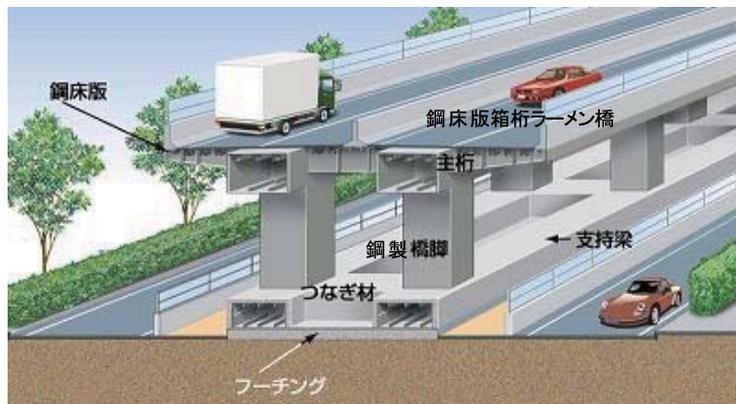


急速施工立体交差工法【UFO工法】の開発と 実施工における効果

Development and Effects of the 'UFO Method'
(Accelerated Construction Method for Overpasses)



美島 雄士 Yuji Mishima ①

若林 保美 Yasumi Wakabayashi ②

あ ら ま し

都市部における多くの主要交差点では慢性的に交通渋滞が発生しており、経済損失や環境への影響が問題となっている。渋滞解消を目的に立体交差橋を建設する場合、工事中のさらなる渋滞の発生を抑制するため、現地工期の短縮や交通規制を最小限とすることが重要となる。UFO工法はこのような社会的要請に応えるべく当社が1989年に考案した工法であり、現在までに3橋の実績を有している。UFO工法の最大の特徴は、従来、現地施工に多くの時間を費やしていた基礎構造に対して軽量でプレファブ化した鋼製の直接基礎を採用することによって現地工期を大幅に短縮した点である。鋼製直接基礎には2つの形式があり、現地の条件に応じて選定することにより現地施工期間を従来工法に比べて50%以上短縮できることが実施工において実証された。

Abstract

Traffic congestion at intersections is a serious problem in urban Japan because it causes economic loss and environmental degradation. Shorter construction periods and minimal traffic restrictions are needed to prevent further congestion during the construction of overpasses. The 'UFO method' was developed by us in 1989 to provide an engineering solution to society's demands. The UFO method has been applied in the construction of three overpasses to date. The greatest advantage of this method is the considerable reduction in local construction time it offers by enabling the use of lightweight, prefabricated steel members in the construction of the foundations, which has previously been a very time-consuming task. According to the UFO method, there are two types of steel spread foundations. The projects demonstrated that the UFO method can be successfully used to reduce the on-site construction period by over 50%, compared to conventional methods, by selecting the type of foundation that best matches the conditions of the site.

1. 諸 言

国土交通省による最近の調査では、日本全国において交通渋滞の解消が必要な交差点は約2,000箇所を数えており、都市内道路の機能向上対策として交差点、踏切等の交通渋滞の解消が重点課題となっている。

交差点の立体化は渋滞解消に対して極めて有効な手段であるが、渋滞箇所に立体交差橋を建設する場合、工事期間中の交通規制による新たな渋滞の発生や、施工時の騒音・振動による周辺環境の悪化などの問題が発生する。

このような背景から、立体交差橋の工事期間を大幅に短縮することで交通規制によって生じる経済損失や環境悪化を低減できる急速施工技術への社会的要請が高まっている。

鋼製の直接基礎を有する鋼橋を用いた急速施工法「Uni-Fly-Over工法」^①(以下、UFO工法)は、このような社会的要請に応えるべく当社が1989年に考案した工法であり、現在までに3橋の実績を有している。UFO工法の最大の特徴は、従来、現地施工に時間のかかっていた基礎構造に対して軽量でプレファブ化が可能な鋼部材を採用することによって現地工期を大幅に短縮した点である。

