

論文 地中RC構造物の耐震一次診断手法に関する研究

安部 明夫*1・本田 国保*2・足立 正信*3・弘重 智彦*4

要旨：本研究はRC構造物の耐震診断の効率化を図るため、地中ボックスカルバートと立坑の耐震一次診断手法について検討した。提案する耐震一次診断手法は、構造物の材料強度と鉄筋量から定めた構造特性値と、構造物の損傷度に対応した地盤ひずみとの関係をノモグラム化し、これを用いて耐震性を判定するものである。本手法の適用性については、兵庫県南部地震で被災した大開駅の耐震性を判定し、実際の被災状況と一致していることを示した。

キーワード：耐震一次診断, ボックスカルバート, 立坑, せん断破壊, 応答係数

1. はじめに

地中RC構造物の耐震診断は地盤-構造物連成の非線形解析結果に基づいて行うのが望ましいが、多大な時間と費用を必要とする。土木学会では明らかに耐震補強の不要なケースについて、一次診断法の試案¹⁾を提示しているが、地中RC構造物では地盤との相互作用を考慮して、様々な構造物に対して損傷レベルを速やかに判定できる簡易手法を構築する必要がある。

本研究は耐震診断の効率化を図るため、地中RC構造物のうちボックスカルバートと立坑を対象に、構造物の耐震性を簡易にかつ精度良く診断できる診断手法について検討した。

2. 耐震一次診断の構築

2.1 概念

図-1に地中RC構造物の耐震一次診断手法の概念を示す。本手法は構造物の材料強度と鉄筋量から定めた構造特性値と、地盤ひずみとの関係をノモグラム化し、これを用いて構造物の耐震診断を行うものである。部材の耐力や変形能力は材料強度と鉄筋量に支配されると考え、構造特性値を設定した。構造特性値が大きくなれば、構造物の耐力は大きくなるが、脆性的な破

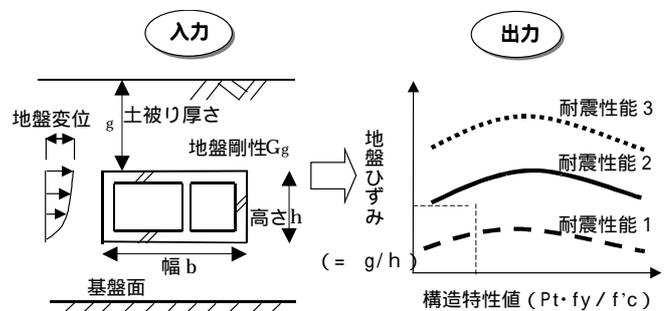


図-1 地中RC構造物の一次診断手法の概念

壊挙動を呈することになる。図-1に示す曲線は各耐震性能の限界値を満足する性能曲線であり、印は、所与の地震動に対して耐震性能1は満足しないが、耐震性能2は満足することを示している。なお、耐震性能はコンクリート標準示方書耐震設計編²⁾に示されている耐震性能1～3の考え方を基本としている。

2.2 構築手順

図-2に本手法の構築手順を示す。

限界変位の検討

各耐震性能に対応する限界値は、構造物の変位に起因するひずみを指標として設定する。次に、その限界値を満たす構造物の限界変位 s_i と等価剛性 G_{si} は、構造物単体モデルのプッシュオーバー解析から求められる図-2に示す構

*1 東電設計(株)技術開発本部土木技術部耐震評価グループ 修士(工学) (正会員)

*2 東電設計(株)技術開発本部 (正会員)

*3 東電設計(株)技術開発本部土木技術部 (正会員)

*4 東京電力(株)電力技術研究所耐震グループ 修士(工学) (正会員)

造物の荷重 - 変位関係（以下 P- 関係と称す）から算定する。

地盤の応答変位の算定

で求めた構造物の等価剛性 G_{si} と地盤剛性 G_g から、図-3 に示す応答係数 r_i を算定し、この応答係数と限界変位 s_i より地盤の応答変位 g_i ($g_i = s_i / r_i$) を求める。

