

地中 RC 構造物の耐震一次診断手法

○安部明夫¹・本田国保¹・足立正信¹・嶋田昌義²・弘重智彦²

¹正会員 東電設計(株)技術開発本部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3丁目3番3号)

²正会員 東京電力(株)電力技術研究所 (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4番1号)

地中構造物の耐震診断では、地盤-構造物連成の非線形解析結果を用いて行うのが望ましいが、多大な時間と費用を要する。本研究では耐震診断の効率化を図るため、地中ボックスカルバートの耐震一次診断手法を構築した。その際、構造物の地震時応答変形は応答係数法を用いて地盤変位から推定し、構造物の変形性能は水平載荷実験および非線形解析から評価した。この診断手法の構築において、せん断補強鉄筋が無い構造物を対象としたケースでは、兵庫県南部地震で被災した開削トンネル中柱のせん断破壊を的確に予測できることがわかり、本診断手法の高い適用性が検証された。

Key Word : seismic primary diagnosis method, response coefficient method
shear failure, double box culvert

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を用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、構造物の形態と特性に応じた一次診断手法を早急に整備する必要があるとしており、様々な構造特性に対して所定の耐震性能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。

本研究で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(以下、構造物と称する)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一次診断手法を構築した。その際、構造物の地震時応答変形は応答係数法²⁾を用いて地盤変位から推定し、構造物の変形性能は既往の水平載荷実験および非線形 FEM 解析から評価した。

2. 耐震一次診断手法の構築

(1) 概念

図-1 に耐震一次診断手法の概念を示すが、本手法は構造物の引張鉄筋比や材料強度等の断面諸元と地震動によって生じる地盤変形(ひずみ)が与えられると、その地

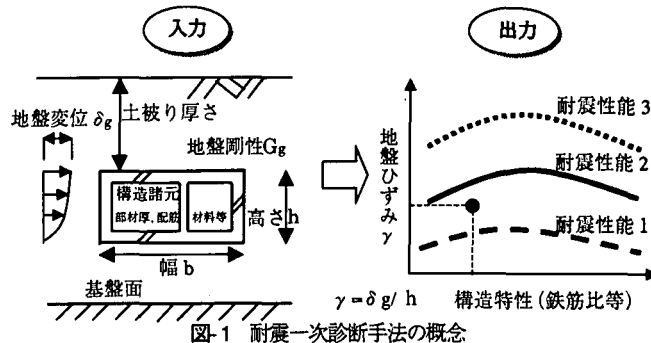


図-1 耐震一次診断手法の概念

震動に対する耐震性を即座に判定できるというものである。図中●印は、当該構造物は入力地震動の大きさ(地盤ひずみ γ で代表)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³⁾に示された耐震性能1~3を想定している。

(2) 構築手順

図-2 に本手法の構築手順を示す。

①ステップ1; 構造物の変形性能予測

構造物の荷重-変位関係を求め、各耐震性能を満足する限界変形 δ_{si} と等価せん断剛性 G_{si} を推定する。

②ステップ2; 構造物の応答変形予測

地盤条件を設定し、ステップ1で求めた構造物の等価

せん断剛性 G_s と地盤のせん断剛性 G_g より、応答係数 α_r を求め、ステップ1で求めた耐震性能1~3を満たす限界変形 δ_s を生じさせる地盤変位 δ_g ($\delta_g = \delta_s / \alpha_r$) を求める。

③ステップ3；耐震一次診断の作成

ステップ1で行った解析パラメータから構造特性 ($P_t \cdot f_y / f_c$, 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) を算出し、ステップ2で求めた各耐震性能を満足する限界の地盤ひずみ γ ($= \delta_g / h$) との関係を図化する。