本論文では、まずUFO工法の開発コンセプトと特徴について述べ、次に、本工法の最大の特徴である鋼

① Hitz日立造船㈱ 機械・インフラ本部 鉄構ビジネスユニット 技術士(建設・総合技術監理)

② Hitz日立造船㈱ 機械・インフラ本部 鉄構ビジネスユニット 技術士(建設)

製直接基礎の開発の概要について説明する。そして最後に、UFO工法を採用した実施工について工事概要と現地工期の短縮効果を紹介する。

2. 開発コンセプト

UFO工法の開発では、上下部基礎工を含めた現地工期の短縮と交通規制期間の最小化に主眼をおいた。開発にあたっては、従来の問題点とそれに対する解決策を検討した上で、以下の条件を設定して工法を具体化した。

- 1) 現地工事期間を要する土工、コンクリート工を出来る限り用いない。
- 2) 部材のプレファブ化を図り、現地工期が短縮できる構造とする。
- 3) 特に、現地施工が主体で施工に時間のかかる基礎構造に対しては、構造の合理化やコンパクト化を行う。
- 4) アプローチ擁壁部の施工は高架部と並行して行うものとする。
- 5) 施工法に普遍性を持たせるため、架設は汎用機材により行い、特殊な機材を用いなくても施工可能なものとする。

UFO工法は支持層の深さが5m程度の場合に適用する直接基礎を対象として、上記1)～5)に着目した開発により現地工期をコンクリート構造を主体とする従来工法の50%以下に大幅短縮することを目標とした。

3. UFO工法の特徴

コンセプトに基づき開発したUFO工法の構造概要を図1に示し、構造の特徴を以下にまとめる。

(1) 上下部一体の連続鋼床版箱桁ラーメン橋

上下部工はプレファブ化によって現地工期の短縮を図ることができる鋼床版箱桁と鋼製橋脚とで構成し、それらを一体ラーメン構造とした。これにより路面高を低くして立体交差橋の全長を短くすることが可能となる。また、耐震性も向上し、さらに支承と伸縮装置が削減できるため走行性が向上するとともに、維持管理

費用も低減することができる。

(2) **鋼製直接基礎** 従来の高架橋は上下部工に自重の大きなコンクリート構造を用いているため、必然的に基礎工の構造寸法が大きくなる。このため、工事期間の長期化のみならず施工ヤードの大型化により、現道への交通規制の影響も著しいものとなっていた。

UFO工法は鋼製の上下部工により軽量化が図られているため、基礎に作用する荷重が小さく、基礎部材にプレファブ化した鋼部材を採用することが可能となる。具体的には、本工法の直接基礎の基本構造は図1に示す格子状に配置した支持梁・つなぎ材と呼ぶ鋼製の基礎部材とその下に敷いた薄厚のコンクリートフーチングで構成される。

上下部工からの荷重は格子状に配置された鋼製の直接基礎部材からコンクリートフーチングを介して地盤に効率的に分散される。なお、鋼製直接基礎の部材の防せい防食には塗装と防護コンクリートを併用することにより長期耐久性を確保している。

鋼製直接基礎には図2に示すように2つの形式がある。一つは、橋軸方向の複数の橋脚間に鋼製基礎部材を連続して設置する橋軸方向連続フーチング形式（以下、連続フーチング形式）。もう一つは、橋軸方向の1つの橋脚に対して鋼製基礎部材を設置する橋軸方向単独フーチング形式（以下、単独フーチング形式）である。橋軸直角方向については、4車線道路の場合、幅員寸法から2本の橋脚を設置することになるが、何れの形式も2本の橋脚を鋼製基礎部材で一体化する。