耐震一次診断ノモグラムの作成

材料強度と鉄筋量から定めた構造特性値 ($P_t \cdot f_y / f'_c, P_t$; 引張鉄筋比, f_y ; 鉄筋の降伏強度, f'_c ; コンクリートの圧縮強度) と、で求めた地盤変位を限界地盤ひずみ i ($= g_i / h$) に変換して、図-1 に示す耐震一次診断ノモグラムを作成する。

3. ボックスカルバートの耐震一次診断

2 連ボックスカルバートを対象に図-4 に示す設置条件で検討を行った。

3.1 限界変位の検討

(1) 耐震性能を満たす限界値の設定

本手法は構造物の変形性能に着目しているため、変位に起因して躯体に生じるひずみを耐震性能指標とした。各耐震性能に対応する限界値を表-1 に示す。この限界値はボックスカルバートを対象とした気中載荷実験³⁾と非線形 FEM 解析によるシミュレーション⁴⁾から設定した。

耐震性能 1 は鉄筋が降伏する時点とした。耐震性能 2 は、実験で観察されたかぶりコンクリートが剥離する状態と、その状態をシミュレーションした時の最大引張ひずみが 20,000 μ であったため、この 20,000 μ を限界値とした。なお、この状態は試験体の P- 関係上でほぼ最大荷重点付近であった。耐震性能 3 は、実験では曲げ破壊モードに対して、耐震性能 2 の 2 倍の変位が生じても試験体は崩壊せず、上載荷重を保持している状態であったため、40,000 μ を耐震性能 3 の限界値とした。

一方、せん断破壊モードについては、実規模の気中載荷実験とシミュレーション結果⁵⁾に基づき、P- 関係において荷重が急激に低下する

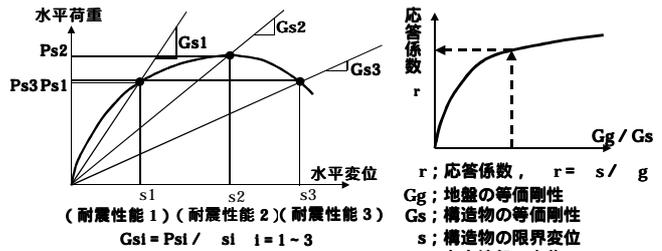


図-2 構造物の P- 関係と等価剛性の算定

図-3 応答係数 r の算定

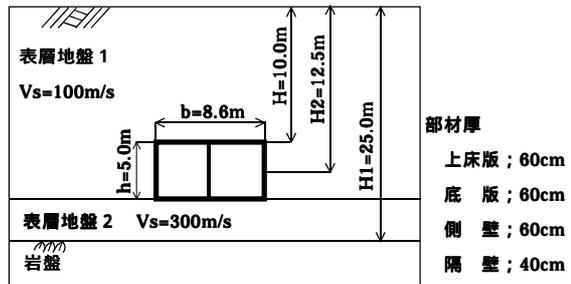


図-4 対象構造物および設置条件

表-1 解析上の限界値

耐震性能		限界値
耐震性能 1	健全 (補修不要)	鉄筋が降伏する
耐震性能 2	安定 (補強不要)	鉄筋の引張ひずみが 20000 μ に達する
耐震性能 3	曲げ破壊 (補強必要)	鉄筋の引張ひずみが 40000 μ に達する
	せん断破壊 (補強必要)	荷重 - 変位関係で荷重低下し、かつ、ひずみが急増する

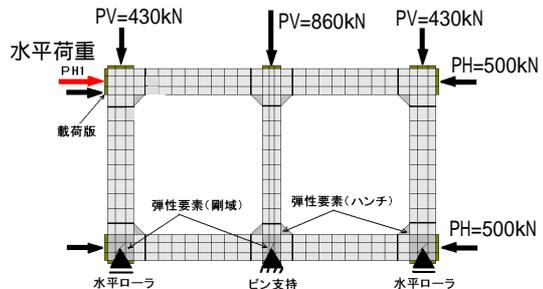


図-5 解析モデル

とともに、斜めひび割れ面直交方向の引張ひずみと平行方向のせん断ひずみが急増し始める現象が生じた時点とした。

(2) 限界変位の算定

ボックスカルバートの各耐震性能に対応する限界変位は、二次元非線形 FEM 解析⁶⁾を用いたプッシュオーバー解析により求めた。図-5 に解析モデルを示す。荷重は地中での地震時せん断変形を模擬するため、周辺地盤から常時作用する土圧を集中荷重で置き換えて載荷した。常

