

基礎周辺の地盤抵抗が既設構造物の耐震性能 に与える影響に関する検討

桐生郷史¹・室野剛隆²・今村年成³・樋口美紀恵⁴

¹正会員 （財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部（〒185-8540東京都国分寺市光町2-8-38）

²正会員 （財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部（〒185-8540東京都国分寺市光町2-8-38）

³正会員 （財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部（〒185-8540東京都国分寺市光町2-8-38）

⁴正会員 中央復建コンサルタンツ（株）（〒533-0033大阪市東淀川区東中島4-11-10）

1. はじめに

基礎構造物が地震を受けると、周辺地盤と基礎との間で、動的相互作用の影響があり、基礎構造物が上部構造物から慣性力を受ける場合、基礎は地盤から様々な抵抗を受けると考えられる。現在の鉄道構造物の耐震設計法では、杭周辺地盤の水平・鉛直抵抗や杭先端地盤の抵抗は考慮しているが、フーチング周辺の地盤抵抗（例えば図-1中の②～⑤に示す各種地盤抵抗）は積極的に考慮せず、ほとんどの場合、無視している。これは、地震被害データの不足や解析技術の制約により、設計上、安全側になるようにとの配慮から、このようになされてきたものと考えられるが、その妥当性については不明な点が多い。また、既設構造物の耐震補強を実施する場合には、地震後の補修効率の観点から上部構造物の先行降伏を思想としているため、基礎構造物の耐力以上に上部構造物（柱）を補強することができないという状況も問題視されている。

そこで、本報では、基礎構造物の耐震性能評価モデルの精度向上を念頭に置き、橋脚およびラーメン高架橋を対象に、静的非線形解析による基礎周辺地盤抵抗要素に関する感度分析を実施し、各種地盤抵抗要素が杭の発生断面力を抑制する仕組みについて検討するとともに、2003年に発生した三陸南地震で被害を受けたラーメン高架橋を対象に提案モデルの妥当性の検証をおこなった。

2. 基礎周面地盤抵抗のモデル化

基礎周辺の地盤抵抗として考慮し得るフーチング

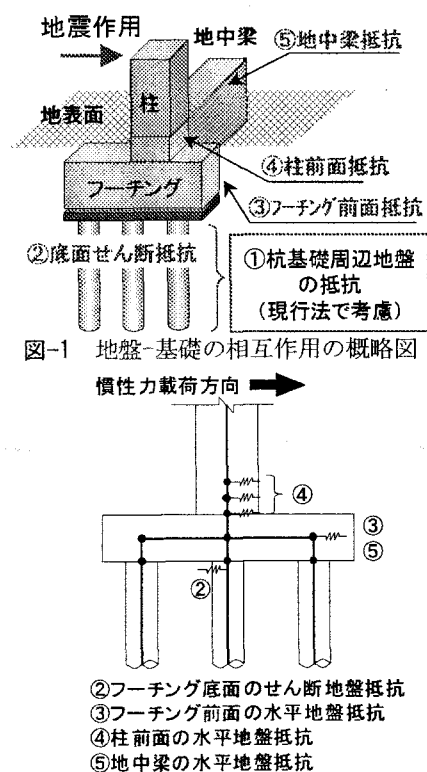


図-1 地盤-基礎の相互作用の概略図

図-2 基礎周面の地盤抵抗要素のモデル化

底面せん断抵抗（図-1中の②）、フーチング前面抵抗（図-1中の③）、柱前面抵抗（図-1中の④）、地中梁水平地盤抵抗（図-1中の⑤）について評価モデルの検討を行った。非線形解析において骨組モデルを用いる場合の基礎周辺の地盤抵抗モデルを図-2に示す。

(1) フーチング前面抵抗・柱前面抵抗

フーチング前面抵抗および柱前面抵抗は、直接基

礎のフーチング前面の地盤抵抗特性²⁾に準じて算出する。非線形特性は、上限値を有するバイリニア型とする。骨組みモデルにおける配置は、図-2に示すように、フーチング前面の水平地盤抵抗はフーチング重心位置、柱前面の水平地盤抵抗は土被りに応じた位置に地盤ばねを用いてモデル化する。

