴の影響までを含めたモデルが具体的に記述されているのが特徴である。

b) 耐震性能評価指標の動向

鉄筋コンクリート製地中構造物の耐震性能評価法は、耐力を指標とする体系から変形を指標とする体系に移行する趨勢にある。これは、解析手法の高度化に伴って、より現実に近い挙動予測が可能になり、耐力よりも変形を指標とした方がより合理的な設計・性能照査が可能となるからである。特に、地中構造物の場合、構造物に作用する慣性力の影響よりも、地盤からの変形の影響が極めて大きいため、限界性能の評価には、耐力よりも変形性能による評価が望ましい。

昨今、実物大または縮尺した鉄筋コンクリート試験体の静的載荷試験⁸⁾⁻¹⁰⁾が行われ、RC部材の降伏以降の耐力、変形性能および限界状態が検討され、材料非線形モデルを用いた解析手法の適用性も検討されている。しかしながら、非線形解析手法の適用限界、および構造物の最大耐力時や終局耐力時等の限界状態と非線形解析により評価される断面力、変形角、ひずみ等の限界値との対応関係は必ずしも明確にはなっていない。

(2) RC構造物の限界状態

a) ひずみ限界に関する既往の研究

鉄筋コンクリート構造物の局所的に大きな損傷を避けるために、ひずみによる制限を設けることを念頭に、鉄筋コンクリート材料のひずみ限界に関する既往の研究を調査した。

鉄筋コンクリートは、引張側には延性に富む鉄筋が配置されているので、主に、コンクリートの圧縮ひずみ特性を調査の対象とした。

図-1にコンクリートの圧縮強度試験結果¹¹⁾(JIS A 1108-1999準拠)から求めた圧縮応力 - 圧縮ひずみ関係を示す。これから、コンクリートの圧縮ひずみが1%(10000×10⁻⁶)時点の圧縮応力は、概ね2~7N/mm²程度残留している状態であることが分かる。

コンクリートの圧縮ひずみ1%(10000×10⁻⁶)が、まだ応力を負担することのできるひずみ値であることを示すために、剛性の高い圧縮試験機を用いて、高ひずみ領域にいたるまでの応力 - ひずみ関係を得た研究例を以下に示す。

平松ら¹²⁾は、載荷速度・コンクリート強度・骨材の種類の影響に着目して、コンクリートの圧縮ひずみが1.15%(11500×10⁻⁶)に至るまで円柱供試体の載荷実験を行っている。図-2は、普通コンクリート20MPa~20MPaの試験結果である。

谷川ら¹³⁾は、水セメント比および粗骨材の種類の影響に着目して、コンクリートの圧縮ひずみが2%(20000×10⁻⁶)に至るまで円柱供試体を載荷する実験を行っている。小阪ら¹⁴⁾は、水セメント比・供試体の高さ-直径比・端面摩擦の影響に着目して、コンクリートの圧縮ひずみが2%(20000×10⁻⁶)に至るまで円柱供試体を載荷する実験を行っている。

これらの実験では、コンクリートの圧縮ひずみが1%(10000×10⁻⁶)においても応力を負担する結果となっている。また、その値は強度をはじめとする様々なパラメータに大きくは影響されない。

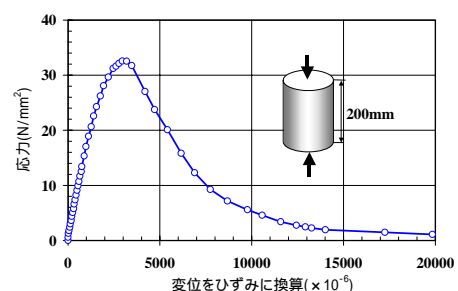


図-1 コンクリートの圧縮応力 - 圧縮ひずみ関係(実験)

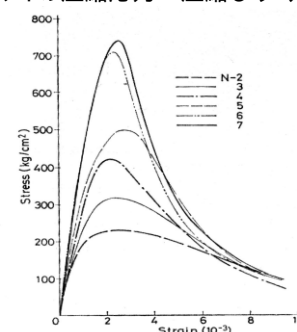


図-2 平松らの実験結果(コンクリート強度の影響)

b) 変形限界に関する既往の研究

鉄筋コンクリート製地中構造物の変形限界を工学的に評価するために、既往の水平加力実験結果を調査し、主に変形性能と具体的な損傷事象との関連性に着目して実験結果の評価と整理を行った。

実験における荷重 - 変位関係の包絡履歴を整理、再評価した結果を図-3に示す。荷重は全て試験体頂部に作用する集中荷重であり、荷重軸を個々の実験ケースの最大耐荷力で無次元化して示した。変形軸は個々の試験体の高さで無次元化することにより、層間変形角(水平層間変位 / 試験体高さ)とした。以下に明らかになった事柄を列挙する。