時荷重を載荷した後，この荷重を保持したまま上床版左端部に水平荷重を載荷した。

解析ではコンクリートの圧縮強度（18～40N/mm²），引張鉄筋比（0.25～2%），せん断補強鉄筋比（0，0.2%）をパラメータとした。

解析で得られた構造物の P- δ 関係を図-6 および図-7 に示す。同図には各耐震性能の限界値に達する時点を併記した。

せん断補強鉄筋がある場合

引張鉄筋比が大きくなるに従い 鉄筋降伏（耐震性能 1）の変位レベルも大きくなり，その値は 0.8～1.5cm である。耐震性能 2 は引張ひずみで 20,000 μ と規定したが，いずれのケースも P- δ 関係上のほぼ最大荷重点付近となっている。また，全てのケースが延性的な挙動を呈しているため，耐震性能 3 の変位レベルは耐震性能 2 のおおよそ 1.5～2 倍となっている。

せん断補強鉄筋が無い場合

鉄筋降伏時の荷重と変位はせん断補強鉄筋がある場合とほとんど同じである。また，引張鉄筋比が 0.25% と 1.0% で圧縮強度が 40N/mm² のケース以外は，斜めひび割れの発生とともに，荷重が急激に低下する脆性的な挙動となったため，耐震性能 2 と耐震性能 3 の変位レベルはほぼ同じとなっている。一方，延性的な挙動となるケースの耐震性能 3 の変位レベルは，最大荷重点の約 2 倍となり，せん断補強鉄筋がある場合と同じである。

3.2 地盤の応答変位の推定

本手法で用いる地盤変位は，構造物の変位から求める方法を用いているため，構造物と地盤の相互作用を考慮する必要がある。

西山ら⁷⁾は地盤変位と構造物変位の関係を(1)式のように定式化(記号は図-8 参照)しており，応答係数 r の推定にあたっては，地盤と構造物の剛性比，構造物の形状や地盤条件をパラメータとしている。そこで，著者らは上述した条件(図-4)に対して適用可能かを検討する必要があると考え，二次元非線形 FEM 解析を行って本研究で対象とする構造物への適用性を調べ

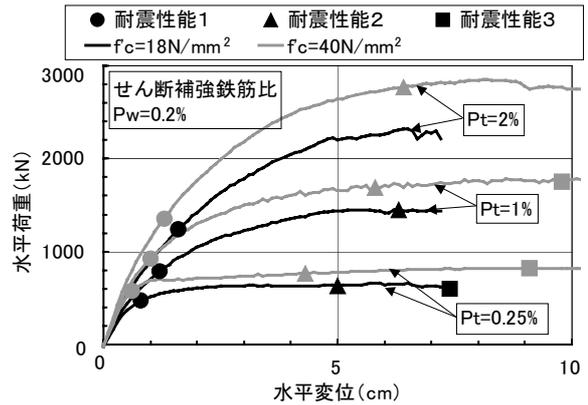


図-6 構造物の P- δ 関係 (せん断補強鉄筋がある場合)

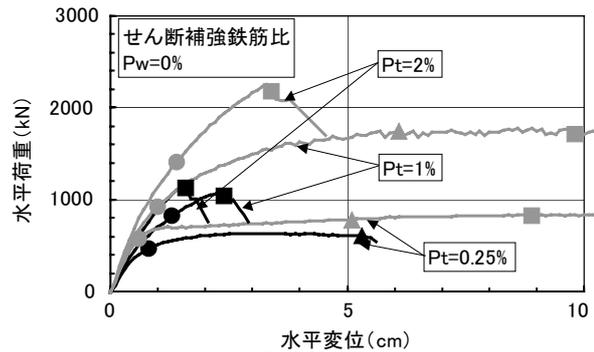


図-7 構造物の P- δ 関係 (せん断補強鉄筋が無い場合)