(2) フーチング底面せん断抵抗

フーチング底面のせん断地盤抵抗を考慮する際には、フーチングと底面地盤が密着していること（＝フーチング底面地盤が沈下しないこと）が解析の前提となるため、地震時にゆすり込み沈下が生じないこと（既設橋脚であれば構造物建設当初からの圧密沈下の経歴がないか）を、慎重に確認することが重要である。地震時のゆすり込み沈下量は、式(1)により算定する。

$$S_g = \int_h^H \left(\frac{1}{E_{aft}(z)} - \frac{1}{E_{bef}(z)} \right) \cdot \sigma_v(z) dz \quad (1)$$

ここに、 $E_{bef}(z)$ は深さ z における地震前のせん断剛性、 $E_{aft}(z)$ は地震によって劣化した後のせん断剛性、 $\sigma_v(z)$ は上載圧である。この式は、地震により地盤が劣化して、初期剛性との差分だけ、自重により沈下が進行することを考慮したものである。ゆすり込み沈下量が大きい場合は、フーチングと地盤の間に隙間が生じる可能性が高くなる。

摩擦抵抗に寄与する面積は、フーチングと地盤が接触している範囲である。そこで、フーチング全面積 A_F から杭面積 A_p を控除した面積（地盤と接触している面積）が有効となる。さらに、地震時にはロッキングを起こす可能性があるため、せん断抵抗として有効に働くのは、その 1/2 の範囲とする。なお、地盤反力係数の算定は直接基礎²⁾に準じる。

図-3 に示すように、施工ステップを考慮して荷重分担を勘案した上限値を設定する。STEP1 ではフーチング自重分が地盤に働いている。STEP2 では、柱や桁はフーチングのコンクリート硬化後に構築されるので、これらの荷重は、硬化したフーチングを介して杭に伝達され、フーチングに伝わらないと考えられる。STEP3 では、土留め撤去後、地下水位が回復することを勘案して、浮力がフーチング底面に働くと考えられる。したがって、上限値は式(2)により算定する。

$$R_{hb} = V_d \cdot \tan \phi + A' \cdot c \quad (2)$$

ここに、 R_{hb} はフーチング底面摩擦の上限値、 V_d はフーチング重量から浮力を差し引いた重量、 ϕ はフーチング底面と土の摩擦角、 A' はフーチングの有効

