

強震動を受ける構造物—杭基礎・地盤連成系の損傷度評価

Damage Degree Evaluation of an Interacted Soil-pile foundation-structure System

Subjected to Strong Earthquake Motion

北海学園大学大学院工学研究科建設工学専攻 ○学生員 若月唯大(Tadahiro Wakatsuki)

北海学園大学工学部社会環境工学科 正員 佐々木康彦(Sasaki Yasuhiko)

1. まえがき

地震動を受ける構造物に入力された地震エネルギーは弾性振動エネルギーにも変換されるが、最終的には塑性ひずみエネルギーおよび粘性減衰エネルギーとして吸収されることになる。ここで、地震動による繰り返し荷重効果を比較的単純に評価することができ、しかも強度並びに変形能の両側面を考慮することができる「履歴吸収エネルギー W_H (履歴減衰による吸収エネルギー)」が注目されている¹⁾。この履歴吸収エネルギーの累積量は地震動による構造物の損傷度評価の指標となる。

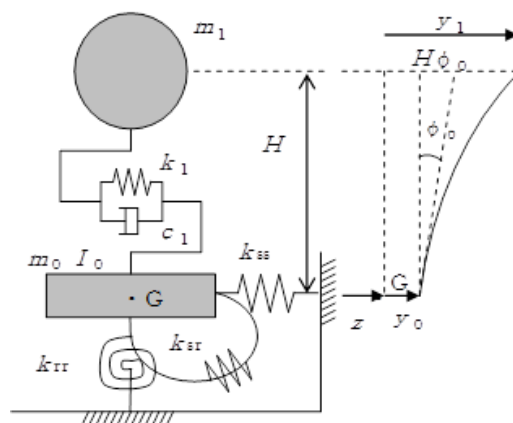
本研究は、強震動を受ける構造物—杭基礎・地盤連成系の動的相互作用を考慮した有効入力地震動に対する地震応答解析を行い、得られた種々の応答値を用いて損傷度評価を行う。さらに、構造物—杭基礎・地盤連成系と構造物単体との損傷度評価を比較し、杭基礎・地盤連成系の連成効果の影響を明らかにすることを目的とする。

2. 解析モデルおよび解析理論

2.1 連成系の運動方程式

構造物—杭基礎・地盤連成系の面内振動を、図—1 に示すような構造物の水平運動および杭基礎フーチング部（以降、基礎と略称する）の並進・回転運動からなる三自由度振動系にモデル化する。この解析モデルは構造物を表す「質点—バネモデル」および杭基礎・地盤を表す「スウェーロッキングモデル」から構成される“連成系モデル”である。このモデルを本研究で使用する解析モデルとする。

構造物の質量を m_1 、基礎の質量および回転慣性モーメントを m_0 、 I_0 、構造物の水平バネ定数を k_1 、粘性減衰



図—1 三自由度連成系モデル

〔地盤の粘性減衰を含む〕

係数を c_1 、杭基礎・地盤と等価なバネ定数を k_{ss} 、 $k_{sr}=k_{rs}$ 、 k_{rr} とする。地震動による基礎での有効入力水平変位を z 、基礎重心点の水平変位および回転角を y_0 、 ϕ_0 、基礎重心点に対する構造物の水平変位を y_1 、基礎重心点から構造物の質量位置までの高さを H とする。

本研究では、並進・回転運動が独立しておらず、連成した場合の剛性を想定している。また、粘性減衰に関しても構要素ごとに減衰を与え、連成系全体の粘性減衰マトリクスを構成しており、これらを定式化すると

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = -[M]\{\ddot{1}\}z \quad (1)$$

となり、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ はそれぞれ連成系モデルの質量マトリクス、粘性減衰マトリクス、剛性マトリクス、 $\{y\}$ は変位ベクトル、 $\{\ddot{1}\}$ は地震動の入力の有無を 1 と 0 で示すベクトル、 z は基礎での有効入力加速度である。

2.2 動的相互作用を考慮した有効入力地震動

構造物と基礎・地盤との動的相互作用を考慮した地震

応答解析を行うためには、連成系モデルに入力する地震動は地表面観測波ではなく、基礎・地盤の影響による地震動の空間的変動を考慮した「有効入力地震動」を使用する必要がある²⁾。

地表面観測波をもとに有効入力地震動を作成する第1段階として、一様弾性地盤に一次元波動伝播理論³⁾を適用して地表面での加速度記録から工学的基盤面における加速度記録を算定する。第2段階は、一様弾性地盤を平面ひずみ状態とし、有限要素法を用いて基礎・地盤応答解析を行う。ここで、杭基礎フーチング部の物性値は質量を零、剛性を無限大として与え、杭基礎・地盤解析モデルにおける解析領域の両側面および底面には、逸散波を吸収し反射波を抑制するために粘性境界を認定した。この解析モデルの底面に第1段階で算定した基盤面での加速度記録を入力した結果、杭基礎フーチング部の重心位置での応答加速度が求める有効入力地震動となる。