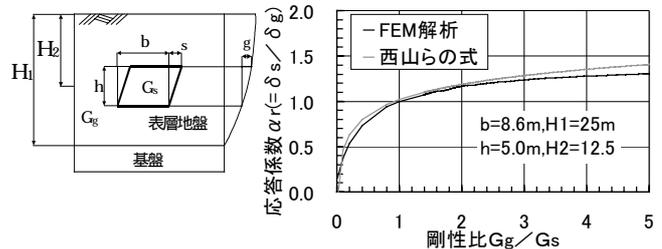


図-8 西山らの提案式と FEM 解析の比較

$$\delta_s = \alpha_r \times \delta_g \quad (1)$$

$$\alpha_r = 1.1 \times (a \ln(Gg / Gs) + b)$$

$$a = 0.091(b/h) + 0.053(H1/H2) - 0.07$$

$$b = -0.036(b/h) + 0.04(H1/H2) + 0.92$$

た。その結果を図-8 に示すが，両者は概ね一致していることから，西村らの方法により応答係数を求めることとした。

構造物の各耐震性能に対応するせん断剛性を 3.1 で述べた P- δ 関係から求まる割線せん断剛性 G_s と，地盤のせん断剛性 G_g を設定すれば，構造物に限界変位を生じさせる自由地盤の応答変位 g は，構造物の限界変位 s を応答係数

r で除すことにより予測できる。耐震一次診断ノモグラム縦軸の地盤ひずみは，この g を構造物の高さ h で除したものとする。

3.3 耐震一次診断ノモグラム

ボックスカルバートの耐震一次診断ノモグラムを図-9および図-10に示す。これらの図で横軸は構造特性値 ($P_t \cdot f_y / f_c$)、縦軸は対象構造物に対して考慮される自由地盤の地盤ひずみである。また、地盤のせん断波速度 V_s は 100m/sとした。なお、同図の曲線は各耐震性能の解析結果を回帰したものである。

図-9 はせん断補強鉄筋があるケースである。同図より、各耐震性能を満たす地盤ひずみは、構造特性値が大きくなるに従って大きくなる。これは、引張鉄筋比が大きくなるほど、構造特性値が大きくなり、各耐震性能を満たす荷重と変位が大きくなるためである。

同図には、コンクリート標準示方書耐震設計編に示される地中ボックスカルバートの設計例を併記した。設計例で用いられたレベル2地震動によって生じる地盤ひずみと構造特性値の場合、耐震性能2を満たす領域にあることがわかる。

図-10 はせん断補強鉄筋が無いケースである。同図より、耐震性能1を満たす地盤ひずみは、構造特性値が大きくなるに従って大きくなる。耐震性能2および耐震性能3は、構造特性値がそれぞれ0.15および0.1以上になると、各性能レベルを満たす地盤ひずみが急激に低下する。特に構造特性値が0.2以上では、耐震性能3を満たす地盤ひずみは耐震性能1とほぼ同じ値となっている。これは部材の鉄筋降伏とせん断破壊時の剛性と変位がほぼ同じためである。

同図には、兵庫県南部地震(1995)で崩壊した神戸高速鉄道の大開駅の中柱と崩壊しなかったトンネル一般部の中柱^{8),9)}を併記した(図中印)。大開駅の中柱の引張鉄筋比は2.6%、トンネル一般部の中柱は0.7%であり、大開駅の中柱はせん断破壊して崩壊に至ったが、トンネル一般部の中柱はひびわれが発生するものの、せん断破壊せず崩壊には至らなかった。同図より大開駅の中柱はせん断破壊領域すなわち耐震性能3を満足しない領域にあるが、トンネル一般

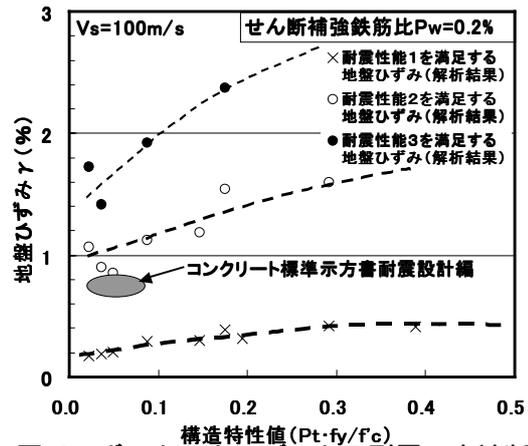


図-9 ボックスカルバートの耐震一次診断ノモグラム ($P_w=0.2\%$, $V_s=100\text{m/s}$)