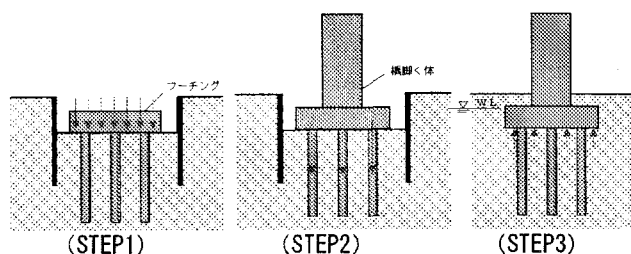


図-3 基礎周囲の地盤抵抗要素のモデル化

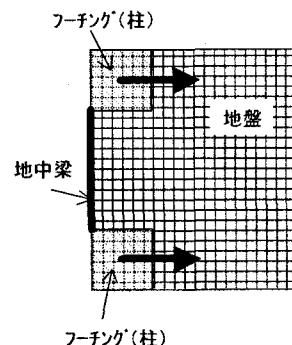


図-4 FEM 解析モデル

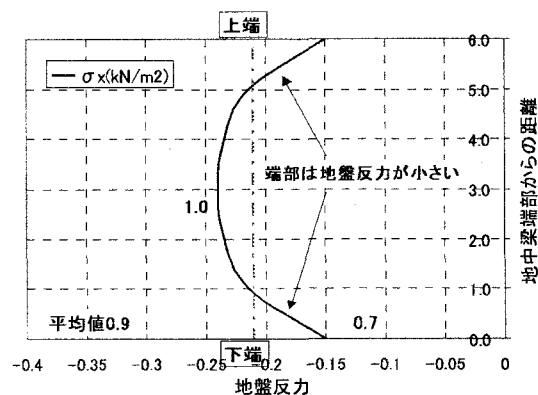


図-5 地盤反力分布

面積、 c はフーチング底面と土の付着力である。

(3) 地中梁水平地盤抵抗

橋脚と異なり、ラーメン高架橋は一般的に地中梁が配置されており、この地中梁が水平抵抗となる可能性がある。そこで、地中梁前面地盤の抵抗を考える。地盤抵抗の算出は、フーチング前面地盤抵抗と同様に、直接基礎のフーチング前面の設計水平地盤反力係数²⁾に準じて算定する。ただし、地中梁を評価するためには 3 次元解析を行う必要があるが、設計実務では平面 2 次元モデルの適用が一般的である。そこで、奥行き方向の地中梁の効果を 2 次元解析で評価する際に問題となるのは、①地中梁とフーチングそれぞれの地盤抵抗領域の干渉、②本来奥行き方向に連続的に存在する地中梁前面抵抗を 2 次元モデルの集約ばねとして評価するための有効領域である。そこで、以下に示す検討を行なった。

a) 地中梁とフーチングの抵抗領域の干渉

地中梁とフーチングは連続して存在するので、お

互いの地盤抵抗の領域は干渉すると考えられる。そこで、図-4に示すようなFEMモデルで解析を実施して、地盤反力の干渉状況を詳細に検討した。その結果を図-5に示す。地中梁中央部に比べて、地中梁端部ではフーチングとの干渉により、概ね7割程度しか、地盤反力が発揮されていないことが分かる。ただし、地中梁全体で平均すると、9割程度の地盤抵抗が発揮されていることになるので、それほど地盤反力を低減する必要はないことを確認した。

b) 地中梁の有効範囲

図-6に示すように、地中梁を含めた3次元モデルによる解析結果と、2次元モデルのフーチング重心位置に集約ばねとして地中梁前面抵抗地盤の効果を与えた2次元解析結果を比較することにより、集約ばねとして有効な範囲を定義する。解析の結果、3次元解析による杭の降伏震度と同等の震度となる2次元解析の集約ばねの有効範囲は $1 \times L$ （地中梁1本あたり $0.5L$ ）となる。2次元解析時に考慮すべき地中梁水平抵抗の有効範囲としては、1スパン分の地中梁分の前面抵抗を採用すればよいことが分かった。

3. 各種地盤抵抗要素の検討

(1) 対象構造物および解析ケース

検討対象構造物を図-7に示す。同図に示すように、検討対象構造物は、ラーメン高架橋、橋脚①、橋脚②の3構造物である。ラーメン高架橋の基礎は、線路直角方向への連結フーチング基礎であり、1フーチング当たり24本の既製RC杭（外径350(mm)、内径220(mm)、杭長 $L=8.0$ (m)）が打設されている。橋脚①は8本群杭（杭径1000(mm)、杭長 $L=19.0$ (m)）を有する壁式橋脚である。橋脚②の基礎形式は4本群杭（杭径1300(mm)、杭長 $L=28.5$ (m)）である。なお、構造物の柱と梁の隅角部およびフーチングは剛体として取り扱い、杭部材についてはM- ϕ 関係でモデル化した。柱部材については通常M- θ 関係でモデル化することが多いが、今回は新設構造物の設計では考慮しない柱にも土被りの効果を表現するばねを設けるため、M- ϕ 関係でモデル化した。また、柱部材、杭部材ともに軸力変動の影響を考慮している。杭部材については群杭をモデル化し、奥行き本数分を考慮して解析をおこなった。なお、解析は骨組み非線形解析を用い、すべて線路直角方向に対しておこなった。