3. 解析条件

3.1 解析対象とした橋梁構造物・杭基礎・地盤

本研究では、構造物—杭基礎・地盤連成系として“橋梁構造物”を解析対象とした。道路橋の耐震設計に関する資料⁴⁾を参照して、図—2 に示すようなひとつの設計

振動単位である“鉄筋コンクリート橋脚とそれが支持している上部構造部分、杭基礎および地盤”を選定した。

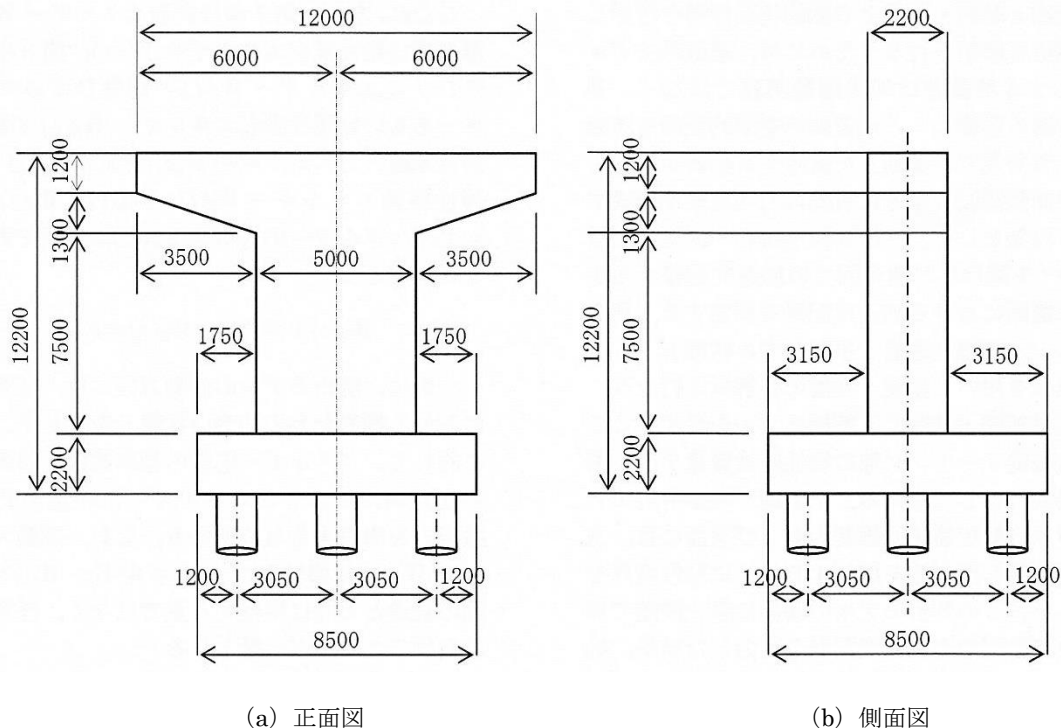
固有振動解析、弾塑性地震応答解析およびエネルギー応答解析に使用した物性値・寸法、構造・表層地盤特性を以下に箇条書きして示す。

(1) 構造物

1) 構造物の質量は $m_1=806\text{ t}$ (上部構造質量 633 t, 橋脚躯体質量 346 t) となる。2) 復元力特性は履歴性状を示す“バイリニア型”とする。3) 弾性域での第1剛性(初期剛性)は $k_1=1.39\times 10^5\text{ kN/m}$ である。したがって、“構造物単体(地盤の剛性が無限大、粘性減衰が零)”での弾性固有周期は $T_E=0.48\text{ s}$ (固有振動数 $f_E=2.09\text{ Hz}$) となる。4) 降伏点を超えた塑性域での第2剛性は零とする。したがって、復元力特性は“完全弾塑性”である。5) 降伏変位は $y_y=0.0349\text{ m}$ である。対応する降伏復元力は $Q_y=4851\text{ kN}$ となる。6) 減衰定数を $h_s=0.02$ (2.0%) とする。7) 基礎重心点から構造物の質量位置までの高さは $H=11.1\text{ m}$ である。

(2) 杭基礎

1) 杭基礎のフーチング部は鉄筋コンクリート製であり、単位体積質量は $\rho_0=2.5\text{ t/m}^3$ とする。2) フーチングの寸法は横幅 $L=8.5\text{ m}$, 奥行 $B=8.5\text{ m}$, 版厚 $D=2.2\text{ m}$ である。



