

図-2 解析モデル図（駅舎構造物）

表-1 地盤の初期物性⁴⁾

地層区分	深度 (GL.m)	土質	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 V_s (m/sec)	せん断弾性係数 G_0 (N/mm ²)	ポアソン比 ν
層1	2.1	シルト	19.0	140	38.0	0.333
層2	5.2	砂質土	19.0	140	38.0	0.488
層3	8.4	砂質土	19.0	170	56.0	0.493
層4	11.5	粘性土	19.0	190	70.0	0.494
層5	17.4	粘性土	19.0	240	112.0	0.490
層6	39.4	礫	20.0	330	222.0	0.487
基礎	—	—	21.0	500	535.0	0.470

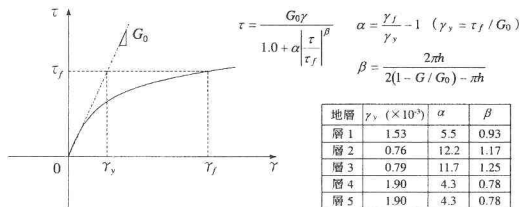


図-3 地盤の非線形特性（R-Oモデル）

する詳細な検討をおこなっている。ここでは、簡単にその概要を示し、後の比較検討の参考としたい。

(2) 地震応答解析

構造物の動的挙動を把握するために、地盤・構造物連成系としてモデル化し、地盤および構造物材の非線形性を考慮した地震応答解析を実施した。解析モデルは、地盤を平面ひずみ要素、構造物をはり要素とし、底面粘性境界、側方粘性境界を用いた。解析モデルは図-2のとおりである。

地盤の速度構造や物性は既往の研究⁷⁾と同一とした。地盤の初期物性を表-1に示す。表層地盤の非線形性は、図-3に示すR-Oモデルにより表現した。

RC部材の曲げに関する非線形性は軸力変動トリリニア型のM-φ曲線を用いた。各勾配は、ひび割れ、鉄筋降伏、終局の各特性点を結ぶものとして定義した。図-4に解析に用いたM-φモデルの一例を示す。せん断については線形として扱った。

検討用地震動は、地中観測波に基づく地震動を選定した⁸⁾。図-5に露頭波としての加速度時刻歴波形（2E波）を示す。これらを解析モデルの底面粘性境

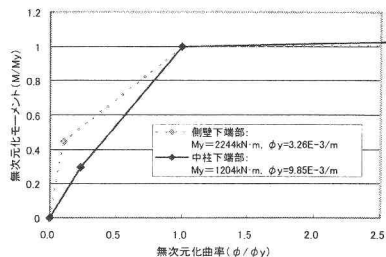


図-4 部材の非線形特性

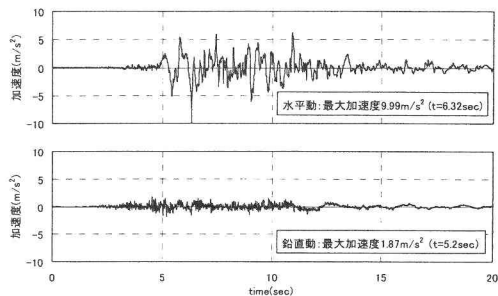


図-5 入力地震動の時刻歴波形

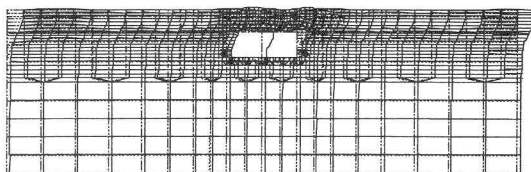


図-6 最大変形図

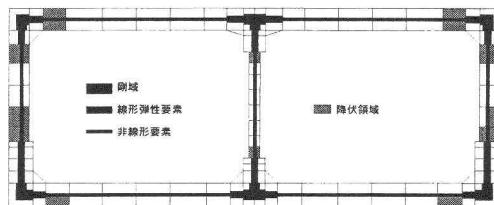


図-7 構造物の塑性状況

界を介して、水平動、鉛直動を同時に入力した。

(3) 地震応答解析結果

地盤・構造物系の最大変形図を図-6に示す。表層地盤が大きく変形しており、地表面変位は30cm程度である。1次のせん断変形モードが卓越しているようであり、構造物変形は地盤変形に追従している様子が伺える。また、構造物の最大水平層間変位は15cm程度であり、層間変形角は0.02程度となる。文献¹⁾では、構造物の崩壊の目安として、限界の層