- いずれの試験体も層間変形角が 1/100 を超えて最大耐荷力に達し、その後しばらくは最大耐荷力を維持できる状態があり、その後、耐荷力が低下していく。
- 同一寸法の試験体は、耐荷力が低下する時点に至るまでは、載荷形態(単調 / 正負交番載荷、軸力大 / 小等)に拘らず、包絡履歴はほぼ同じような経路をたどり再現性がある(実験C¹⁷⁾)。
- 載荷途中で部材がせん断破壊した試験体については、最大耐荷力到達後、比較的早い段階で耐荷力が急激に低下する(実験D¹⁸⁾)。
- 隅角部で塑性ヒンジが形成され、その位置の曲げ破壊が進展するような試験体については、比較的大変形まで最大耐荷力を維持した後に、耐荷力が徐々に低下する。

実験C¹⁷⁾では、各荷重段階での試験体の損傷状況について詳細な観察が行われている。なお、試験体は曲げ破壊型のものである。図-3に、実験Cにおいてかぶりコンクリートの剥落が観察された時点を示した。これより、耐荷力が低下し始める時点は、圧縮側のかぶりコンクリートの剥落時点以降になると判断される。

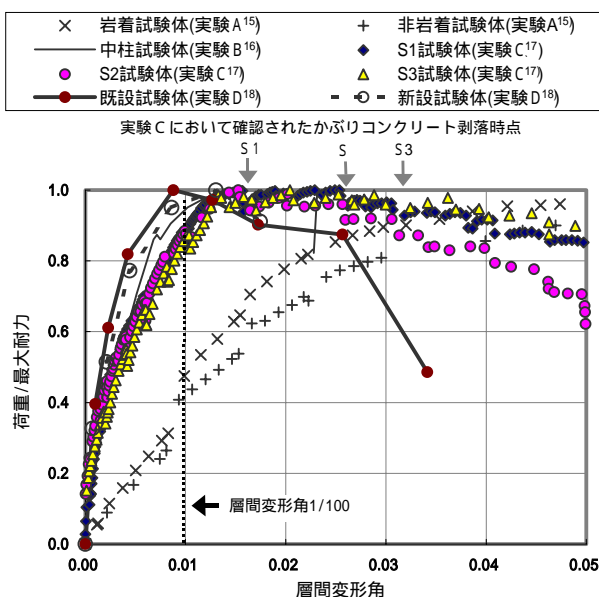


図-3 RC製ボックスラーメン構造の水平載荷実験結果

3. 耐震性能評価指標の提案

(1) 限界状態設定の基本方針

鉄筋コンクリート製地中構造物の耐震性能照査は、応答値が所要の安全性をもって限界値に到達しないことを確認することによって行う。限界値の設定にあたっては、対象とする構造物の要求性能および目標性能を明確にした上で、構造物の限界状態を設定し、照査項目およびその限界値を選定する必要がある。

図-4に鉄筋コンクリート製地中構造物の一般的な耐震性能照査における限界値設定までの流れを示す³⁾。限界状態については、曲げ破壊に関わる事象とせん断破壊に関わる事象に分けて考える必要がある。以降は、曲げ破壊に関わる限界状態について記述する。