図—2 解析対象とした橋梁構造物・杭基礎

3)質量は $m_0=397\text{t}$, 回転慣性モーメントは $I_0=2.55 \times 10^3 \text{t} \cdot \text{m}^2$ となる。4) 場所打ち杭は鉄筋コンクリート製であり、杭の直径は 1.2m, 長さは 27.5m, 杭間隔 3.05m, 杭の本数は 9 本である。5)Ⅲ種地盤における杭の曲げ剛性は $EI_p=2.54 \times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}^2$, 伸び剛性は $EA_p=2.83 \times 10^7 \text{kN}$ となる。

(3) 表層地盤

1)耐震設計上の地盤種別はⅢ種地盤である。2)工学的基盤面まで深さ 29.0m, 粘性土と砂質土との互層からなる 5 層構成である(第 5 層を基盤面としているため, 周期およびせん断波速度の算定には 4 層で計算)。3)五層地盤の固有周期は, $T_G=0.69\text{s}$ となる。4)この地盤を“一様な弾性地盤”と見なした場合の, 等価せん断波速度は $V_s=169\text{m/s}$ となる。5)弾性地盤の単位体積質量は $\rho_G=1.8\text{t/m}^3$, ポアソン比は $\nu=0.35$ とする。6)地盤の減衰定数を $h_G=10\%$ とする。

3.2 有効入力地震動

強震動記録としては, 1995 年兵庫県南部地震においてⅢ種地盤上で観測された三波形を使用した。東神戸大橋周辺地盤上での水平加速度(以下, “東神戸大橋”と略称する), 神戸ポートアイランド内地盤上での水平加速度 NS 成分(同様に“神戸ポ NS”)と水平加速度 EW 成分(同様に“神戸ポ EW”)である。最大加速度はそれぞれ 591gal, 557gal, 619gal である。

これらの地表面観測波をもとに, 前述した解析理論を用いて求めた有効入力地震動の最大加速度は順に, 624gal, 627gal, 723gal である。また, 卓越周期は順に, 1.85s, 1.69s, 1.69s である。

4. Kunnath らの損傷指標 DI の概要

本研究に用いる Kunnath らの損傷指標 DI は, Park and Ang らにより開発され, Kunnath らにより構造物が弾性挙動をしているときには $DI < 0$ となるように正規化された指標である⁵⁾。以下に算定式を示す。

$$DI = \frac{\mu_d - 1}{\mu_u - 1} + \frac{\beta \cdot \mu_H}{\mu_u} \quad (2)$$

$$= \frac{y_{\max} - y_Y}{y_u - y_Y} + \frac{\beta \cdot W_H}{Q_Y \cdot y_u} \quad (3)$$

ここで, μ_u : 終局(変位)靱性率, μ_d : 応答塑性率, μ_H : エネルギー靱性率, y_u : (構造物の)終局変位, $y_{\max}$: 最大応答変位, y_Y : (構造物の)降伏変位, Q_Y : 降伏復元力, β : 部材の断面特性等に依存した正の係数($=0.15$)である。表—1 に Kunnath らの損傷度評価における損傷指標 DI に対する損傷状態の関係性を示す。

表—1 Kunnath らの損傷度評価法

損傷状態	損傷指標 DI	損傷の程度
無損傷	0.00～0.08	ひび割れなし
使用可能	0.08～0.18	中程度のひび割れ
修復可能	0.18～0.36	かぶりコンクリートの剥離
修復不可能	0.36～0.60	鉄筋剥き出し
崩壊	0.60～	せん断耐力・軸耐力の損失

5. 数値解析結果および損傷度評価

地震応答解析の結果, 連成系の応答加速度の最大値は, 東神戸大橋: 706gal, 神戸ポ NS: 703gal, 神戸ポ EW: 689gal であり, 構造物単体では(同順), 638gal, 630gal, 634gal であった。構造物単体における応答加速度の最大値は連成系に比べ, それぞれ 9.63%, 10.38%, 7.98% ほど小さめであった。

次に, Kunnath らの損傷指標 DI を算出する。対象構造物の物性値から, 降伏変位 $y_Y=0.0349\text{m}$, 道路橋示方書に記載されている降伏変位 $y_Y=0.0349\text{m}$ に対する終局変位 $y_u=0.259\text{m}$, $\beta=0.15$, 弾性域での第 1 剛性 $k_1=1.39 \times 10^5 \text{kN/m}$ とする。ここで, 降伏復元力 Q_Y を降伏変位 y_Y で割ったものを弾性域での第 1 剛性(初期剛性) k_1 とする。

$$k_1 = \frac{Q_Y}{y_Y} \quad (4)$$

(4)式より, 降伏復元力 $Q_Y=4851\text{kN}$ となる。さらに, 地震応答解析より求めた履歴吸収エネルギー W_H および最大応答変位 $y_{\max}$ を以下の表—2, 表—3 に示す。履歴吸収エネルギー W_H に着目すると, 東神戸大橋では連成系に比べて構造物単体が 56.65%減少, 神戸ポ NS では 62.08%減少, 神戸ポ EW では 19.81%減少となった。損傷度評価において重要な要素である履歴吸収エネルギー W_H に解析の出力段階で大きな差が生まれることから, 構造物—杭基礎・地盤連成系の動的相互作用を考慮する

ことが重要である.