表-1に解析ケースと検討内容を示す。Case1は杭先端ばね及び杭周面ばね（水平と鉛直）のみを考慮したもので、本報では、これを基本ケースとする。Case2～5では、フーチング前面の水平地盤抵抗、柱

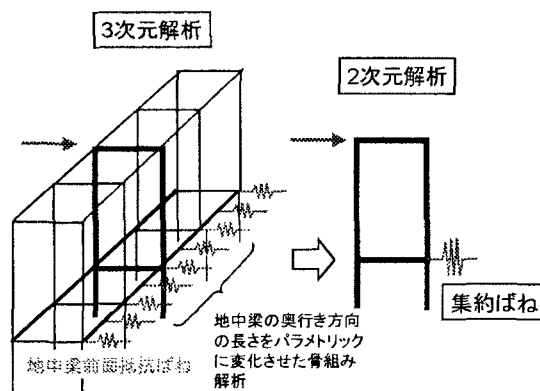


図-6 検討方法の概念図

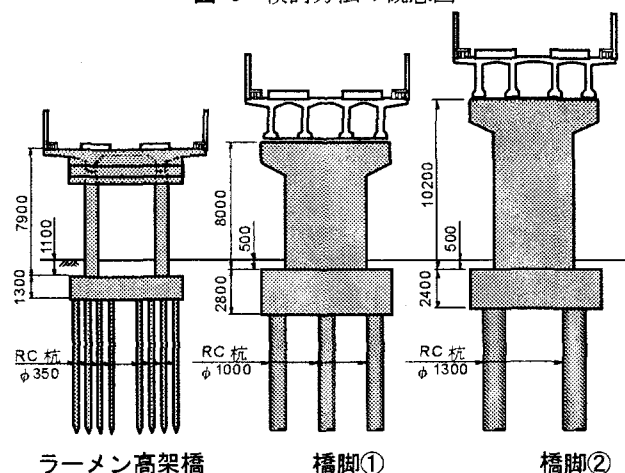


図-7 検討対象構造物

表-1 解析ケース一覧

検討 モデル	解析 ケース	土被り厚	フーチング 前面 抵抗	柱 前面 抵抗	フーチング 底面 抵抗	地中梁
ラーメン 高架橋	Case1	1.1m	×	×	×	×
	Case2	"	○	×	×	×
	Case3	"	×	○	×	×
	Case4	"	×	×	○	×
	Case5	"	○	○	○	×
	Case5 +地中梁	"	○	○	○	○
橋脚① 橋脚②	Case1	0.5m	×	×	×	—
	Case2	"	○	×	×	—
	Case3	"	×	○	×	—
	Case4	"	×	×	○	—
	Case5	"	○	○	○	—
	Case6	1.0m	○	○	○	—
	Case7	2.0m	○	○	○	—

注) ○印：考慮する，×印：考慮しない，—印：対象外

前面の水平地盤抵抗、フーチング底面のせん断地盤抵抗をパラメータに振った感度分析を実施した。ラーメン高架橋については、さらに、地中梁の水平地盤抵抗を考慮した解析を実施した。また、橋脚については、Case6,7で土被り厚に対する感度分析も実施した。