(3) 耐震性能指標

構造物の各性能レベルを規定する解析上の限界値を表-1に示す。解析上の限界値はボックスカルバートの気中載荷実験結果⁴⁾と非線形FEM解析によるシミュレーション⁵⁾に基づいて設定した。この研究成果を要約すると、最大荷重点に達した時点ではかぶりコンクリートが剥離する直前の状態であり、この時鉄筋のひずみは約20,000 μ に達していた。一方、シミュレーションでも最大荷重点までは精度良く再現できており、この最大荷重点付近における要素の引張ひずみは20,000 μ に達しており実験とも整合することから、本研究では耐震性を評価する際の指標として要素のひずみに着目し、耐震性能2に相当する限界値として引張ひずみ20,000 μ を定めた。

また、ポストピーク領域については解析の評価が困難であったが、実験では曲げ破壊モードに対しては最大荷重点の2倍の変位に対しても上載荷重を保持できたという事実に基づき、耐震性能3の解析上の限界値を耐震性能2の限界値の2倍として定めた。

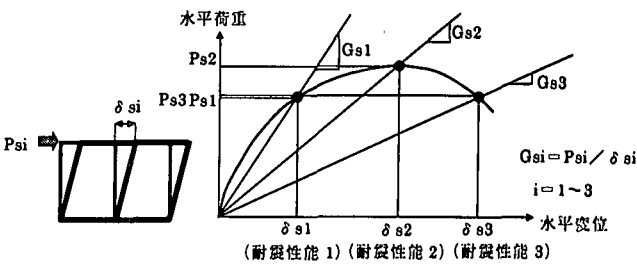
一方、せん断破壊モードに対しては、荷重の増加とともに部材に斜めひび割れが発生・進展し、構造物の水平荷重が急激に低下することから、耐震性能3を荷重が急激に低下し始める点とした。

(4) 構造物の地震時応答変形予測

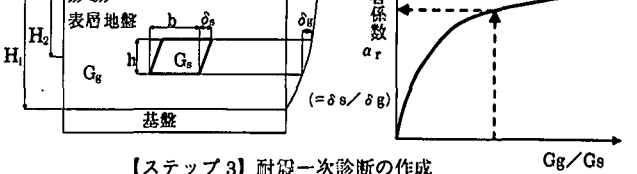
地震時の構造物の応答変形は、主に周辺地盤の変形に支配されるが、その大きさは地盤と構造物の等価せん断剛性比に影響され、構造物の等価せん断剛性が高いほど自由地盤の変形より小さくなる。地盤と構造物の相対的な剛性に基づいて地中構造物の応答変位を簡易に推定する方法が応答係数法である。ただし、地盤は液化化せず、構造物と地盤は剥離・滑りを起こさないとした。

西山ら²⁾は、構造物と地盤の剛性比の他、構造物の形状、地盤条件の影響を考慮することで応答係数の算定式を提案している。図-3は西山らが提案した式とFEM解析を比較したものである。両者は良く対応しており、簡便で実用的という点で本手法の構築に用いた。なお、本研究では等価剛性の比 (G_g/G_s) は2以下の範囲であり、

【ステップ1】構造物の変形能力予測



【ステップ2】構造物の応答変形予測



【ステップ3】耐震一次診断の作成

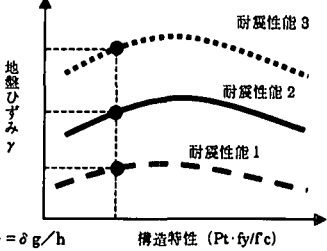


図-2 耐震一次診断手法の作成手順

表-1 解析上の限界値

耐震性能		解析上の限界値
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）	引張側の鉄筋ひずみが20000 μ に達する
耐震性能3	曲げ破壊（補強必要）	引張側の鉄筋ひずみが40000 μ に達する
	せん断破壊（補強必要、部材のせん断破壊により崩壊する可能性有り）	荷重-変位関係で荷重低下する点