連続フーチング形式は、地盤の強度に比べ上下部工

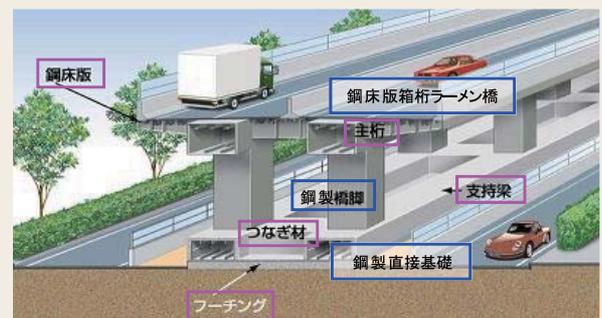
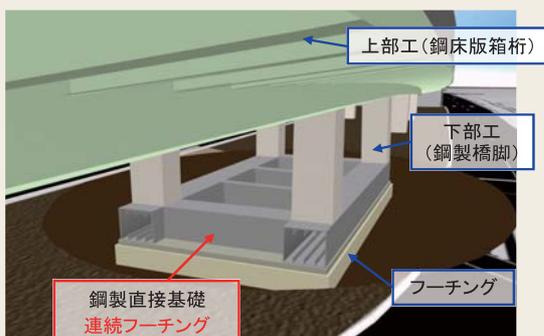
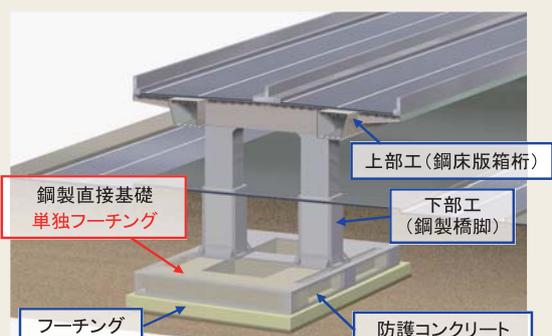