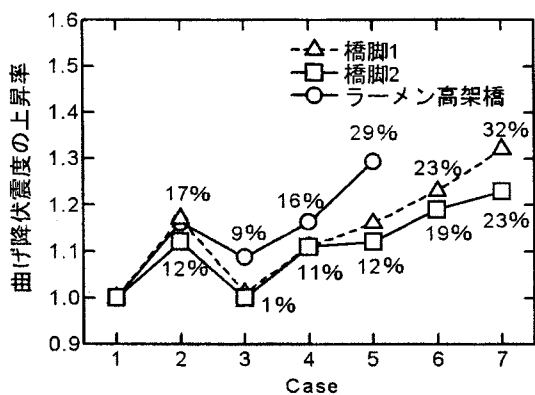


図-8 曲げ降伏震度の上昇率

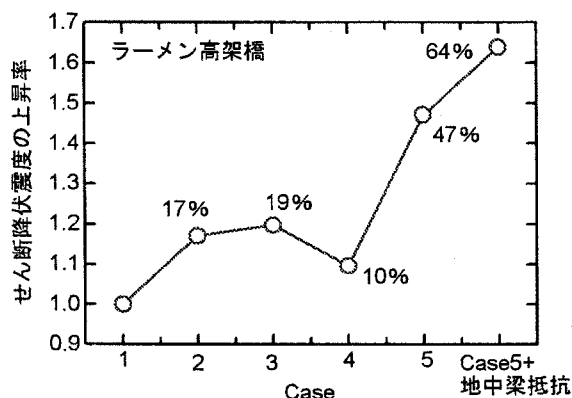
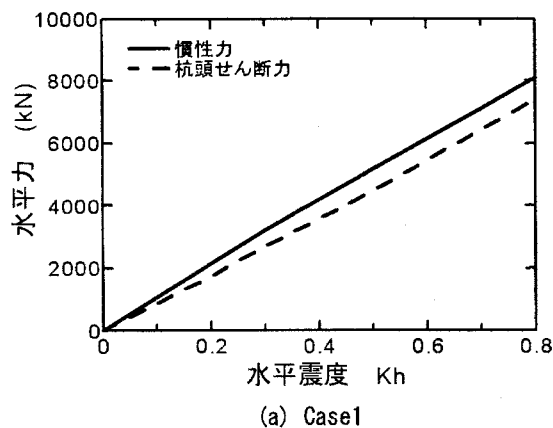
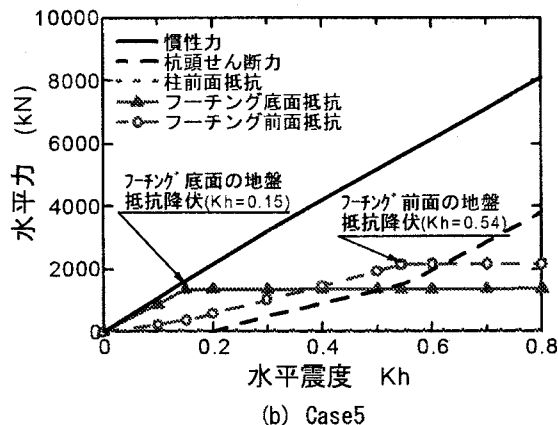


図-9 せん断降伏震度の上昇率



(a) Case1



(b) Case5

図-10 慣性力の分担 (橋脚①)

(2) 解析結果

a) 各種抵抗要素の効果

各ケースで杭が曲げ降伏耐力に到達するときの水平震度を基本ケース(Case1)での水平震度で正規化したグラフを図-8に示す。図中の縦軸は基本ケースに対する杭の降伏震度の上昇率を示している。杭の降伏震度は、フーチング前面の水平地盤抵抗を考慮した場合(Case2)で15%程度、柱前面の水平地盤抵抗を考慮した場合(Case3)で10%程度、フーチング底面のせん断地盤抵抗を考慮した場合(Case4)で10~15%程度上昇する。これらの影響を同時に考慮した場合(Case5)では15~30%程度増加している。ところで、Case3,4,5において橋脚の降伏震度の上昇率がラーメン高架橋よりも小さいが、これは橋脚の土被り(0.5(m))がラーメン高架橋(1.1(m))に比べて小さいためであると考えられる。また、Case5,6,7は土被り厚をパラメータにした解析であるが、土被りが厚くなるほど、杭の降伏震度は大きくなる傾向が認められる。

同様に、杭がせん断降伏耐力に達するときの水平震度を基本ケース(Case1)の水平震度で正規化したグラフを図-9に示す。なお、橋脚の基礎杭は2基とも曲げ破壊モードであったため、図中から除外している。杭のせん断降伏震度は、フーチング前面抵抗、