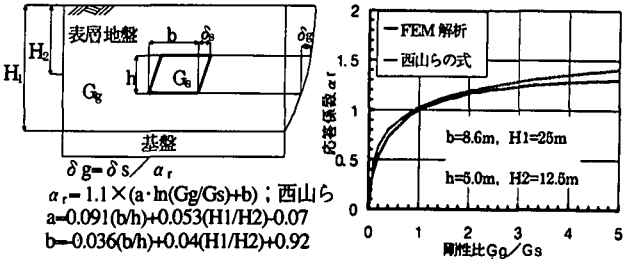


図-3 西山らが提案した式とFEM解析の比較

この範囲で土被り厚が応答係数に及ぼす影響を検討した結果、地表面から構造物中心までの深さ H_2 が5~20mの範囲で変化しても応答係数 α_r が極端に異なることはないことを確認した。したがって、本手法の構築にあたっては土被り10mを想定しているが、これより土被り厚が多少異なっても性能評価に及ぼす影響は小さいと考えられる。

3. 2連ボックスカルバートの耐震一次診断

図-4に示す2連ボックスカルバートを対象に図-5に示

す設置条件で検討を行った。

(1) 構造物の変形性能予測

構造物の地震時応答変形は周辺地盤の変形に追従するようにせん断変形することから、構造物の変形性能は、構造物単体でせん断変形させる一方向の載荷解析から概ね評価が可能である。図-6に解析モデルを示す。用いた解析コードは WCOMD-SJ[®]であり、この解析手法は材料非線形を考慮しており、部材のせん断破壊を概ね予測できる。境界条件は隔壁下端をピン支持とし、左右の側壁下端をローラ支持としている。また、地中状態を模擬するため、周辺地盤から作用する土圧分布荷重を集中荷重に置き換えて載荷した。

解析はコンクリートの圧縮強度 (180~400kgf/cm²)、引張鉄筋比 (0.25~2%)、せん断補強鉄筋の有無をパラメータとして行った。求めた構造物の荷重-変位関係を図-7および図-8に示す。

①せん断補強鉄筋が有る場合

a. 引張鉄筋比が大きくなるにしたがって最大荷重が大きくなり、各耐震性能に対応する荷重と変位が大きくなっており、荷重は急激に低下していない。

② せん断補強鉄筋が無い場合

a. 引張鉄筋比 $P_t=0.25\%$ のケースは荷重が急激に低下していない。したがって、解析範囲内では曲げ破壊先行型と考えられる。引張鉄筋比が小さいほど曲げ耐力が小さくなり、解析範囲内では曲げ破壊先行型になったと考えられる。

b. 引張鉄筋比 $P_t=1\%$ のケースはコンクリートの圧縮強度 $f_c=180\text{kgf/cm}^2$ では荷重が急激に低下し、部材がせん断破壊したと考えられるが、コンクリートの圧縮強度 $f_c=400\text{kgf/cm}^2$ では荷重が急激に低下せず、解析範囲内では曲げ破壊先行型と考えられる。

c. 引張鉄筋比 $P_t=2\%$ の場合は両者とも荷重が急激に低下し、部材がせん断破壊したと考えられる。引張鉄筋比が大きいはほど曲げ耐力が大きくなり、部材がせん断破壊しやすいためである。

(2) 耐震一次診断の作成

図-9 および図-10 に作成した耐震一次診断の例を示す。いずれもせん断補強鉄筋が無い構造物を対象とした場合である。図-9 は表層地盤 1 のせん断波速度 $V_s=100\text{m/s}$ の場合 (N 値 $\div 2$) であり、図-10 は表層地盤 1 のせん断波速度 $V_s=200\text{m/s}$ の場合 (N 値 $\div 15$) である。これらの図で横軸は構造特性 ($P_t \cdot f_y / f_c$)、縦軸を地盤ひずみ γ ($=\delta g / h$) とした。 δg は自由地盤における構造物位置の最大相対変位であり、与条件とする。この δg は一次元地震応答解析等により把握できる。 h は構造物の高さである。