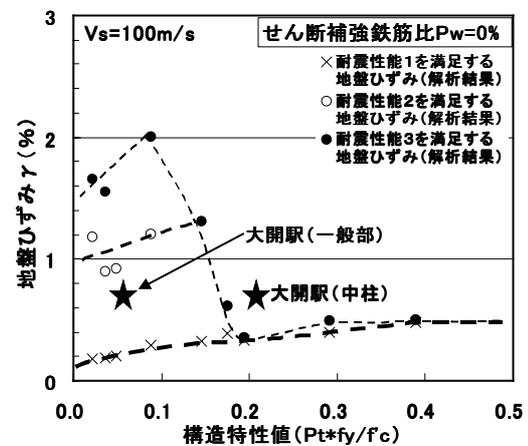


図-10 ボックスカルバートの耐震一次診断ノモグラム ($P_w=0\%$, $V_s=100\text{m/s}$)
 P_t : 引張鉄筋比
 f_y : 鉄筋の降伏点強度
 f_c : コンクリートの圧縮強度

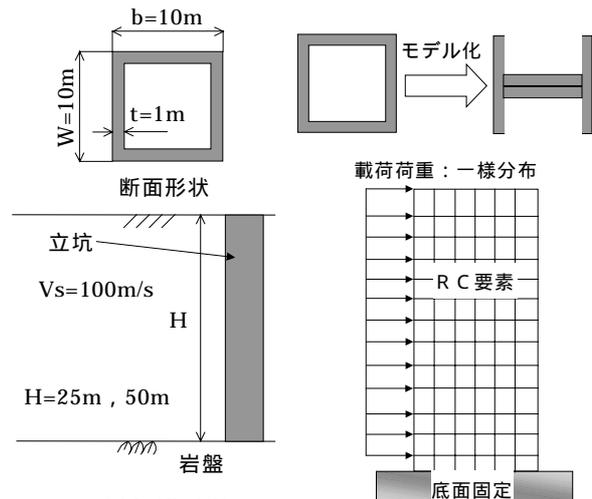


図-11 対象構造物および設置条件 図-12 解析モデル

部の中柱は耐震性能2を満たす領域にあり、せん断破壊しないと判定される。この結果は実際の被災状況の分析と一致している。

4. 立坑の耐震一次診断

本研究では、図-11 に示す高さ 25m と 50m の立坑の耐震一次診断手法について検討した。

4.1 限界変位の検討

(1) 耐震性能を満たす限界値の設定

立坑の各耐震性能に対応する限界値を表-2 に示す。耐震性能 1 は鉄筋が降伏する時点とした。耐震性能 2 に関しては、立坑を対象とした実験的研究が十分に行われていないが、LNG 地下タンク躯体の構造性能照査指針¹⁰⁾では最大耐力点以下で、コンクリートに圧縮破壊が生じない終局ひずみ 3500 μ としている。しかしながら、本研究では最大耐力点以降に圧縮ひずみが 3500 μ に達するケースもあった。また、最大耐力点以降に引張りひずみが 20,000 μ に達するケースもあり、これらの応答を考慮して、耐震性能 2 はコンクリートの圧縮ひずみが最大応力に対応するひずみ(コンクリートの圧縮強度に依存)に達した時点とした。耐震性能 3 に関しては、現状では限界値の設定が困難であると考え、検討しないものとした。

(2) 限界変位の算定

立坑の各耐震性能に対応する限界変位と等価剛性は二次元非線形 FEM 解析を用いて算定した。図-12 に解析モデルを示す。荷重は、この種の構造物の変位モードもせん断変形と考えられるため、立坑の側面に分布荷重を作用させた。

解析ではコンクリートの圧縮強度 (18 ~ 40N/mm²)、鉄筋比 (0.5 ~ 2%)、立坑の高さ (25m、50m) をパラメータとした。

解析で得られた構造物の P- 関係を図-13 および図-14 に示す。同図には各耐震性能の限界値に達する時点を併記した。

鉄筋比が大きくなるに従い、鉄筋降伏 (耐震性能 1) の変位レベルも大きくなる。耐震性能 2 は、いずれのケースとも P- 関係上で最大荷重点より若干小さくなる傾向を示している。また、鉄筋比が同じ場合は、コンクリートの圧縮強度が大きいほど変形能力が高くなる。