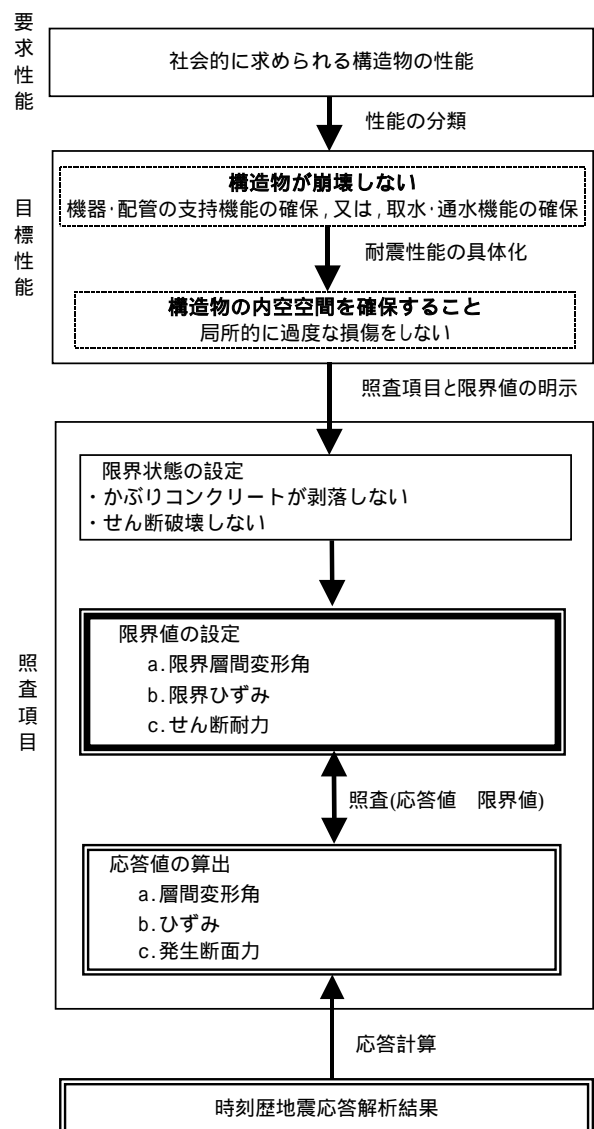


図-4 耐震性能照査における限界値設定までの流れ

鉄筋コンクリート製地中構造物の目標性能としては、地中構造物であることを踏まえて、『構造物が崩壊しない』ことを想定する。これは、コンクリート標準示方書・耐震性能照査編(2002)⁷⁾に規定されて

いる耐震性能3に相当するものである。『構造物の崩壊』を一般的に定義できる照査項目およびその限界値を設定することは難しい。しかしながら、地中構造物の場合は、構造物の内空空間を確保することが最低限必要であると判断し、本研究では、上床版が崩落しないこと、側壁・隔壁が倒壊しないことと定義した。上床版の崩落や側壁・隔壁の倒壊は、構造系の塑性状態から崩壊への移行や部材断面の曲げ破壊、せん断破壊で一般的に表現される。つまり、構造物の限界変形や断面破壊を考えることで、『構造物が崩壊しない』という耐震性能を確認するための照査項目とその限界値を設定することができる。

また、本研究の検討対象が原子力発電所施設であり、機器・配管を支持する場合には、機器・配管の支持機能が低下しないこと、および機器・配管を支持しない場合には、冷却用海水を取水・通水する機能を維持することが必要であるため、『局所的に過度な損傷をしない』ことも目標性能として付加する。

曲げ破壊先行型の鉄筋コンクリート構造物の一般的な崩壊過程に関する概念図を図-5に示す。本研究では、曲げ破壊に対しては、現状の解析技術を勘案し、図中におけるかぶりコンクリートの剥落の領域を、限界状態と考えた。既往の実験研究事例や被害事例などから、かぶりコンクリートが剥落していなければ、鉄筋コンクリート構造の延性的な特性が保持され、倒壊などの致命的な被害を回避することができることなどを参考に定めた¹⁹⁾。さらに、かぶりコンクリートが剥落した後の状態は、現状の鉄筋コンクリートの微小変形理論に基づいた解析手法では保証できない範囲であり、解析手法の適用限界であるとも考えられる。

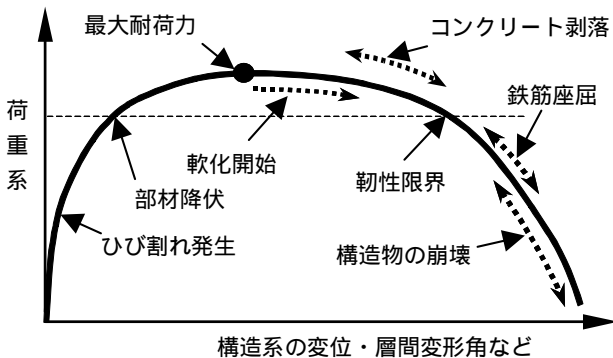


図-5 一般的な鉄筋コンクリート構造物の崩壊過程に関する概念図³⁾

(2) 照査指標の選定

a) ひずみの制限

本研究では、局所的な損傷状態に対する照査指標として、コンクリートの圧縮ひずみを選定し、4章では、その具体的な限界値を提案する。

b) 変形の制限

本研究では、構造系全体の変形に対する照査指標として、層間変形角(頂底板間相対変位を構造物高さで除した値)を選定し、5章において、その具体的な限界値を提案する。

4. ひずみの制限

(1) 限界値の提案

2章「ひずみ限界に関する既往研究」より、コンクリートの圧縮ひずみ 1% (10000×10^{-6}) という時点は、コンクリートが圧縮軟化域に入り、応力が零近くの領域のひずみであり、かぶりコンクリートの剥落の危険性を考慮することが必要な値であると考えられる。

図-6には、本研究で用いた材料非線形解析²⁰⁾の一軸圧縮条件下におけるコンクリートの応力-ひずみ曲線の計算例(圧縮強度を変化)を示している。これより、解析では、かぶりコンクリートの剥落は直接表現できないものの、コンクリートの圧縮ひずみの限界値を設定することにより、「かぶりコンクリートが剥落しない」という限界状態を照査することが可能である。