図1 UFO工法の構造概要



(a) 連続フーチング形式



(b) 単独フーチング形式

図2 鋼製直接基礎の形式

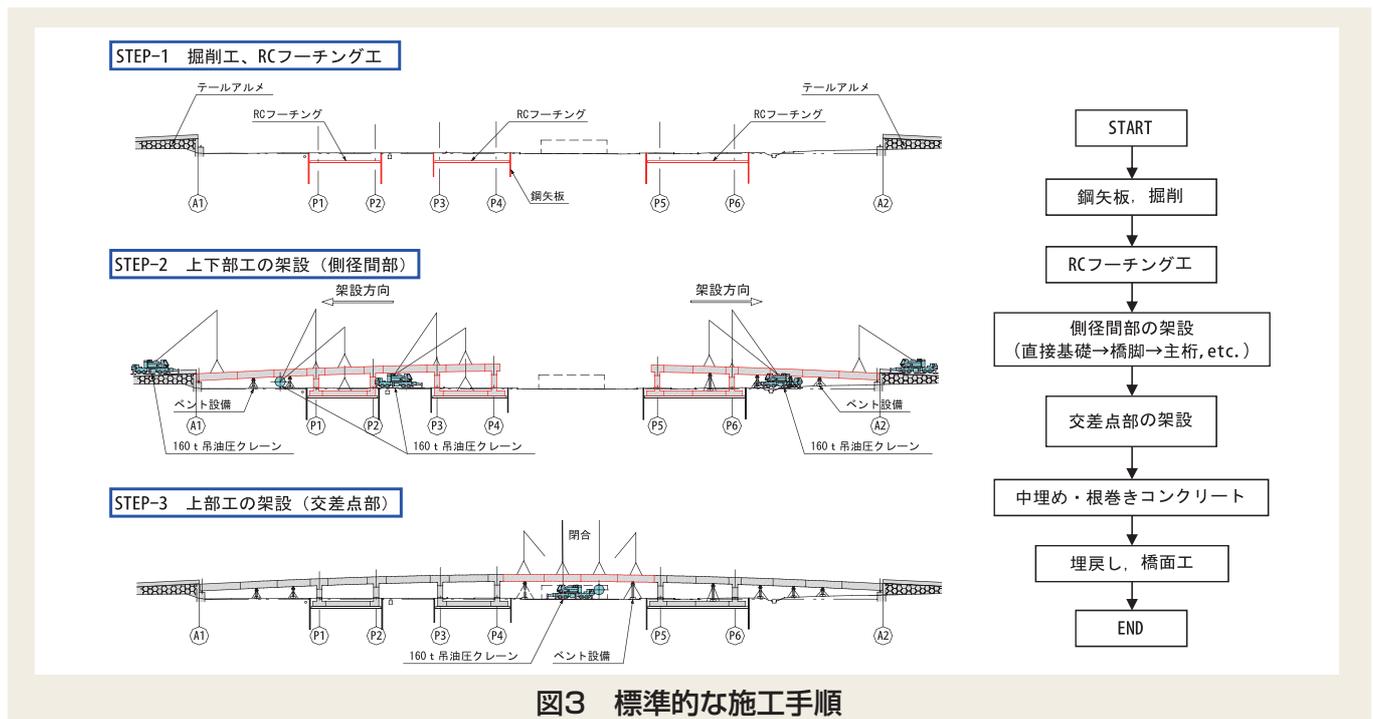


図3 標準的な施工手順

からの荷重が大きく、反力を広い面積で地盤に分散する必要のある場合に採用する形式である。そのため、鋼製直接基礎から地盤に作用する反力分布は従来の鉄筋コンクリート製直接基礎（以下、従来基礎）とは異なり不均一となる。一方、単独フーチング形式は、上下部工からの荷重に比べ地盤強度が大きく、比較的狭い範囲で地盤に反力を伝達する形式である。この形式では過度な反力の集中を避けるため鋼製基礎部材は所定の剛性を確保し、反力分布を従来基礎と同様ほぼ均一とする必要がある。

以上のようにUFO工法は上下部・基礎工のほぼ全てがプレファブ化された部材であり、さらに基礎部材が合理化、コンパクト化されているため、従来工法に比べて大幅な工事期間の短縮と施工ヤードの縮小を図ることが可能となる。

(3) 現地施工法 鋼部材の架設工法は経済的で汎用性があり、また機動性の高いトラッククレーン工法を基本とした。この施工法を採用することにより施工ヤードの縮小が図れるため、中央分離帯を施工ヤードとした部材のサイクル架設や、取合部(擁壁)との並行作業などが可能となる。

UFO工法の標準的な施工手順を図3に示す。本図より、施工手順は、まず橋脚基礎部分を掘削した後、薄厚のコンクリートフーチングを施工する。次に、基礎部材→橋脚→上部工の順にサイクル架設する。側径間部の架設終了後、交差点に向かって中央径間部の架設を行い、最後に交差点直上を落とし込みで架設する。UFO工法は上下部工から基礎工までを一体化したラーメン構造であることから、鋼部材の製作精度が完成時の出来形精度に大きく影響する。そのため、予め製作工場にて図4のように仮組立を行って部材の精度を厳しく管理する。

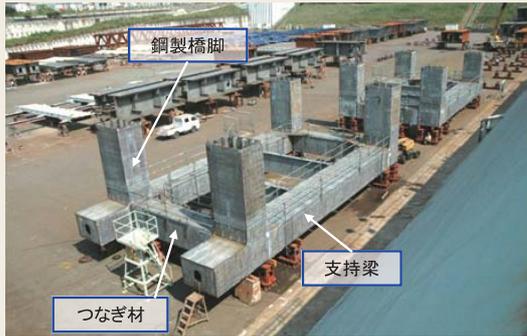
4. 鋼製直接基礎の開発

4.1 概要 UFO工法の最大の特徴は、軽量、コンパクトでプレファブ化した鋼製の直接基礎を用いることにより、現地施工期間の大幅な短縮と施工ヤードの縮小を可能にした点である。しかし、過去にはこのような鋼製部材を直接基礎に用いた事例はなく、この構造を確立するためには、従来基礎との比較による技術的課題の抽出とその解決が不可欠であった。鋼製直接基礎は上下部工からの荷重や地盤強度等の条件によって連続フーチング形式と単独フーチング形式の2種類を使い分けるため、それぞれの技術的課題を抽出して検討する必要がある。以下では、鋼製直接基礎の構造を確立するために実施した開発の概要について説明する。