4.2 地盤の応答変位の推定

表-2 解析上の限界値

耐震性能		限界値
耐震性能 1	健全 (補修不要)	鉄筋が降伏する
耐震性能 2	安定 (補強不要)	最大応力に対応するひずみに達する

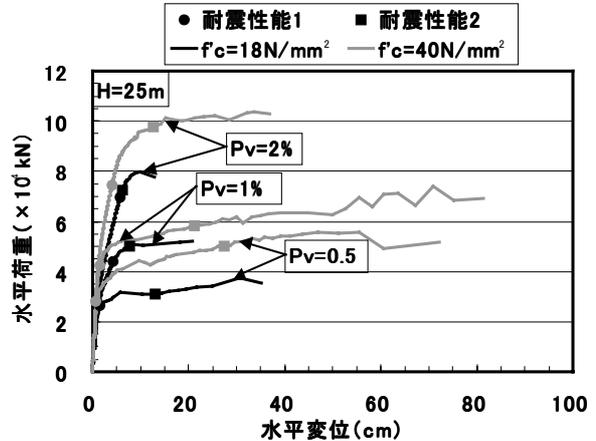


図-13 構造物の P- 関係 (H=25m)

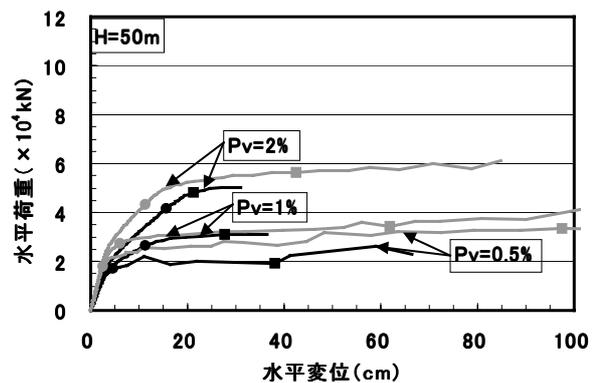


図-14 構造物の P- 関係 (H=50m)

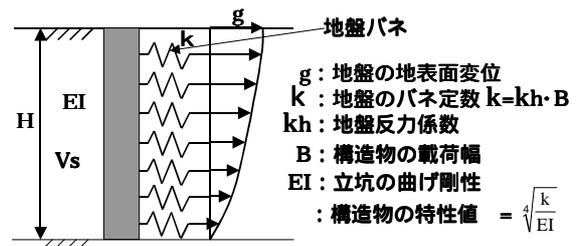


図-15 弾性床上的梁理論による立坑のモデル

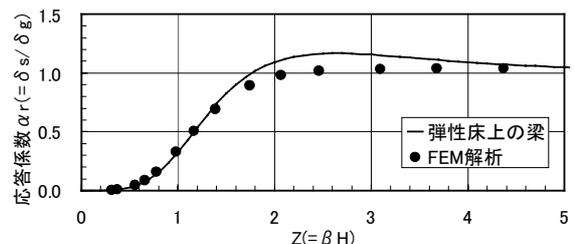


図-16 弾性床上的梁理論と FEM 解析の比較

西山らが提案した式は、ある程度偏平なカルバート構造を対象としたものであり、立坑のよ

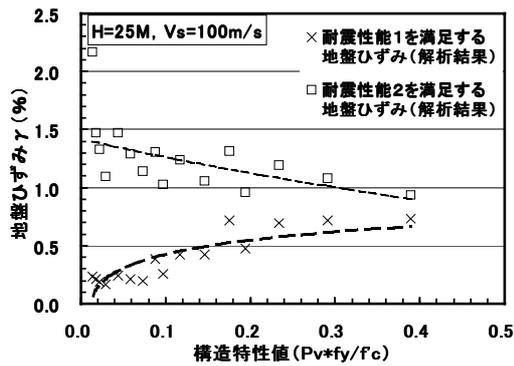


図-17 立坑の耐震一次診断ノモグラム (H=25M)

