地中梁水平地盤抵抗および鋼矢板囲い込み工を考慮した設計モデルの提案

Design analysis model on additional effects of ground resistance with underground beams and steel sheet-piles.

> 近藤政弘*,常田賢一**,西山誠治***,神田政幸**** Masahiro Kondou, Kenichi Tokita, Seiji Nishiyama, Masayuki Kouda

*工修, ジェ17-ル西日本コンサルタンツ㈱、土木設計部(〒532-0011 大阪市淀川区西中島 5-4-20)
** 工博,大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻(〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)
***工博,㈱日建設計シビル,技術開発部(〒101-0061 東京都千代田区三崎町 3-3-10)
**** 工博,(財)鉄道総合技術研究所、土・基礎研究室(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

In evaluating the pile foundation of existing structures for seismic reinforcement or improvement, it has recently been promoted in trial to evaluate the ground resistance like footing etc. The authors conducted a three dimensional numerical analysis by the calculus of finite difference method in order to grasp the effects of ground resistance around underground beams and steel sheet-piles. We proposed the design analysis model, demonstrated the effect of them and calculated existing pile of railway structure by this model.

Key Words: seismic design of foundation, underground beam, sheet pile, 1 column with 1 pile キーワード:基礎の耐震、地中梁、鋼矢板、1柱1杭

1. はじめに

近年、鉄道においては、既存路線同士の乗り入れや駅 改良等に伴って既設の構造物を改良する事例が増加して いる(図-1)。既設構造物を改良する際には、既設の耐震 性が課題となる場合が多い。これは、既設への継足しに よって構造系が変わり、部位によっては発生断面力が増 加すること、また建設当時の設計基準はL2地震動等の 要求を満たしていないことがあげられる。耐震性評価に あたって、基礎は上部構造と比較して未解明である点が 多いが、近年、基礎の抵抗として杭以外のフーチング等 地中部材周辺の地盤抵抗が着目されている 12%。これまで の設計では、構造物周辺の地表面変化や埋戻し土の不確 実性をふまえ、これらの抵抗を考慮しないのが一般的で あったが、L2 地震に対する検討が求められるようになっ た現在、一定の要件を満たした場合は積極的に評価して いくことが必要と考える。ここでは鉄道高架橋で一般的 な1柱1杭式の構造物を対象に、杭以外の地中部材であ る地中梁の水平地盤抵抗に着目した。また、この抵抗を より向上させる簡易な補強法として、鋼矢板による囲い 込み工 3を取上げた。これらの評価方法を検討するため、 3次元 FEM による解析的検討を行い、解析結果をもと に設計で適用できる平面骨組み解析での評価方法を検討 し、実高架橋の設計への適用を試みた。本検討での流れ



2. 対象構造物および解析の概要

2.1 対象構造物

図-3 は、既設ラーメン高架橋に新しい高架橋を継足す 改良事例である。地中梁の水平地盤抵抗としては、前面、底面せん断、側面せん断があるが、このうち抵 抗領域が大きい前面に着目した(図-4)。また、さらに簡 易な基礎の補強工法として、鋼矢板による囲い込み工を 計画した。これは、図-3 に示すように杭基礎および地中 梁を平面的に囲むように鋼矢板を打設するものである。 杭は既設、新設ともに 1.5m、杭長 9m の場所打ち杭、 地中梁は断面が幅 1m 高さ 1.6m である。また、囲い込 み工としての鋼矢板は 型、矢板長さ 3m とした。

2.2 解析ケース

地中梁地盤抵抗および囲い込み工の効果について、3 次元 FEM 解析によって検討する。解析は表-1 に示す 杭の地盤抵抗のみ (CASE0) 杭+地中梁地盤抵抗 (CASE1 ~ 3), 杭+地中梁+鋼矢板囲い込み工 (CASE4~5)を設定する。地中梁地盤抵抗を考慮するケ ースについては、良質な地表面土という前提で N=10 程 度(内部摩擦角 29°)の CASE1 と埋め戻し土の強度が かなり小さい場合 CASE2、地中梁の地震時損傷により 剛性低下を考慮する場合 CASE3 を設定した。剛性低下 を 1/16 としたのは、地中梁部材が最大曲げ耐力(コンク リートが終局ひずみ) に達した時の等価剛性としての低 減等を参考に定めた。なお、地中梁を弾性支床上梁とし ての特性長 1/ : =4 (khD/4EI)で考えれば、1/2 に低下したこととなる。囲い込み工についても、良質土 の場合 CASE4 と埋め戻し土が弱い場合 CASE5 を設定 した。解析結果の荷重~変位曲線より、基本ケース(杭 の地盤抵抗のみ CASE0)と比較した水平抵抗力の増加、 杭への作用力減少率等を求めた。