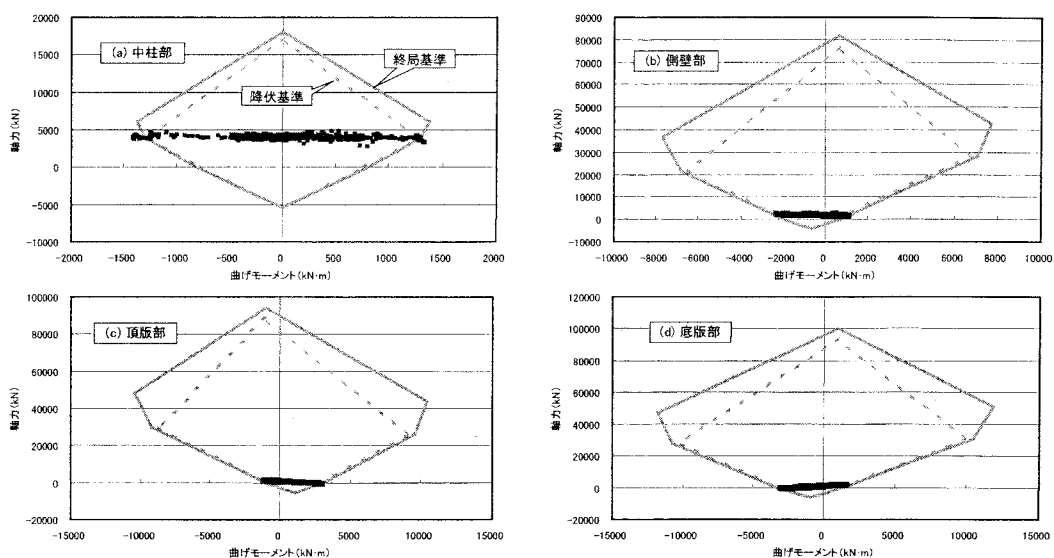


図-8 断面力履歴 (駅舎構造物)

間変形角を示している。条件にもよるがその値は0.01~0.02程度である。したがって、構造物は、限界状態に近い状態にあると考えられる。

構造物の損傷状況を図-7に示す。ほぼすべての隅角部付近で鉄筋降伏が生じ、塑性化の程度が大きいことが示されている。

(4) 断面力の履歴挙動

a) 終局破壊基準

図-8は曲げモーメント M と軸力 N の相関図である。降伏および終局の破壊基準を併記している。評価対象とした箇所は損傷が大きいところである。ここで、降伏の破壊基準とは、引張側もしくは圧縮側の鉄筋が降伏する場合であり、終局の破壊基準とは、引張側で鉄筋が降伏し圧縮側でコンクリートの圧縮縁が破壊する場合である。最大曲げ耐力を与える時点は、釣合い破壊状態と呼ばれ、引張側の鉄筋降伏と圧縮側コンクリート破壊が同時に生起するため、脆性的な挙動を示す。コンクリート標準示方書では、この状態を回避するように最大鉄筋量を規定している⁹⁾。

b) 地盤に接しない部材での履歴挙動

中柱は地盤に接しておらず、主として部材端から変位荷重を受ける部材である。相関図において終局破壊基準に達し、明らかに終局曲げ破壊に至ったと判定される。その履歴は、多少の軸力の変動を伴うものの、釣合い破壊時の断面耐力の大きさにくらべれば軸力変動量は小さく、ほぼ軸力が一定の状態で見直線的に推移していることがわかる。

c) 地盤に接する部材での履歴挙動

中柱以外の地盤に接する部材は、主として部材端

からの変位荷重と地盤反力をうける部材であるが、これについても鉄筋降伏に至るほど十分に大きな断面力となっている。それらの履歴については、曲げモーメント M と軸力 N の増分がほぼ直線状に推移しており、ある勾配を有する N/M 比が定義できそうである。この値は慣用的に用いられる偏心量 e （もしくは曲げ軸力比 $=M/N$ ）の逆数となっている。中柱と比較して N/M 比の勾配が多少とも大きくなるのは、これらの部材が地盤に接しており、土圧の影響を受けるためと考えられる。

3. 構造形式と部材特性の影響

ここでは、多様な構造形式や部材特性が異なる場合においての曲げモーメント M と軸力 N の相関関係の傾向を把握する観点から、半地下式構造としての地下鉄構造物、および、発電用水路構造物を採り上げ、2と同様な検討を実施した。