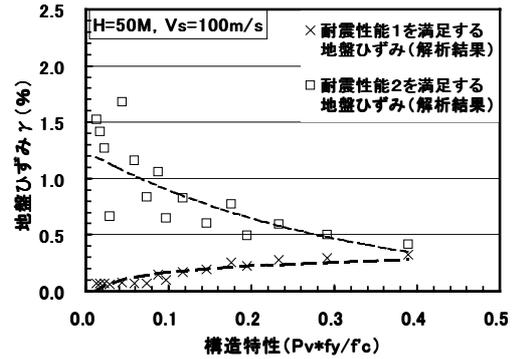


図-18 立坑の耐震一次診断ノモグラム (H=50M)

うな鉛直構造物に適用することには問題があると考えられる。そこで、立坑については図-15に示す弾性床上の梁理論を用いて応答係数を算定することとした。なお、この方法の妥当性を検証するために、二次元非線形 FEM 解析を行ったが、図-16に示すとおり両者はほぼ一致しており、弾性床上の梁理論を用いた応答係数は実用上十分な精度を有すると考えられる。

4.3 耐震一次診断ノモグラム

立坑の耐震一次診断ノモグラムを図-17および図-18に示す。これらの図で横軸は構造特性値 ($P_v \cdot f_y / f_c$)、縦軸は対象構造物に対して考慮される自由地盤の地盤ひずみである。また、地盤のせん断波速度 V_s は 100m/s とした。なお、同図の曲線は各耐震性能の解析結果を回帰したものである。

これらの図より、耐震性能 1 を満たす地盤ひずみは、構造特性値が大きくなれば徐々に大きくなるが、耐震性能 2 を満たす地盤ひずみは、構造特性値が大きくなると小さくなる。これは、コンクリートの圧縮強度が小さくなると各耐震性能を満たす変位と荷重が小さくなるが、コンクリートの圧縮強度が小さくなると、構造特性値が大きくなることと対応している。

5. まとめ

本研究では、ボックスカルバートならびに立坑の耐震性を簡易に精度良く評価するための耐震一次診断手法を検討した。本研究の範囲以内で得られた主な成果は以下のとおりである。

1) 地中構造物の耐震性は、構造物の変形性能に

着目して材料強度や鉄筋量から定めた構造特性値と自由地盤の応答変位を用いて概略評価できる。

2) 2 連ボックスカルバートの耐震性は、構造特性値が 0.1 を上回るとせん断補強鉄筋の有無が耐震性に及ぼす影響が大きくなる。

3) 地盤のせん断波速度が 100m/s 程度で、構造特性値が 0.1 以下の場合、構造物位置での自由地盤のせん断ひずみが 0.2% 以下であれば耐震性能 1, 1% 以下であれば耐震性能 2 を満足する可能性が高い。

4) 本研究で提案した耐震一次診断手法の適用性については、被害構造物および設計例との照合により確認した。

参考文献

- 1) 土木学会：「平成 8 年制定コンクリート標準示方書（耐震設計編）改定資料」，コンクリートライブラリー-87，1996
- 2) 土木学会：「コンクリート標準示方書（耐震設計編），平成 8 年制定」，1996
- 3) 本田国保，足立正信，石川博之，長谷川俊昭：「水平載荷によるボックスカルバ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
- 4) 飯塚敬一，足立正信，本田国保，武田智吉「FEM によるボックスカルバートの非線形挙動の分析」，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21, No.3，pp.1267-1272，1999
- 5) 曾良岡宏，足立正信，本田国保，田中浩一：「地中ボックスカルバ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.1123-1128，2001
- 6) 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
- 7) 西山誠治，加藤淳一，室谷耕輔，羽矢洋，西村昭彦：「地下構造物の簡易な応答値の推定法に関する一考察」，土木学会第 53 回年次学術講演会，pp.748-749，1998
- 8) 廣戸敏夫，梅原俊夫，青木一二三，中村普他：「神戸高速鉄道・大開駅の被害とその要因分析」，阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp.247-254，1996
- 9) Xuehui AN, Koichi MAEKAWA：「Numerical Evaluation of Overall Seismic Performance of Underground RC Structures」，第 2 回 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp.429-436，1997
- 10) 土木学会：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