3.3次元 FEM 解析

3.1 解析モデル

3次元解析におけるモデルは、図-5において点線で囲 んだ地中梁 - 杭 - 地盤のみモデル化した。地中梁地盤抵 抗を考慮しないケースは、模擬的に地中梁の無い構造と するが、杭頭以下の地盤抵抗が等しくなるよう、図-6に 示すように地表~地中梁下面に相当する土の上載荷重を 与えた。また、地中梁の有無で杭頭固定度が変化するた め各ケースとも杭頭自由度は固定(回転は生じない)と した。解析は3次元有限差分法プログラム: FLAC3D4) により、杭、地中梁、鋼矢板部材は弾性体、地盤はモー ル・クーロンの降伏基準に従う弾完全塑性体でモデル化 し、部材と地盤の間にはジョイント要素を加えて、その 間の剥離や滑動を表現できるようにした。ここで、滑動 抵抗力については、地中梁・杭の前面水平抵抗以外は無 視したので0としている。大変形領域では杭、地中梁の 部材も塑性化する可能性が高いが、ここでは地中梁の地 盤抵抗特性に着目するため、地盤以外の杭・地中梁は、







図-4 地中梁前面の水平地盤抵抗

表-1 解析ケース(3次元 FEM 解析)

Case		地盤N値(圴部摩擦角)		部材
		地表~	地中梁下端	地中梁の剛性
		地 梁下端	~杭下端	
0	杭のみ	((十載王のみ)	10 (29°)	—
1	杭+地 梁	10 (29°)	10 (29°)	EI
2	11	1弱(20°)	10 (29°)	EI
3	Л	10 (29°)	10 (29°)	1/16×EI
4	杭+地中梁+矢板	10 (29°)	10 (29°)	E
5	11	1弱(20°)	10 (29°)	EI







図-6 杭-地中梁-地盤と上載圧の設定



弾性体とした。杭 - 地中梁の3次元解析モデルを図-7に、 囲み込み工である鋼矢板補強を行った場合のモデルを図 -8に示す。地盤モデル領域として、荷重作用方向は杭先 端からの受働抵抗領域角度の領域)を満足する範囲、 荷重直角方向は杭径の3倍以上(近い側)を満足させる 領域をとった。また、モデル端部の境界条件について、 地盤側面は鉛直方向固定、水平方向ローラー、地盤下端 は水平・鉛直ともに固定、地中梁端部は鉛直方向固定、 水平方向ローラー(平面的に回転はしない) 杭下端はピ ン結合とした。次に、鋼矢板はシェルでモデル化してい るが、要素の厚さは矢板の断面二次モーメントと等価と した。 矢板特有の曲げ変形特性 (水平方向の曲げは隣接 の矢板に伝達しない)を表現するように、各シェル間の 節点はピン結合とした。なお、鋼矢板の自重は無視して いる。地盤および部材の物性値等を表-2に示す。地中梁 下面から杭先端まで地盤強度は一様とし、地中梁前面の