本研究では、かぶりコンクリートの剥落に対応するコンクリートの圧縮ひずみの限界値として1% (10000×10^{-6})を提案し、以降、その妥当性を解析により確認する。

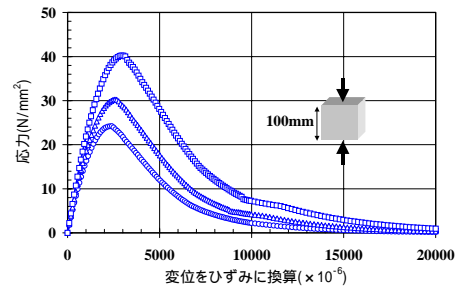


図-6 一軸圧縮条件下におけるコンクリートの応力ひずみ曲線(材料非線形解析)

(2) 解析による検証

ここでは、シミュレーション解析により、圧縮縁コンクリートひずみ 1% (10000×10^{-6})を限界値とすることにより、構造物全体変位に対して概ね最大耐力相当の領域に限界状態を設定可能であることを確認する。

武田ら⁸⁾¹⁷⁾は、実構造物の約1/3.5(部材厚30cm)の二連ボックスラーメン構造を模擬した試験体を対象とした実験を実施した(図-7、図-8)。そのうちのS3試験体では、コンクリートの表面剥離観察後に最大耐力となり、そのまま平坦な荷重領域となった後、コンクリート片が剥落し、隔壁の圧縮主筋が座屈するまで、徐々に耐力低下する結果となった。

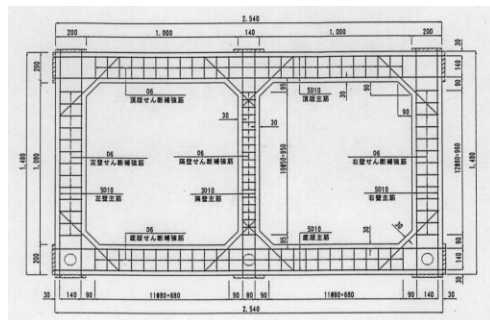


図-7 試験体の構造寸法と配筋

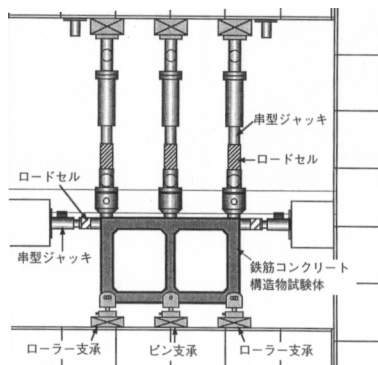


図-8 荷重方法の概略図

シミュレーション解析では、鉄筋コンクリート要素として材料非線形を考慮した分散びびわれモデル²⁰⁾を用いた。解析コードは、非線形FEMプログラム「WCOMD-SJ」(ver7.1)を使用した。解析モデルを図-9に示す。断面方向の要素分割は鉄筋位置とその間のコア部を考慮して3分割とした。ハンチ支点位置には局所的な不連続変形挙動が表現可能な離散びびわれに基づく接合要素を考慮しているほか、側壁および隔壁下部の隅角部は弾性要素としている。

図-10に示す実験結果と解析結果の比較より、両者は良好な一致を示していることが分かる。解析において、コンクリートの圧縮ひずみ 10000×10^{-6} が発生する時点は、最大荷重を維持する平坦な領域であり、コンクリートの剥落が確認される近傍であった。但し、部材端部における圧縮縁コンクリートひずみは部材厚と同等の縁長さ区間での平均ひずみとした。これより、解析は、隔壁の主筋が屈服する時点付近までは良好に解析出てきているものと判断できる。

なお、実験結果では、荷重条件(単調荷重or交番荷重)に拘らず、耐荷力が低下する時点に至るまでは、包絡履歴はほぼ同様な経路をたどったが、解析結果でも同様な傾向を示した。

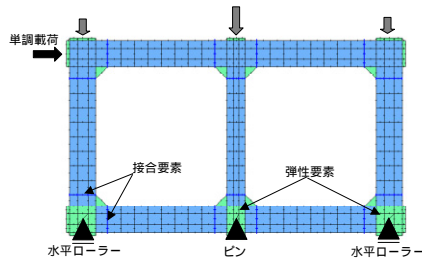


図-9 解析要素分割図

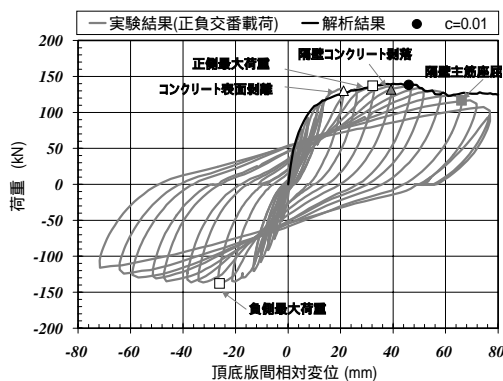


図-10 実験結果と解析結果の比較(S3試験体)