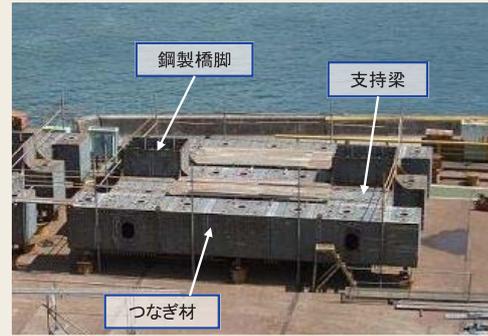
4.2 連続フーチング形式

(1) 技術的課題 直接基礎が従来基礎の場合、基礎の安定性は道路橋示方書²⁾の規定に準じて検証する。具体的には、地盤反力をほぼ均一にするのに必要な厚さを基礎に確保することによって基礎を剛体とみなし、その条件において支持力、転倒および滑動に対する安定性の照査を行うのが一般的である。

一方、本工法の連続フーチングは図2で示したように、従来基礎に比べると剛性の低い鋼製の部材が橋軸、橋軸直角方向ともに配置される。橋軸直角方向は基礎部材の支間が短いため剛体としての剛性確保は可能である。しかし、橋軸方向は基礎部材の支間長が最大で20m程度になり、地盤反力の分布は図5のように不均一となるため、剛体としての剛性を確保することは現実的ではない。そのため、本形式では基礎を剛体ではなく弾性体と考えて安定性の照査や



(a) 連続フーチング形式



(b) 単独フーチング形式

図4 鋼製直接基礎の仮組立

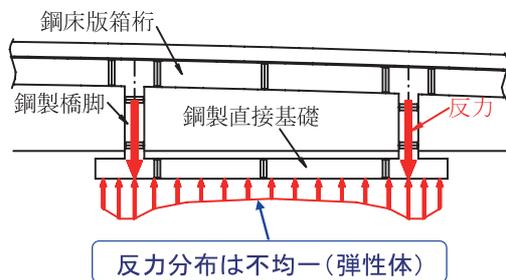


図5 連続フーチングの地盤反力分布

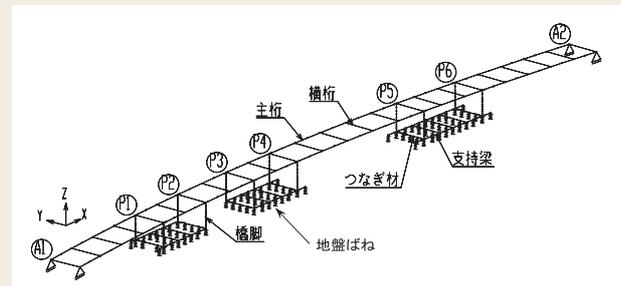


図6 立体骨組解析モデル

部材の設計を行うこととした。

具体的には、上下部・基礎工の設計では、図6に示すように部材をはりでモデル化した立体骨組解析で得られた地盤反力や断面力を用いて基礎の支持力、転倒および滑動に対する照査や部材の断面決定を行う。ここで、骨組解析における基礎部材の支持条件は、支持地盤を現地の土質調査から得られた地盤反力係数を用いて道路橋示方書²⁾に従い計算したばね支点として仮定している。それゆえ、このばね支点の精度が解析結果に大きな影響を与えることとなる。しかしながら、実際の地盤が幅、長さ、深さ方向に広がりのある3次元性を有していることや弾性体とした基礎部材の挙動を考え合わせると、離散的なばね支点を用いた骨組解析が実構造物の挙動を精度良く再現できているかということが問題になる。つまり、連続フーチング形式においては、骨組解析の支持条件の精度を検証しなければ構造の成立性が確認できないこととなる。

以上から、連続フーチング形式の技術的課題としては、設計で用いる支持地盤モデルの妥当性の検証を取り上げた。

(2) 支持地盤モデルの妥当性の検証 支持地盤モデルの妥当性は、実橋梁の縮尺模型を用いた載荷実験と橋梁および地盤を3次元モデルとしたFEM解析の2つの手法を用いることにより検証を行った。