土 (地表面から地中梁下面)は、各ケースに応じて強度 を設定した。また、地盤は砂質土としているが、解析の 安定性を考えて微小な粘着力も設定した。

3.2 解析結果

杭頭へ水平力を作用させた荷重~変位曲線を図-9 に 示す。水平変位は h/D(杭径)で正規化し、水平荷重 は CASE0(杭のみ)の h/D=1%時相当における水平荷 $重 (<math>H_y=2460$ kN)を用いて H/ H_y と正規化している。場 所打ち杭の場合、L 1 地震時の水平変位は杭径 1%程度 付近、L 2 地震時は杭径5%までの変位が多いことから、 考察する変形量を杭径5%までとした。荷重~変位曲線に おいて直線性が損なわれる点を基礎の降伏点とみた場合、 概ね h/D=1~2%程度で表れている。また、同一変位において基本ケース(CASE0)との差分水平力が、地中梁地盤抵抗および囲み込み工により増加した水平抵抗力とみることができる。これらを算定した結果を図-10 に示 す。CASE0 と比較して、地中梁地盤抵抗を考慮した CASE1~3、さらに囲い込み工を行った CASE4・5 は、 水平抵抗力が増加している。地中梁地盤抵抗考慮ケース で CASE1 と 3(地中梁部材の剛性低下)の差は少ない。 埋め戻し土が非常に軟弱な CASE2 において、基礎の剛 性(荷重~変位曲線の傾き)は他と比較してそれほど大 きく向上しないものの大変形領域に至るまで水平抵抗力 は増加する。なお、これらの水平抵抗力は h/D=2~3% の変位領域に至ると上限値に達し、ほとんど増加しない。 次にこれらの効果(増加した水平抵抗力 H)が全体の 水平抵抗力 H に占める割合を求めた。結果を図-11 に示 す。降伏点付近でみると、地中梁地盤抵抗分の比率が良 質土な場合 CASE1 で約 30%、軟弱土 CASE2 で約 10% に対して、囲い込み工(地中梁+鋼矢板)の場合の比率

は良質土 CASE4 で約 45%、軟弱土 CASE5 でも約 35%程度に増加している。 変形が大きくなるにつれて各々の比率と も減少しているのは、地中梁前面付近の 土が塑性化するのに対して、杭の水平地 盤抵抗はより深い位置での地盤抵抗を発 揮しようとし、地中梁等の分担が相対的 に小さくなるためと考えられる。

4.地中梁前面水平地盤抵抗の考察 4.1 地中梁前面の地盤変形状況

同一作用荷重(水平力 5,000kN 作用時) における基礎前面土の変形分布(平面は 地表面高さ位置、立面は杭前面位置)を 図-12に示す(地表土が良質な場合)。杭 のみ(CASE0)と比較して、CASE1では地

中梁前面土が抵抗すること により、杭頭付近における 杭前面土の変形が小さくな っていることが分かる。平 面的には地中梁前面土の変 形は杭頭から離れると変形 が少なくなるが、鋼矢板囲 い込み工を実施した CASE4においては、CASE1 と比較して杭頭と地中梁全 体が剛体的に変形している。 4.2 地中梁前面の水平

地盤反力

地中梁地盤抵抗考慮の CASE1~3において、地中 梁前面水平地盤反力を推定 するため、杭頭との接合部 も含めた地中梁前面のメッ シュ要素に生じる応力(載 荷方向の直応力)を求めた。



図-11 増加水平力の全水平力に占める割合(3次元 FEM)









図-14 地中梁前面の水平地盤反力係数

表-3 地中梁前面の水平地盤反力係数

水平地盤反力係数(ktNm ³)	k ₁	k ₂
杭結合部(ハカマ部)	12,883	k ₁ ×0.05倍
地中梁(杭結合部除く)	9,453	k ₁ ×0.04倍

地中梁の各位置において生じている水平地盤反力の 値を図-13 に示す。CASE2 を除いては、 杭頭と地中梁と の結合部(ハカマ部という)の方が、結合部を除いた地 中梁前面に生じている水平地盤反力よりも大きい。これ は、ハカマ部の方が先行して挙動して杭頭とともに水平 地盤抵抗を受けるため、他の位置と比較して大きな水平 地盤反力が生じたと考えられる。地中梁の部材剛性が低 下した CASE3 では、杭頭から離れた位置では地中梁の たわみが大きいので、作用荷重が大きくなるまでは水平 地盤反力が発揮していないことが分かる。 実際の地中梁 は、地震荷重の作用中に剛性が低下することが懸念され る。大変形につれて CASE1 から CASE3 へ移行する状 態となり、途中段階で地中梁端部の地盤反力が発揮しに くくなるが、大変形時になると地中梁全幅にわたって同 程度の反力が生じると考えられる。一方、地中梁前面土 が軟弱土の場合 CASE2 は、ハカマ部とそれ以外におけ る水平地盤反力の差は生じていない。