5. 変形の制限

(1) 限界値の提案

2章「変形限界に関する既往研究」より、「構造物が崩壊しない」ことを保証できる目安として、「かぶりコンクリートの剥落」時点とするのは妥当であると判断した。ただし、かぶりコンクリートの剥落時点は、構造寸法、荷重状態等により変化するものであり、実務においてその時点を解析的に特定するのは煩雑である。安全側ではあっても簡易的に構造物の崩壊回避が判定できる指標が実務においては有用視される²¹⁾。

このような観点にたてば、 $1/100$ 程度の層間変形角は、構造物が崩壊しないことを安全側に保証する目安として考えられる。本研究では、全体的な変形を抑える制限として、層間変形角 $1/100$ を構造物がせん断破壊しない場合における変形に関する限界値として提案し、以降、その妥当性を解析により確認する。

(2) 解析による検証

a) プッシュオーバー解析による限界値の算定

地中構造物は、地盤からの変形の影響が非常に大きく、構造物は基本的に地盤変位に追従するため、著者ら²²⁾は、構造系全体の変形に着目した検討においては、荷重を簡略化した構造物単体の静的なプッシュオーバー解析を用いて構造物の変形挙動を評価することは妥当であると判断した。そこで、プッシュオーバー解析により、構造物の層間変形角に基づいた限界値を算定する方法について検討する。なお、解析手法については、4章と同一である。

検討の対象とした実規模の海水管ダクトは、幅8.2m高さ4.3m、各部材厚さ40cmの鉄筋コンクリート製二連ボックスラーメン構造であり、せん断波速度 $1/s$ が700m/s相当の岩盤面に設置されているものとした(図-11)。この検討用構造物は、「安全性照査マニュアル(1992)」²⁾の例示設計編で示されているものである。構造物の各部材の配筋状態を表-2に、解析で用いたコンクリートと鉄筋の材料物性値を表-3に示す。プッシュオーバー解析で用いた有限要素分割と境界条件は図-12に示す通りである。

図-13に解析結果を示す。(a)はコンクリートの圧縮ひずみの最大値が発生する時点と発生箇所を示している。(b)は部材レベルでの最大耐力に対応したコンクリートの圧縮ひずみ 0.35% (3500×10^{-6})が発生する順序と発生箇所を示している。解析結果では、層間変形角 $1.36/100$ (\square)でコンクリートの圧縮ひずみが 0.35% (3500×10^{-6})に達し、層間変形角 $2.35/100$ (\square)でコンクリートの圧縮ひずみが 1% (10000×10^{-6})になった。ボックスラーメン構造は、高次の不静定構造であるため、部材の一部がコンクリートの圧縮ひずみ 0.35% (3500×10^{-6})を超えて軟化領域に至っても、構造物全体としては安定的な挙動を維持することが分かった。

これらより、プッシュオーバー解析にて評価すると、コンクリートの圧縮ひずみ 1% (10000×10^{-6})を限

界値とすれば、構造物全体の最大耐力の領域に限界状態を設定したことに相当すると考えられる。

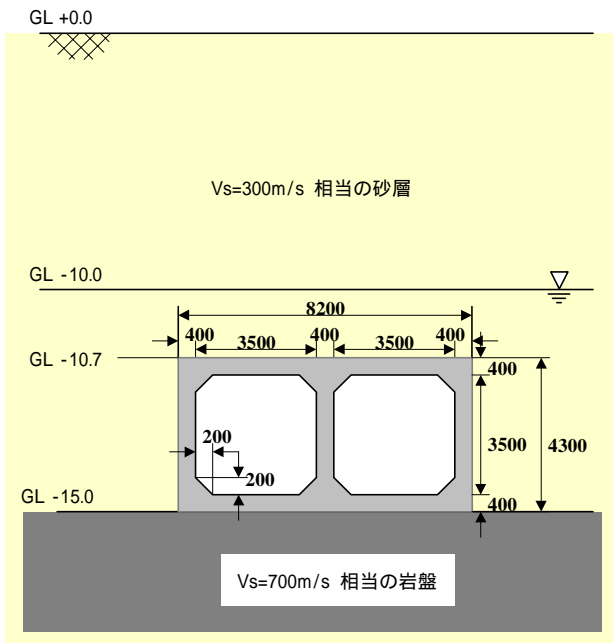


図-11 海水管ダクトの埋設条件と構造寸法(単位: mm)