柱前面抵抗、フーチング底面抵抗をそれぞれ単独で考慮した場合(Case2,3,4)では10~20%程度上昇している。また、これらの影響をすべて同時に考慮した場合(Case5)および地中梁の影響を考慮した場合(Case5+地中梁)は、杭のせん断降伏震度は約1.5~1.7倍に増加している。

以上のことより、現行の設計法で無視している基礎周辺の地盤抵抗を考慮した場合、杭の曲げおよびせん断の降伏震度が大きくなる傾向があることが確認できた。

b) 各種地盤抵抗のメカニズムの検討

a)では基礎周辺の地盤抵抗を考慮すると杭の曲げ降伏震度が大きくなることを確認したが、本節では、そのメカニズムについて考察する。なお、以下の議論は、橋脚①を取り上げて行うこととする。

まず始めに、構造物に作用する慣性力、杭頭せん断力、および基礎周辺の各種地盤抵抗要素で負担する水平荷重が水平震度の増加とともにどのように変化するかについて調べた。その様子を図-10に示す。図中の横軸に作用させた水平震度を取り、その時に発生する慣性力、または各種地盤抵抗の水平抵抗力を縦軸に取った。同図(a)は基礎周辺の地盤抵抗要素を考慮しないケース(Case1)を、同図(b)はフー

チング前面と柱前面の水平地盤抵抗, およびフーチング底面のせん断地盤抵抗を同時に考慮したケース (Case5)を示す。

図-10(a)に示すように, 基礎周辺の地盤抵抗を考慮しない場合(Case1)には, 構造物に作用する慣性力は, その大部分が杭頭のせん断力で負担されることが分かる。ここで, 構造物に作用する慣性力と杭頭せん断力が完全に一致していないのは, 骨組み解析において, 杭前面の水平地盤抵抗を表現する節点ばねを杭頭部にも設けているが, その節点ばねで構造物に作用する慣性力の一部が負担されているためである。ここでは, その値が微小であるため, その影響を無視して議論を進めることとする。

一方, 図-10(b)に示すように, 基礎周辺の地盤抵抗要素を考慮した場合(Case5)では, 水平震度が0.15までは, 構造物に作用する慣性力は, その大部分がフーチング底面のせん断地盤抵抗によって負担され, フーチング前面の水平地盤抵抗や杭頭せん断力での負担は小さい。水平震度においてフーチング底面のせん断地盤抵抗要素が降伏すると, それ以降の慣性力の増分は, フーチング前面の水平地盤抵抗と杭頭せん断力で負担するようになる。さらに, 水平震度においてフーチング前面の水平地盤抵抗要素も降伏に到達すると, それ以降の慣性力の増分については, 杭頭せん断力だけで負担するようになる。なお, 柱前面の水平地盤抵抗要素は, 水平震度がごく小さいうち($Kh=0.01$)に降伏に達しており, 当該橋脚では柱前面の水平地盤抵抗の影響は極めて小さいことが確認できる。

このように, 基礎周面の地盤抵抗要素は, 杭よりも浅いところに位置するため, 構造物に作用する慣性力を優先的に負担することが分かる。また, これらの地盤抵抗要素が降伏するまでは, 杭頭に作用するせん断力は大幅に抑制されることも確認できる。

次に, 柱降伏時(水平震度)における地盤反力分布を図-11に示す。同図に示すように, 基礎周辺の地盤抵抗要素を考慮すると, 地盤反力度が抑制されるが, その抑制効果は $\text{Case4} < \text{Case2} < \text{Case5}$ の順に大きくなることが確認できる。これは, 基礎周辺の地盤抵抗によって杭頭部でのせん断力が抑制されると, 地中部に伝達される水平荷重も小さくなることを示している。

最後に, 柱降伏時(水平震度)におけるせん断力分布と曲げモーメント分布をそれぞれ図-12および図-13に示す。図-12に示すように, 地盤反力度が抑制されると, それに応じて杭の発生せん断力は抑制されることが確認できる。また, 解析で考慮する基礎周辺の地盤抵抗要素の種類が増えるにつれて,