4.3 地中梁前面の水平地盤反力係数

地中梁前面土が良質土な場合、地中梁水平地盤抵抗は 十分発現していることが分かる。ここで、図-14 に CASE 1の水平地盤反力と地中梁の変形との関係(=水平地盤 反力係数)を示す。ハカマ部と地中梁部とに分けて算定 した。各々初期勾配にはほとんど差がないが、ハカマ部 の方が水平地盤反力係数は低下しにくい。これは杭頭と ともに先行挙動しており、受働抵抗に寄与する土の領域 が大きいことが考えられる。次に骨組解析で適用する地 盤ばねを設定する。図-14 に示すように、水平地盤反力 係数の低下が顕著となる点で勾配を変化させるバイリニ ア型のモデルとする。各々の曲線に合うように第1勾配 k_1 、第2勾配 k_2 の値を設定した。ハカマ部、地中梁部で 設定した水平地盤反力係数を表-3 に示す。







図-16a) 擬似3次元平面解析(地中梁地盤抵抗考慮)





5.擬似3次元骨組み解析の提案

5.1 解析モデル

群杭基礎のフーチングについては、その前面水平地盤 抵抗を考慮する事例はあり、平面骨組み解析においては、 杭頭(フーチングと杭の結合部)に一つの水平地盤ばね で表現してきた⁵⁾。同様に高架橋(1柱1杭)で考えれ ば、図-15の解析モデルとなる。しかし、3次元 FEM 解 析結果で示したように、フーチングと異なり地中梁は剛 体的に変形しないので、これを表現するモデルが望まし い。立体解析案もあるが、設計実務においては2次元の 平面解析が主流であるため高度な解析モデルとなってし まう。そこで、図-16 に示すように擬似3次元モデルを

表-4 擬似3次元骨組み解析の設計値

	ヤング係数	水平地盛反力系数%	有效抵抗土庄	
	E (kN/m²)	k _b (kN/m³)	(地盤まねの上限直)	
地中梁	2. 65×10^7	3次元 FEM 逆解析	3 次元 FEM 逆解析	
杭	1.96×10 ⁷	22, 140	受働土王 (杭幅×3)	
鋼矢板	2. 00 × 10 ⁸	59, 600	受働土圧(杭幅×1~1.2) ※	
※1:水平地盤ばねは、水平地盤反力係数に当該面積を乗じて算定する				

※1. ホー地温はねば、ホー地温及力味致に当該面積を楽して、 ※2: 深さ方向により1~1.2 まで変化

提案する。図-16 a)は地中梁の水平地盤抵抗を考慮する モデル、図-16 b)は鋼矢板による囲い込み工を実施する 場合のモデルである。これは奥行き方向に位置する地中 梁を同一平面上に配置させ、地中梁自体の剛性や地中梁 の各位置における水平地盤反力特性が考慮できるよう設 定したモデルである。通常、地中梁中央部のたわみが最 大であること、面外方向の損傷は小さいことをふまえ、 地中梁スパン中央は曲げ変形曲率が無しと考えられるの で、地中梁長の半分までの部材長を設定し、この部分を 回転拘束・水平ローラー支持されたモデルとした。