表-2 各部材の配筋状態

	主筋	せん断補強筋
頂版	D13@100mm	奥行き 1.0m
側壁	被り; 80mm	D13x2 本
隔壁	主鉄筋比; 0.396%	200mm 間隔
底版	D13@100mm	奥行き 1.0m
	被り; 80mm	D13x2 本
	主鉄筋比; 0.396%	150mm 間隔
ハンチ	D13@200mm	-

表-3 コンクリートと鉄筋の材料物性

	材料物性	値
コンクリート	圧縮強度 f_c (N/mm ²)	23.5
	引張強度 f_t (N/mm ²)	1.89
	ヤング係数 E_c (N/mm ²)	24500
	ポアソン比	0.167
	単位体積重量 c (kN/m ³)	23.5
鉄筋	降伏強度 f_y (N/mm ²)	343
	ヤング率 E_s (N/mm ²)	206000
	ポアソン比	0.3
	単位体積重量 s (kN/m ³)	77.0

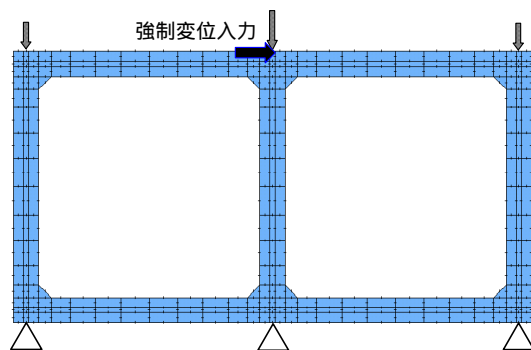
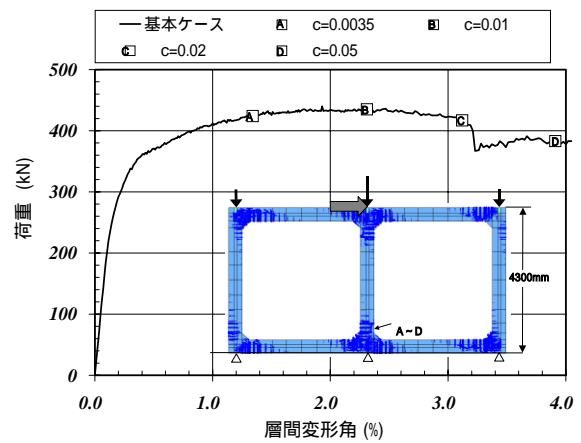
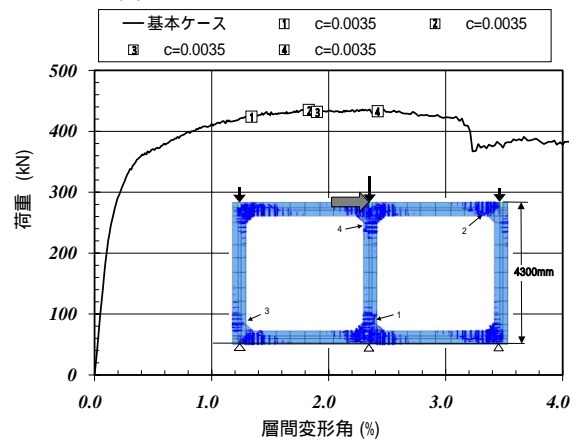


図-12 プッシュオーバー解析モデル



(a) 最大圧縮ひずみ発生時点と発生箇所



(b) 圧縮ひずみ発生順序と発生箇所

図-13 プッシュオーバー解析結果(基本ケース)

b) パラメータスタディによる限界値の妥当性の確認

ここでは、構造諸元や構造形式、材料物性、載荷条件、境界条件などを変化させて、鉄筋コンクリート製ボックスラーメン構造に対してプッシュオーバー解析によるパラメータスタディを実施した。

実施した解析ケースの一覧を表-4に示す。全解析ケースとも、要素のガウス点のひずみレベルが、圧縮ひずみ $\epsilon_c = 0.1$, 引張ひずみ $\epsilon_t = 0.1$, せん断ひずみ $\epsilon_{sh} = 0.1$ という大きめの限界値を入れて解析しており、一箇所でもどれかの限界値に達した時点で解析を終了している。全ケースとも、解析結果の荷重 - 層間変形角を示す図面上で圧縮縁コンクリートひずみ 1% (10000×10^{-6}) が発生する時点の評価した。

解析結果の一覧を図-14に示す。図中の限界層間変形角は、解析において圧縮縁コンクリートひずみ 1% が発生する時点の層間変形角を示している。これらの解析結果では、圧縮縁コンクリートひずみ 1% (10000×10^{-6}) が発生する時点は、構造物全体変位に対して概ね最大耐力の領域にあり、このひずみレベルまでは収束誤差が特に悪くなることもなく、安定的な解を得ることが可能であった。解析から算出された限界層間変形角は、いずれも場合も 1/100 以上であり、構造物が崩壊しないことを判断する目安として層間変形角 1/100 は安全側であることが確認できた。