具体的には、駅舎構造物の1層2連ボックスラーメン構造を基本として、構造形式（多層多連型になった場合や中壁を有する場合）、埋設位置や部材厚などの違いであるが、それらは剛性や軸力レベル、地盤反力の有無等により特徴づけられる。このような構造物について、地盤・構造物連成系の非線形地震応答解析を実施し、それに基づいて断面力の履歴特性を評価した。

(1) 対象とする構造形式と条件

a) 半地下式の地下鉄構造物

検討対象とした半地下式の地下鉄構造物を図-9に

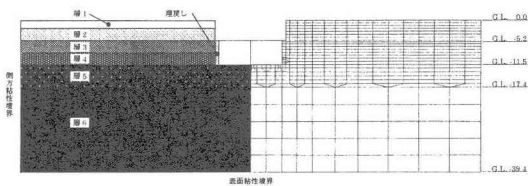


図-9 地下鉄構造物の例（半地下式）

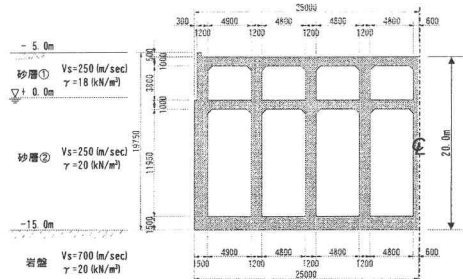


図-10 発電用水路構造物の例（取水ピット・半地下式）

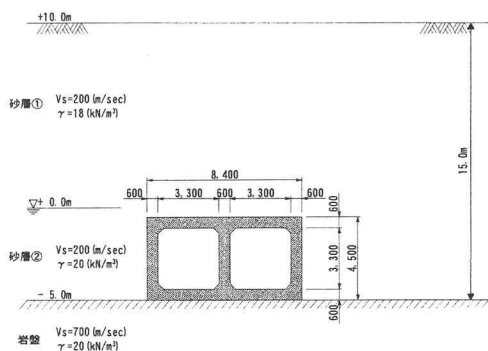


図-11 発電用水路構造物の例（海水管ダクト・地下式）

示す。ここでの半地下式とは、地下区間への導入部や掘割区間等の構造物を想定している。前述した地下式の駅舎構造物とは形状や寸法は同一で、上載土を剥ぎ取った地盤条件となっている。剥ぎ取られた部分の側面については、本来は連続地中壁等で崩れないような構造が施されるが、地下式との比較のため、解析モデルとしては新たな構造は設けず、側方の自由地盤と同一変位を有するような拘束条件を付与した。なお、これら以外の条件については先の検討と同一である。

b) 発電用水路構造物（半地下式・地下式）

検討対象とする発電用水路構造物は、原子力発電所の屋外重要土木構造物のうち、代表的な構造物である取水ピットと海水管ダクトの2種類を採り上げた¹⁰⁾。

取水ピットは、半地下式であり、その例を図-10

に示す。構造形式は、2層8連のボックスラーメン構造となっており、底版が基盤面に岩着している。巨大地震である設計用限界地震よりもたらされる基準地震動 S_2 に耐え得る構造であり、部材厚も大きく比較的剛である。中間はり・柱部材は壁構造（中床版・隔壁）であり地下鉄構造物の中柱形式とは異なっている。また、埋設位置が深く、部材に作用する土圧範囲が大きいこと、内容水による動水圧が作用すること、などが特徴となる。

海水管ダクトは、地下式であり、その例を図-11に示す。構造形式は、地下鉄構造物と同様の1層2連のボックスラーメン構造となっており、底版が基盤面に岩着している。部材厚は同程度であるが、中壁形式（隔壁）であり駅舎構造物の中柱形式とは異なっている。また、埋設位置が深く、部材に作用する土圧が大きいこと、などが特徴となる。

取水ピットと海水管ダクトの解析方法は地下鉄構造物と同じであるが、詳細な解析条件については、文献10)で示されている検討条件にしたがうものとした。なお、入力地震動は地下鉄構造物の検討と同一とした。