5.2 3次元 FEM 解析との比較

擬似3次元骨組みモデルにおいては、杭と地中梁との 結合部(ハカマ部)に相当する水平地盤ばねと、結合部 を除く地中梁の水平地盤ばねに分け、各々3 次元 FEM から求まる地盤反力度(ハカマ部と地中梁各々の要素の 平均した地盤反力度)を用いて水平地盤ばねを設定した (表-3 参照)。また、杭についての水平地盤ばねは設計 標準 5%に準じて設定したが、完全弾塑性型とはせず地中 梁と同様に第2勾配を設けた。これはCASE0(杭のみ) のシミュレート(3次元 FEM と骨組解析)が合うよう設定し た。なお、鋼矢板前面の水平地盤ばねは第2勾配を設け なかった。これらの設定値を表-4に示す。杭のみの CASE0、地中梁前面土が良質な場合における地中梁地盤 抵抗を考慮するCASE1および鋼矢板による囲い込み工 を行った CASE4 について、擬似3次元骨組み解析と3 次元 FEM 解析の比較を示す。 杭頭位置での荷重 ~ 変位 曲線を図-17 に示すが、CASE0,1,4 ともに概ねよく一致 している。また、3次元 FEM 解析結果の整理と同様に CASE0 との水平抵抗力差分を地中梁考慮等の増分効果 (H)とし、増分水平力と変位の関係を図-18 に、水 平抵抗力が全水平力に占める割合と変位の関係を図-19 に示す。両者は概ね一致しているが、特に鋼矢板による 囲い込み工の場合、大変形領域で骨組解析が過小評価と なる。鋼矢板地盤ばねの第2勾配を0とした影響と考え る。次に、良質土の場合で CASE 1 と地中梁剛性を低下 させた CASE3 とでは、地中梁剛性の違いから地中梁の 分担率が異なる。この事象を擬似3次元骨組み解析でシ ミュレートできるかどうか確認した。結合部を除いた地 中梁の水平地盤反力の合計が杭基礎全体に作用する水平 力に占める割合を地中梁の分担率として求め、分担率と 変位との関係を得る。3次元 FEM と擬似 3次元骨組み 解析各々の結果を図-20 に示す。両者の結果は良く一致 しており、本提案の骨組解析で地中梁自体の剛性による









変化も良く表現できている。しかし、杭径 0.5~2% (/ D)の変位付近で、骨組み解析がやや過大評価となっており、L1 地震レベルでの適用には改善の余地があると考えている。

6.実高架橋の設計適用

6.1 検討ケース

前述の図-3 に示す構造物を試設計対象とした。地盤は 砂質土で地表~地中梁下面まで N=10、地中梁下面~杭 先端は N=20、支持層は N=50 とした。表-5 に検討ケー スを示す。従来のこれまでの設計方法(Case1)と地中梁水 平地盤抵抗を考慮した場合(Case2)、鋼矢板補強を行っ た場合(Case3)を実施し比較を行う。なお、鋼矢板補 強は 型、長さ 3m の鋼矢板により地中梁周囲を囲むも のとし、鋼矢板と地中梁の間は間詰ンがリートを施している。

6.2 検討モデル図

地中梁水平地盤抵抗を評価するモデルは、前述図-16a)に示したとおり、地中梁が奥行き方向に存在する 3次元的な効果を擬似的に2次元骨組み解析上で表現し たもので実施した。一方、鋼矢板の補強モデルを図-21 に示す。3次元 FEM 解析結果において鋼矢板で囲んだ 地中梁前面は、水平地盤反力が全幅にわたって同程度で あるので、ここでは図-16b)と図-21 に示す奥行き方向を 一つの断面に集約するモデルでも相違は小さいと考えた。

図-21 における地盤ばねの設定について、直接基礎を 鋼矢板で併合したシートパイル基礎 [¬]として鉄道総研等 が開発したモデルを参考とした。今回杭基礎を取り囲ん だものとしての適用は検討の余地があるが、水平抵抗分 のみは同様としてモデル(鋼矢板前面の水平地盤ばね、 側面の水平せん断地盤ばねの設定)を適用した。鋼矢板 の鉛直方向地盤抵抗については、地中梁と鋼矢板が曲げ を伝える剛な結合を施していないので考慮していない。

6.3 設計結果

1)荷重~変位曲線:高架橋天端における荷重~変位曲 線を図-22 に示す。基礎の損傷過程については、Case1,2 とも同様で、 杭部材(引抜き側)が曲げ降伏耐力に達 した後、 引抜き力が抵抗力の上限値に達し、 その後 に押込み力が最大鉛直支持力に達して急激に変形量が増 大する様相を示している。鋼矢板補強の Case3 もほぼ同

表-5 実高架橋の試設計ケース

Case	概要
1	地中梁水平地盤抵抗考慮無し
2	地中梁水平地盤抵抗考慮有り
3	鋼矢板囲い込み工



図-21 囲い込み工の試設計解析モデル

様だが、引抜き力上限と部材損傷が逆転している。それ ぞれの損傷に対応する水平震度は、Case1 から3 になる ほど大きくなっており、例えば杭(引抜き側)の曲げ降 伏耐力に達する震度は、Kh=0.53(Case1)0.61(Case2) 0.67(Case3)となる。また、構造物の変形量については、 Case1 から3 になるほど小さくなっており、例えばKh= 0.4 時の柱上部における変形量は、約50mm(Case1)約 45mm(Case2)約30mm(Case3)となる。