表-4 解析ケース

検討項目	ケース詳細	パラメータ	ケース名
部材厚 1 (土かぶり一定)	部材厚 ¹⁾ (cm)	40, 60, 80	A-1 ~ A-3
部材厚 2 (軸力比一定)	部材厚(cm)	40, 60, 80	B-1 ~ B-3
寸法	部材厚(cm)	60(かぶり 10cm), 120(単純に 2 倍), 120(かぶり 10cm)	C-1 ~ C-3
上載圧	土かぶり厚(m)	0, 10.7, 21.4	D-1 ~ D-3
横連数	連数	一連, 二連, 四連	E-1 ~ E-3
縦連数	連数	一連, 二連	F-1 ~ F-2
縦横比 ²⁾ (a/b)	上載圧無	縦横 1 倍, 横 1.5 倍, 縦 1.5 倍	G-1 ~ G-3
載荷形態	交番載荷	単調載荷, 交番載荷	H-1 ~ H-2
部材厚が異なる場合 1	上載圧無	全部材 40cm, 隔壁 ³⁾ 60cm, 側壁 ³⁾ 60cm	I-1 ~ I-3
部材厚が異なる場合 2	上載圧無	全部材 60cm, 側壁 40cm, 隔壁 40cm	G-1 ~ G-3
コンクリート圧縮強度	$f_c=24\text{N/mm}^2$	0.8 倍, 1 倍, 2 倍	K-1 ~ K-3
コンクリート引張強度	$f_t=1.9\text{N/mm}^2$	0.8 倍, 1 倍, 2 倍	L-1 ~ L-3
鉄筋量	鉄筋径	D10, D13, D16	M-1 ~ M-3
鉄筋降伏強度	規格	SD295, SD345, SD390	N-1 ~ N-3
ハンチの有無		ハンチ有, ハンチ無	O-1 ~ O-2
底面固定条件		鉛直下端固定, 底面完全固定	P-1 ~ P-2
複雑な構造形式	横八連縦二連		Q-1

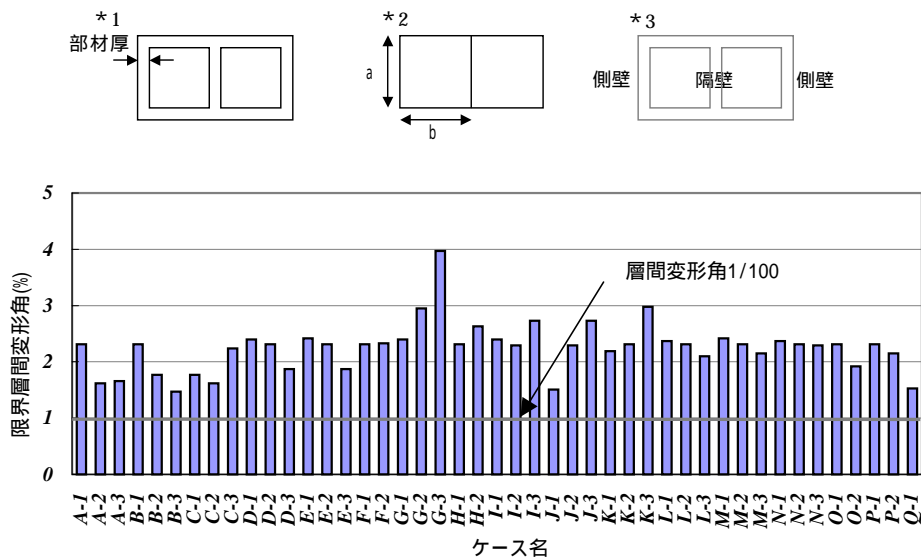


図-14 解析結果一覧

6. まとめ

本研究の範囲において明らかになったことをまとめると、以下ようになる。

曲げ破壊先行型のRC製ボックスラーメン構造が横断面方向に崩壊しないことを保証できる限界状態を、「かぶりコンクリートの剥落」時点とした。この限界状態を照査するための評価指標とその限界値として、コンクリートの圧縮ひずみ 1%(10000×10^{-6})および層間変形角 1/100を選定した。

ボックスラーメン構造の限界状態と損傷状態の対応関係を明らかにするために、既往の静的載荷試験結果のシミュレーション解析を実施した。この結果から、本報告書で使用した材料非線形モデルでは、かぶりコンクリートの剥落に対応した圧縮縁コンクリートひずみ 1%(10000×10^{-6})を限界値とすれば、高次不静定構造である二次元鉄筋コンクリート製ボックスラーメン構造物では、構造