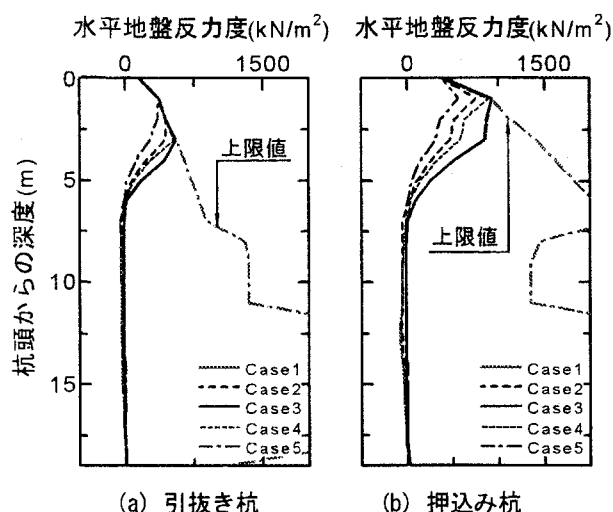


図-11 杭の地盤反力分布 (橋脚①, 柱降伏時)

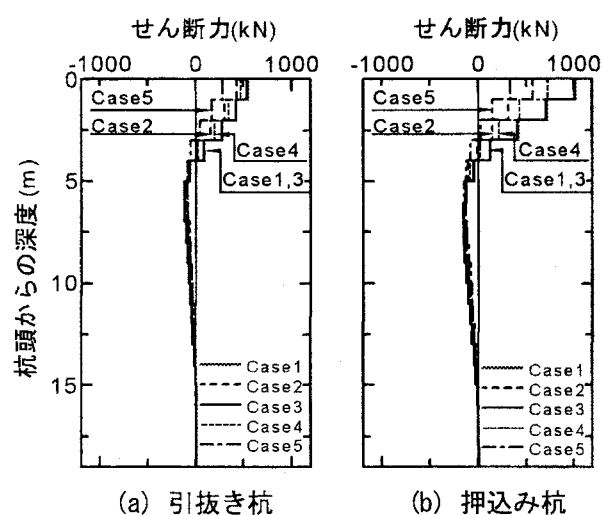


図-12 杭のせん断力分布 (橋脚①, 柱降伏時)

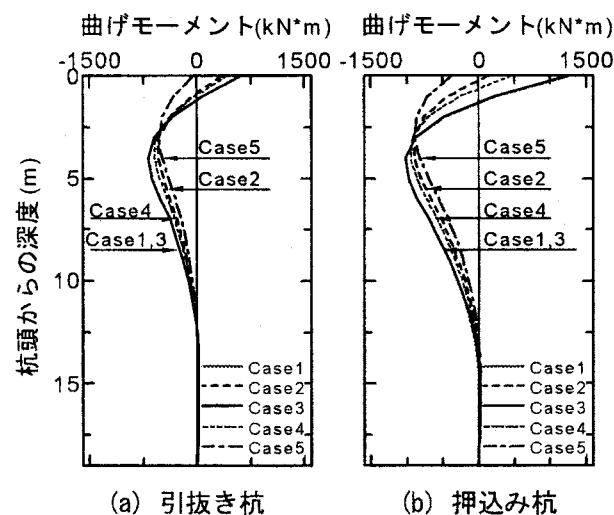


図-13 杭の曲げモーメント分布 (橋脚①, 柱降伏時)

累加的に発生せん断力の抑制効果が発揮されることも確認できる。

また, 図-13に示すように, 杭の曲げモーメント

は、杭頭部においては、解析で考慮する地盤抵抗要素の種類が増えると累加的に抑制されることが確認できる。また、地中部においては、曲げモーメントの最大深さが浅くなっていく傾向が確認できる。