載荷実験は、図7に示すように地盤を模擬した土上に実構造物の縮尺1/10の模型を設置し、この模型に様々な荷重を載荷することによって地盤反力の分布や

構造物の安定性が直接確認できる手法である。骨組解析の妥当性は、実験結果から得られた地盤反力度などと骨組解析の結果とを比較することによって検証した。

FEM解析は、図8に示すように現地の地盤や基礎の諸特性を実物大で忠実にモデル化することによって、地盤反力のみならず実験や骨組解析では把握できない深さ方向に対する3次元的な地盤への影響を明らかにすることが可能となる手法である。解析結果の一例として、常時荷重作用時の鉛直方向応力度の分布を図9に示す。この結果により、骨組解析で求めた地盤反力や部材の応力状態の妥当性が確認でき、さらに深さ方向への反力分散の状況も確認できる。

このように、連続フーチング形式については、縮尺模型を用いた載荷実験や地盤までをモデル化した3次元FEM解析によってばね支点で支持した立体骨組解



図7 縮尺模型による載荷実験

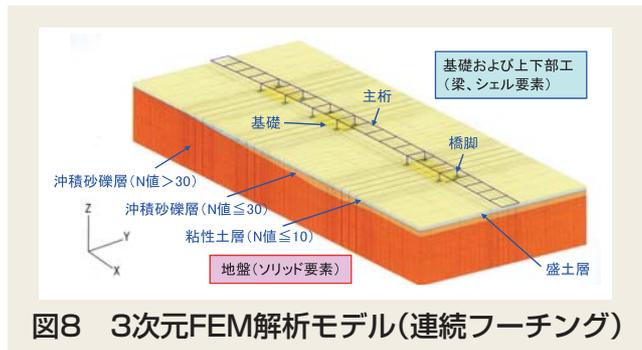


図8 3次元FEM解析モデル(連続フーチング)

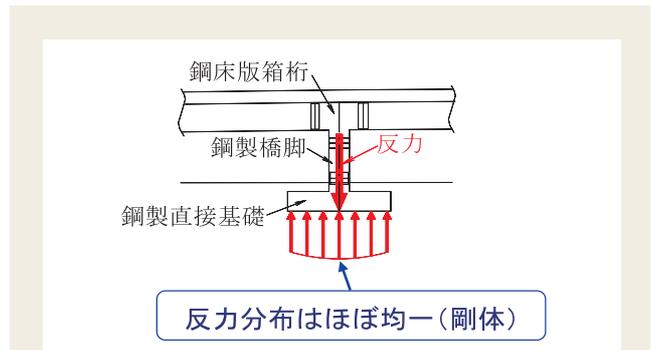


図10 単独フーチングの地盤反力分布

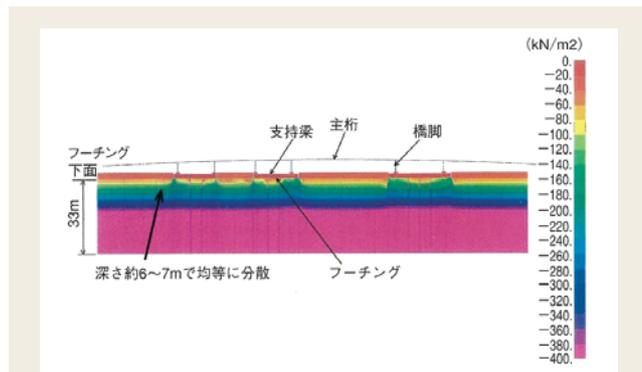


図9 解析結果の一例(鉛直方向応力度分布)

析手法の妥当性が検証され、それにより設計で決定した構造に問題のないことが確認された。

4.3 単独フーチング形式

(1) 技術的課題 上下部工からの荷重に対して地盤強度が比較的大きな場合には、図2で示した経済性や施工性にメリットのある単独フーチング形式が最適となる。この形式では過度な反力の集中を避けるため地盤反力の分布は従来形式と同様、図10に示すようにほぼ均一でなければならず、そのため基礎部材の剛性は従来基礎とほぼ同等程度必要になる。基礎の安定