2)地中梁抵抗および鋼矢板補強の効果: Case2,3 におい て、杭が損傷する震度が大きくなるのは、Case1 と比較 して杭発生断面力が減少しているからである。杭に発生 する断面力減少量を整理する。各震度における杭荷重分 担率を求めた結果を図-23 に示す。これは Case 1 での杭 3 列分の発生断面力合計を 100 とし、Case2,3 の場合の 発生断面力合計がどの程度の割合になるかを算定したも のである。発生せん断力の低減は、杭頭部における地中 梁や鋼矢板による増分水平抵抗力そのものの割合と考え られる。水平震度 0.4 付近までは、地中梁地盤抵抗を考





図-23 各試設計ケースにおける杭断面力割合

慮した Case2 で約 40%、鋼矢板囲い込み工まで行った Case3 で約 80%とかなりの低減効果が得られた。それ以上 の震度になると杭の荷重分担率はやや大きくなっている。 地中梁地盤抵抗等は地表部付近の水平抵抗力であり、杭 全体の抵抗力と比較して早く降伏状態になるためと考え られる。曲げモーメントについては、水平震度 0.4 付近 において Case1 では約 20%、Case2 で約 40%の低減効果 が得られた。また、水平震度が増加(変形が増加)してい る過程での杭分担率の変化(曲げモーメント)について は、せん断力の場合とは違い Case2 と3 で異なる傾向と なった。鋼矢板補強の場合、特に初期変形レベルで基礎 全体が剛体的に挙動し、基礎全体の回転が抑制されると 考えられる。一方、地中梁前面の水平地盤抵抗のみでは、 杭頭位置での水平抵抗のみであり、鋼矢板補強のように 剛体的に挙動しないためである。

7.おわりに

地中梁前面の水平地盤抵抗および鋼矢板による囲い込 み工によるさらなる効果を3次元 FEM 解析により検討 し、これらの特性を考慮した試設計を行った。

地中梁はフーチングとは異なり剛体的な挙動をせず、 杭との結合部が挙動することによって地中梁が追従して 変形する。したがって、杭との接合部前面が相対的に大 きな水平地盤反力を生じること、また、地中梁自体の剛 性によっても生じる水平地盤反力が異なることが分かっ た。これらの特性をふまえ、設計実務に適用できる擬似 3 次元の平面骨組み解析モデルを提案し、本設計解析モ デルの妥当性を3次元 FEM 解析の比較という点から示 した。地表面土が良質土であれば、これらを考慮するこ とによって杭に生じる断面力は低減できる。地中梁水平 地盤抵抗のみの考慮でも、特にせん断力の低減効果が大 きいことが分かった。しかし、地中梁前面土が軟弱であ る場合、懸念される地盤変位の影響が大きい。今後、動 的な影響について検討していきたい。

最後に、このような試設計の検討機会を与えて頂いた JR西日本関係者の方々に感謝いたします。

参考文献

1)松浦他,橋脚杭基礎のフーチング前面抵抗の影響に関 する考察,土木学会第 51 回年次学術講演会,平成 8 年 9 月

 2) 室野剛隆他,地震被害を受けた高架橋の基礎調査及 び解析(その1)(その2),土木学会第59回年次学術講 演会,平成16年9月

3) 西岡英俊、神田政幸、西村昌宏他,シートパイルで補強 された杭基礎の模型水平載荷試験,土木学会第63回年次 学術講演会,平成20年9月

4)井原和弘、土方勝一郎、杉山達也他,地盤のすべり面 における杭基礎のせん断抵抗機構に関する解析的検討, 日本建築学会大会学術講演概要集,2006年9月

5) 運輸省鉄道局監修,鉄道総合技術研究所編:鉄道構造 物等設計標準・同解説 基礎構造物,平成9年3月 6) 運輸省鉄道局監修,鉄道総合技術研究所編:鉄道構造 物等設計標準・同解説 耐震設計,平成11年10月 7)鉄道総合技術研究所、(株)大林組,鉄道構造物に適用する シートパイル基礎の設計・施工マニュアル,平成18年3 月

(2008年9月18日受付)