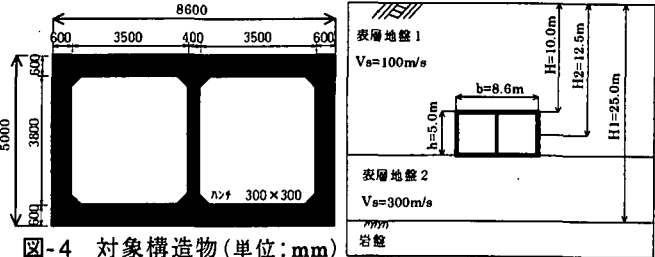


図-4 対象構造物 (単位: mm)

図-5 構造物の設置条件

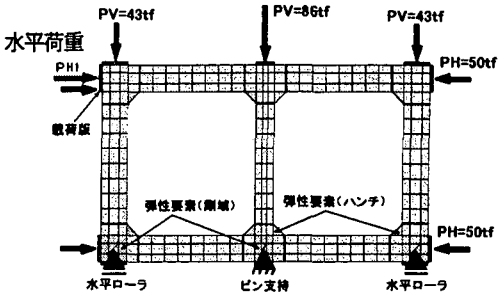


図-6 解析モデル

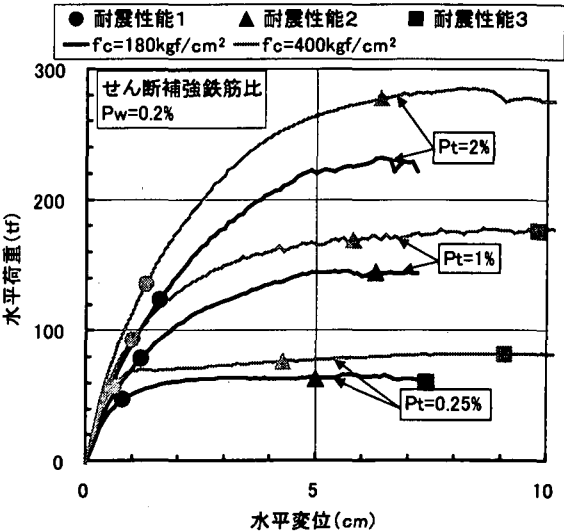


図-7 構造物の荷重-変位関係 (せん断補強鉄筋が有る場合)

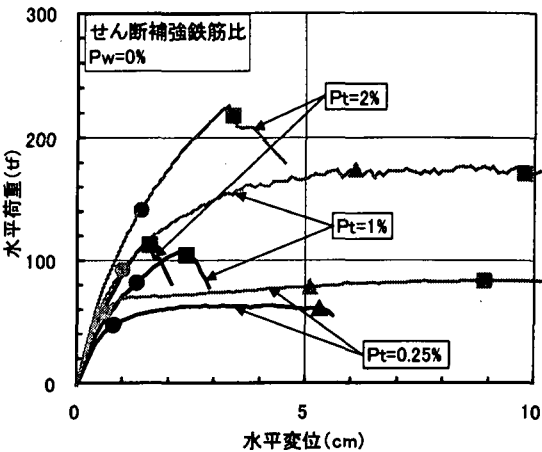


図-8 構造物の荷重-変位関係 (せん断補強鉄筋が無い場合)

これらの図より、耐震性能1を満足する地盤ひずみは構造特性 $P_t \cdot f_y / f_c$ が大きくなれば徐々に大きくなる傾向を示している。耐震性能2および耐震性能3は、構造特性が $P_t \cdot f_y / f_c=0.1$ を境にして、各性能レベルを満足する

地盤ひずみが急激に低下する傾向を示している。特に構造特性が $P_t \cdot f_y / f_c = 0.2$ 以上の範囲では耐震性能1と耐震性能3を満足する地盤ひずみが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。一般に材料強度が同一の場合、引張鉄筋比が大きいほど曲げ耐力が大きいため部材がせん断破壊しやすくなるが、同図はこの傾向を捉えている。