(2) 解析結果と考察

半地下式の地下鉄構造物および発電用水路構造物（取水ピット、海水管ダクト）の検討の結果、ほぼすべての隅角部付近で鉄筋が降伏していた。なお、各部材のM-N履歴の評価位置は塑性化が進展した部位とした。

a) 半地下式の地下鉄構造物

半地下式の地下鉄構造物の曲げモーメントMと軸力Nの相関図の例を図-12に示す。地下式の駅舎構造物の場合と比べ、上載土がないことにより、鉛直部材の軸力が0程度まで低下している。相関図において終局破壊基準に達し、終局曲げ破壊に至ったと判定される。その履歴は、多少の軸力の変動を伴うものの、ほぼ軸力が一定の状態で直線的に推移していることがわかる。中柱以外の部材では、軸力変動も低下し、ほぼ軸力一定の履歴となり、曲げモーメントMも小さくなっている。履歴については、ある勾配のN/M比を持ってほぼ直線状に推移している。いずれにせよ、MとNの相関についての基本的な傾向は地下式構造物の場合と変わりはなく、MとNの履歴については線形の相関が認められる。

b) 発電用水路構造物（半地下式・地下式）

取水ピットの曲げモーメントMと軸力Nの相関図の例を図-13に示す。隔壁の履歴は、ほぼ軸力Nが一定の状態で直線的に推移していることがわかる。底版ではその履歴はある勾配のN/M比を持ってほぼ直

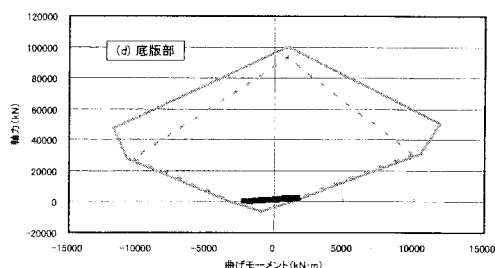
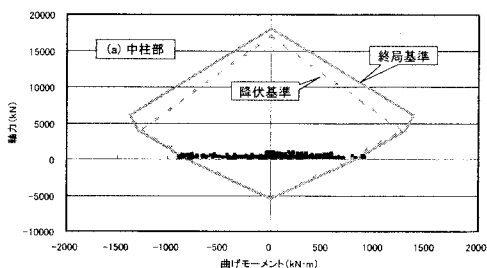


図-12 断面力履歴（地下鉄構造物・半地下式）

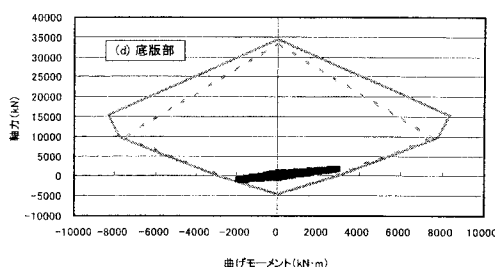
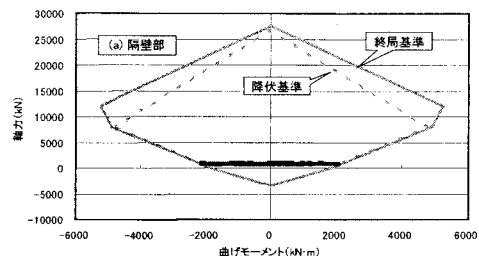


図-13 断面力履歴（取水ピット・半地下式）

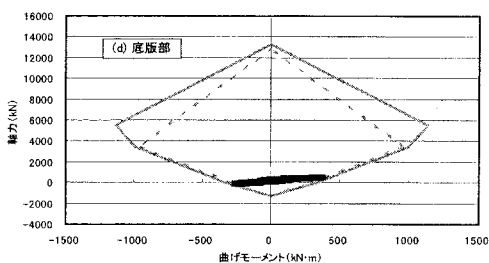
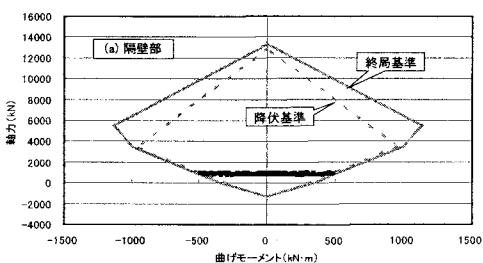


図-14 断面力履歴（海水管ダクト・地下式）

線状に推移している。その勾配の大きさは、地下鉄構造物の場合に比べてやや大きいようである。

海水管ダクトの曲げモーメント M と軸力 N の相関図の例を図-14に示す。隔壁の履歴は、ほぼ軸力が一定の状態では直線的に推移していることがわかる。底版ではある勾配の N/M 比を持ってほぼ直線状に推移している。その勾配の大きさは、地下鉄構造物の場合に比べてが同程度か多少大きいように見受けられる。

異なる構造形式を持つ発電用水路構造物についても、 M と N の相関についての基本的な傾向は地下鉄構造物の場合と変わりはなく、 M と N の履歴については線形の相関が認められる。