物の荷重 - 変位関係において概ね最大耐力の領域に限界状態を設定したことに相当することを見出した。

種々の構造形式や構造諸元を持つボックスラーメン構造に対して、荷重を簡略化した構造物単体の静的なプッシュオーバー解析によるパラメータスタディを実施した。その結果、曲げ破壊先行型の鉄筋コンクリート製ボックスラーメン構造が横断面方向に崩壊しないことを判断する目安として、層間変形角 1/100 は安全側であることを示した。

謝辞：本研究は電力9社と日本原子力発電（株）による電力共通研究「原子力発電所鉄筋コンクリート製地中構造物の耐震性能照査法の高度化研究」の一部として実施しました。本研究の関係各位に謝意を表す次第であります。また、研究の実施にあたり、東京大学前川宏一教授には解析プログラムを使用させていただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) コンクリート構造物の次世代設計法のゆくえ：土木学会平成 9 年度全国大会，研究討論会資料
- 2) 原子力土木委員会・限界状態設計部会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全性照査マニュアル，土木学会，1992.
- 3) 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・同マニュアル，2002.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2002
- 5) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 - 耐震設計，1998.
- 6) 土木学会・エネルギー土木委員会：LNG 地下タンク躯体の構造性能照査指針，コンクリートライブラリー98，1999.
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書・耐震性能照査編[平成 14 年制定]，土木学会コンクリート委員会，2002.
- 8) 本田国保，足立正信，石川博之，長谷川俊昭：水平載荷試験によるボックスカルパートの変形性能の実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.1261-1266，1999.
- 9) 仲村治朗，橋泰久，平松住雄：既設地中構造物を用いた耐震実験，電力土木，No.288，pp.54-58，2000.
- 10) 曾良岡宏，足立正信，本田国保，田中浩一：地中ボックスカルパートの変形性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.3，pp.1123-1128，1999.
- 11) 電力中央研究所内部資料
- 12) 平松良雄，岡田清，岡行俊，小柳治，水田義明：剛性試験機的设计・製作とコンクリートの剛性試験結果について，材料 Vol.24，260号，pp.447-454，1975.
- 13) 谷川恭雄，西川公三，小坂義夫：高剛性変位速度制御圧縮試験機の試作・開発並びにコンクリートの塑性変形挙動に関する複合材料論的考察，日本建築学会論文報告集 260号，pp.9-19，1977.
- 14) 小坂義夫，谷川恭雄，山田和夫，畑中重光：多軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動に関する研究，第 5 回日本コンクリート学会年次講演会講演論文集，pp.133-136，1983.
- 15) 宮川義範，松尾豊史，末広俊夫，松本恭明：ボックスカルパートの水平載荷試験とその解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，pp.241-246，2000.
- 16) 遠藤達巳，坂上明，竹内幹雄，岩楯敞広：耐震性向上構造形式を取り入れたボックスカルパートの載荷実験，第 24 回地震工学研究発表会講演論文集，pp.805-808，1997.
- 17) 武田智吉，石川博之，足立正信：鉄筋コンクリート製ボックスカルパートの非線形挙動の定量的評価，電力土木，No.279，pp.72-76，1999.
- 18) 平松住雄，橋泰久，秋山伸一，荒添正棋：実際に使用されてきた地中構造物を用いた地震時耐力・変形性能照査に関する載荷実験，第 1 回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災向上に関するシンポジウム論文集，pp.175-178，2000.
- 19) 石川博之，末広俊夫，金津努，遠藤達巳，松本敏克：鉄筋コンクリート製地中構造物の変形性状と損傷状態に関わる実験的考察，第 26 回地震工学研究発表会論文集，2001.
- 20) 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.
- 21) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針(案)・同解説，1997.
- 22) 松尾豊史，遠藤達巳，大友敬三，福本彦吉：鉄筋コンクリート製地中構造物の耐震性能照査法の開発(その 4) 材料非線形モデルに基づいた限界状態の設定，第 11 回日本地震工学シンポジウム，pp.1113-1118，2002.

(2003. 6. 30 受付)

STUDY ON THE RATIONAL CRITERION FOR SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION OF REINFORCED CONCRETE UNDERGROUND STRUCTURES

Toyofumi MATSUO, Tsutomu KANAZU, Keizo OHTOMO and Hikoyoshi FUKUMOTO

The present paper discusses the stream ling criterion for seismic performance evaluation on RC box culvert type structures. To validate the nonlinear RC constitutive model, the past static loading tests on RC box culvert specimens were numerically correlated. The numerical analyses for reinforced concrete ducts with various dimensions and configuration were carried out to determine a criterion of ultimate state of those structures. Consequently, nonlinear RC constitutive model is found to be valid for analyzing dynamic soil-structure interaction. In addition, concrete compressive strain of 1% and deformation angle of 1/100 are considered to be reasonable for expressing the ultimate state of RC box type structures.