また、地盤のせん断波速度 $V_s=200\text{m/s}$ は地盤のせん断波速度 $V_s=100\text{m/s}$ と比較して、各耐震性能を満足する地盤ひずみが小さくなっている。これは応答係数 α_r の影響と考えられる。応答係数法では地盤のせん断剛性が大きくなると応答係数 α_r も大きくなる。応答係数 α_r が大きくなると、構造物変位 δ_s が同じであれば、地盤変位 δ_g ($\delta_g = \delta_s / \alpha_r$) は小さくなる。したがって地盤ひずみ γ ($\gamma = \delta_g / h$) は応答係数 α_r が大きくなると小さくなるためである。

図-9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一般部の中柱 ⁷⁾ ⁸⁾ を併記した(図中★印)。大開駅の中柱の引張鉄筋比は2.6%、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、一般部の中柱はひびわれが発生するものの、せん断破壊しないため崩壊に至らなかった。同図から大開駅の中柱はせん断破壊領域すなわち耐震性能3を満足できない領域にあることがわかる。これに対して一般部の中柱は耐震性能2を満足する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と一致している。

以上の結果から、本研究で構築した耐震一次診断手法は実用に耐え得る程度の精度を有し、ボックスカルバートの耐震性を迅速かつ正確に照査できると考えられる。

4. おわりに

本研究では、ボックスカルバートの耐震性を短時間で精度良く評価するための耐震一次診断手法を構築した。本手法は構造物の耐震性を個々の部材の損傷ではなく構造全体としての変形挙動と損傷に着目して耐震性を評価する点に特徴がある。また、簡易手法であっても構造物の地震時損傷レベルや破壊モードが予測可能である。

しかしながら、本手法の構築にあたっては、地盤条件は表層と基盤層の2層で一般的な物性を有するものとし、躯体慣性力の影響が無視できる程度に小さいことを前提にしているため、構造形式や地盤条件が大幅に異なる場合は診断結果の信頼性が低下することも懸念される。

今後はこれらの課題を解決しつつ、詳細解析による二次診断結果や過去の地震被害事例との照査を積み重ねることにより、適用範囲の拡大と診断精度の向上および実用化を目指した検討を進める必要があると考えている。

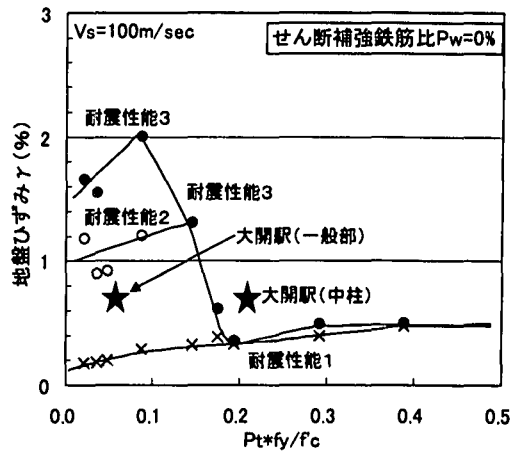


図-9 耐震一次診断の例(地盤の $V_s=100\text{m/s}$)

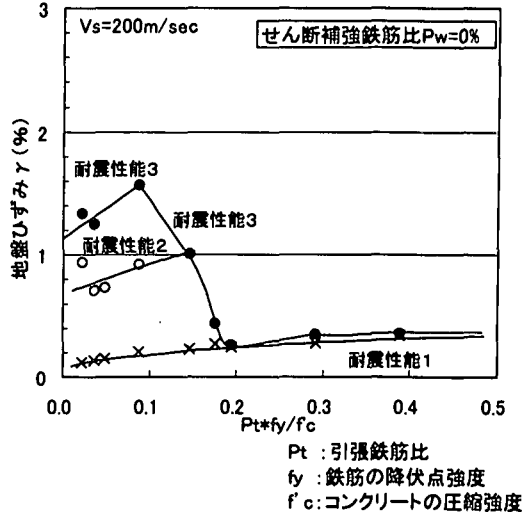


図-10 耐震一次診断の例(地盤の $V_s=200\text{m/s}$)

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) 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
- 3) 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
- 4) 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, pp.1261-1266, 1999
- 5) 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, pp.1267-1272, 1999
- 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) 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
- 8) 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