4. 箱型地中構造物の N/M 履歴の総合評価

以上の検討により、構造物の曲げモーメント M と

軸力 N の履歴経路は、非線形性が著しくなる系でありながら、構造形式や部材特性に依らずほぼ直線状となることが明らかになった。以下に、 N/M 比の勾配について取りまとめる。

図-15に4つの解析ケースについての N/M 比を部材ごとに示した。ただし、縦軸の N/M 比は、釣合い破壊時における断面耐力比 N_u/M_u で除して基準化している。また、個々のケースの N/M 比は、 M と N の相関図において、全時刻歴での最大曲げモーメント時と最小曲げモーメント時の2つの時点間の断面力増分の勾配として定義している。中柱や隔壁での基準化 N/M 比は十分小さいことがわかる。一方、地盤に接する部材（側壁、頂版、底版等）では基準化 N/M 比は比較的大きく、軸力と曲げモーメントが連成する結果となっている。しかし、部材ごとに N/M 比は多少変化するものの、釣合い破壊時の断面耐力を用いた N_u/M_u 比と比較すると小さいものと考えること

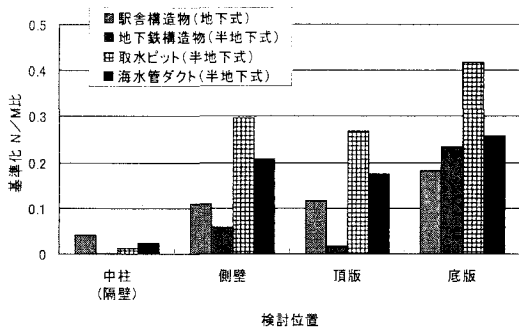


図-15 箱型地中構造物のN/M比のまとめ

ができる。

5. おわりに

地下鉄構造物および発電用水路構造物を対象としたケース・スタディを通じて、構造物の曲げモーメント M と軸力 N の履歴とその相関についての考察を行った。対象構造物は層間変形に伴う断面力が支配的であり、損傷の程度も大きいことが特徴であるが、検討の範囲内で以下のことが明らかになった。

- ① 地盤やRC部材の非線形性が顕著であり、連成作用が伴うことにより現象が複雑となることが予想された系であるにもかかわらず、曲げモーメント M と軸力 N の履歴経路は、部材に依らずほぼ直線状に推移している。
- ② 地盤と接しない部材とそうでない部材とで軸力と曲げモーメントの比 N/M の勾配が異なる傾向にある。すなわち、中柱や隔壁等の地盤に接しない部材ではほぼ軸力一定の履歴を示すが、底板等の地盤に接する部材ではある勾配を有する N/M 比となる。
- ③ 終局破壊判定の観点から、RC部材の設計上重要な釣合い破壊時における耐力 N_u/M_u 比に比べて、応答の N/M 比は小さい傾向にある。

特定の地中構造物のケーススタディーを基にした考察であることに留意する必要があることはいうまでもないが、今後は、地震動の影響や、断面力の履歴経路と破壊形態との関連等について検討を進めていく必要があると考えている。

参考文献

- 1) 土木学会：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。
- 2) 土木学会：トンネルライブラリー第9号，開削トンネルの耐震設計，1998。
- 3) 阪神・淡路大震災調査報告 土木構造物の被害原因の分析 第5章，pp.277-376，1999。
- 4) コンクリート技術シリーズ49，阪神淡路大震災の被害分析に基づくコンクリート構造物の耐震性能照査方法の検証，pp.277-299，2002。
- 5) 松本敏克，大友敬三，松井 淳，坂田 勉：箱形地中構造物の地震時断面力の履歴特性に関する解析的考察，応用力学論文集，Vol.7，pp.1337-1344，2004。
- 6) 坂田 勉，松本敏克，大友敬三：箱形地中構造物の地震時断面力の履歴挙動について，第59回年次学術講演会講演概要集CD-ROM，2004。
- 7) 矢的照夫，梅原俊夫，青木一二三，中村 晋，江崎順一，末富岩雄：兵庫県南部地震による神戸高速鉄道・大開駅の被害とその要因分析，土木学会論文集，No.537/I-35，pp. 303-320，1996。
- 8) 酒井久和，澤田純男，土岐憲三：ポートアイランドにおける時間領域での基盤入力地震動の推定，土木学会論文集，No.612/I-46，pp. 373-378，1999。
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕，pp.63-64，2002
- 10) 原子力土木委員会・耐震性能評価部会：原子力発電所屋外重要土木構造物における動的上下動の評価，土木学会論文集，No.760/V-63，pp.1-12，2004。