以上より、基礎周辺の地盤抵抗要素は、杭よりも浅いところに位置するため、構造物に作用する慣性力を優先的に負担し、その結果、杭頭せん断力は著しく抑制されることが分かった。また、杭頭部せん断力が抑制されると、地中に伝わる水平荷重が小さくなり、その結果、地中部においても発生せん断力や曲げモーメントが抑制されることが分かった。

4. 提案モデルの妥当性の検証

2003年に発生した三陸南地震で実際に被害が生じた構造物を対象に、実被害状況³⁾と、提案法による解析結果の整合性を検証した。被害状況は柱がせん断破壊しており、杭については目視調査結果(図-14)より無被害と判断された。現行の設計ルールに準じた解析(従来法: Case1)をおこなったところ、図-15に示すように、破壊モードとしては、杭部材のせん断破壊が先行し、その後、柱がせん断破壊するという順序になっている。柱が想定した地震荷重でせん断で損傷したことは解析的にも説明できたが、杭がせん断損傷するという解析結果は実被害状況と合致しないことが分かる。

そこで、提案した基礎周辺の地盤抵抗(提案法: Case5+地中梁)を考慮した解析をおこなったところ、柱部材のせん断破壊が先行し、その後、杭がせん断破壊杭するという順序になり、かつ、想定地震荷重では杭は損傷しない解析結果が得られ、実被害状況を説明できる結果となった。

以上より、基礎周辺の地盤抵抗に関する提案法が既設構造物を評価する際に有効な手法の一つであることが確認された。

5. まとめ

現在の耐震設計法は、設計を安全側にするための配慮から、基礎周辺の地盤抵抗は無視されているが、基礎の現有耐力を正しく評価することができれば、効果的な耐震補強を実施することが可能になる。

そこで、既設構造物の耐震性能評価手法の確立を念頭に置き、基礎周辺の地盤抵抗要素の評価モデルを構築した上で、各種地盤抵抗要素が基礎の耐震性能にどのような影響を与えるのか検討した。その結果、基礎周面の地盤抵抗や土ばりの影響は、曲げ降伏震度で10~30%程度、せん断降伏震度で10~50%



図-14 杭頭部の地盤状況

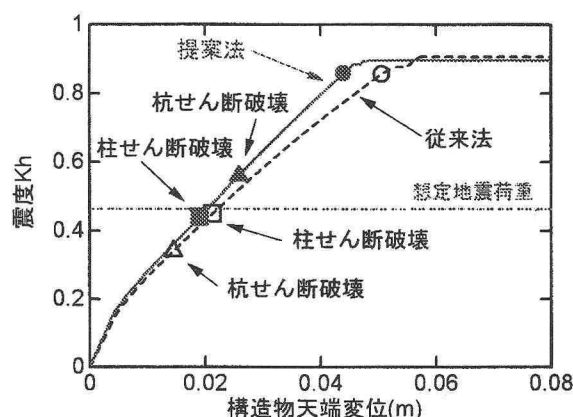


図-15 三陸南地震の被害解析結果

程度上昇させる効果があることを確認した。

また、2003年に発生した三陸南地震で被害が生じたラーメン高架橋において、現行設計法による解析を実施したところ、杭目視調査では杭が無被害であったにもかかわらず、解析では杭のせん断破壊先行モードであることを確認した。そこで、提案する基礎周辺の地盤抵抗要素の評価モデルを適用して解析したところ、実際の被害状況と合致する結果が得られた。

以上のことより、既設構造物の耐震性能を評価する際には、建設時からの経過年数や地盤の状況を把握し、基礎周辺の抵抗要素を的確に考慮することで、既設構造物の現有耐力を正しく評価することができ、効果的な耐震補強を実施することに繋がることを確認できた。

参考文献

- 1) 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，丸善出版，1999。
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物，丸善出版，2000。
- 3) 滝沢聡，荻原郁男，室野剛隆，館山勝，弥勒綾子，桐生郷史：地震被害を受けた高架橋の基礎調査及び解析(その1)，第59回土木学会年次学術講演会，2004。9。