表一2 連成系における応答結果

有効入力 地震動	履歴吸収エネルギー W_H kN・m	最大応答変位 y_{max} m
東神戸大橋	2316	0.1740
神戸ポ NS	3705	0.1702
神戸ポ EW	1393	0.1548

表一3 構造物単体における応答結果

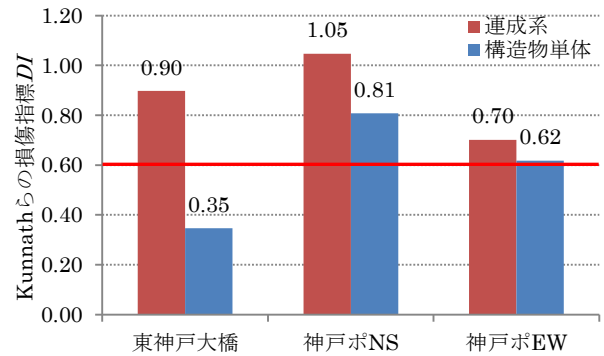
有効入力 地震動	履歴吸収エネルギー W_H kN・m	最大応答変位 y_{max} m
東神戸大橋	1004	0.0857
神戸ポ NS	1405	0.1783
神戸ポ EW	1117	0.1434

次に、以上の解析結果から(3)式を用いて損傷指標 DI を算出した結果を図一3に示す。また、それぞれの損傷の状態は表一1の Kunnath らの損傷度評価法に基づいて表一4に示す。連成系は三波とも崩壊の値を示し、また、構造物単体では、東神戸大橋のみ修復可能な値を、その他二波は崩壊を示した。図一3より、グラフにして比較すると東神戸大橋では0.55、神戸ポ NSでは0.24、神戸ポ EWでは0.08と、三波とも構造物単体の損傷指標 DI が連成系のそれよりも低くなっていることがわかる。この結果から、地盤を考慮しない構造物単体で損傷度評価を行うと、有効入力地震動に対する損傷指標 DI を過小評価する傾向にあり、大変危険である。また、過小評価した損傷指標 DI では損傷状態・損傷の程度の推定にも著しい影響を及ぼすため、正しく損傷度評価を行うためには、連成効果を考慮することが必要である。

6. まとめ

本研究では、強震動を受ける構造物一杭基礎・地盤連成系の動的相互作用を考慮した有効入力地震動に対する地震応答解析を行い、得られた種々の応答値を用いて損傷度評価を行った。さらに、構造物一杭基礎・地盤連成系と構造物単体との損傷度評価を比較し、杭基礎・地盤連成系の連成効果の影響を明らかにした。これらの解析結果から、次のような研究成果が得られた。

(1) 地震応答解析において、連成系と構造物単体の履歴吸収エネルギー W_H を比較すると、東神戸大橋では連



図一3 損傷指標 DI の推移

表一4 連成系および構造物単体の損傷状態

有効入力 地震動	損傷状態	
	連成系	構造物単体
東神戸大橋	崩壊	修復可能
神戸ポ NS	崩壊	崩壊
神戸ポ EW	崩壊	崩壊

成系に比べて構造物単体が56.65%減少、神戸ポ NSでは62.08%減少、神戸ポ EWでは19.81%減少と解析の出力段階で大きな差が生まれることから、構造物一杭基礎・地盤連成系の動的相互作用を考慮することが重要であることが明らかとなった。

(2) Kunnath らの損傷度評価法に基づいて損傷指標 DI を比較すると解析に用いた三波形とも構造物単体の損傷指標 DI が連成系のそれよりも低くなっており、損傷度評価において構造物単体では過小評価することがわかったため、連成効果を考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 山田善一：耐震構造設計論，京都大学学術出版会，1997.
- 2) 日本建築学会：入門・建物と地盤との動的相互作用，丸善，1999.
- 3) 石原研而，木村 孟：土質力学—土の力学的挙動と地盤の地震応答解析—，彰国社，1980
- 4) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，丸善，1998
- 5) 家村浩和，三上 卓：目標耐震性能に必要な降伏強度と塑性率のスペクトル，土木学会論文集 No.689/I-57，pp.333-342，2001