性は従来基礎と同様、剛体基礎として道路橋示方書の規定に準じて照査を行う。しかしここで、道路橋示方書に規定された基礎の剛性評価方法は従来基礎のように鉄筋コンクリート製の基礎部材を対象としたものであるため、本形式のように鋼製基礎部材と薄厚のコンクリートスラブで構成された基礎にはそのまま適用できない。さらに、剛体と見なすために必要な剛性も本形式のような基礎に対しては具体的な規定がない。

このようなことから、単独フーチング形式の構造を成立させるには、鋼製直接基礎に必要とされる剛性を具体的に規定し、さらにその評価方法を確立することが必要となった。

(2) 鋼製直接基礎に要求される剛性とその評価方法の検討

鋼製直接基礎に必要とされる剛性の指標としては、道路橋示方書の規定の基となった既往の研究論文³⁾を参考にした。具体的には地盤反力度に着目し、図11に示すよう直接基礎を剛体とした場合の地盤反力度 (P_{rigid}) と、弾性基礎である鋼製直接基礎の地盤反力度 ($P_{elast.}$) との差を P_{rigid} との比で表した値を反力の分散度 \bar{P} とし、この分散度が $\pm 20\%$ 以内で

$$\text{地盤反力の分散度 } \bar{P} = \frac{P_{elast.} - P_{rigid}}{P_{rigid}} \leq \pm 20\%$$

$P_{elast.}$: 鋼製直接基礎を弾性とした場合の地盤反力度

P_{rigid} : 直接基礎を剛体とした場合の地盤反力度

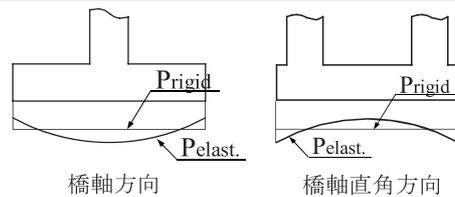


図11 単独フーチング形式に対する剛体の判定

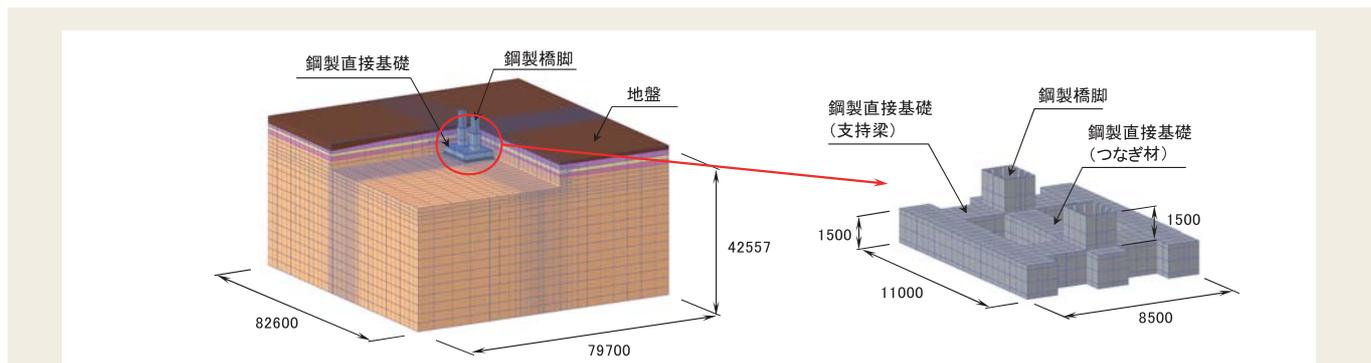


図12 3次元FEM解析モデル(単独フーチング)

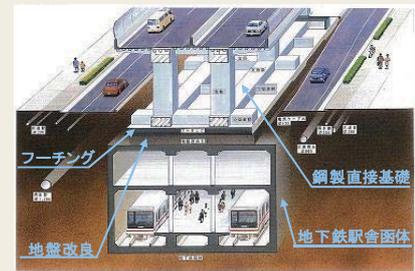
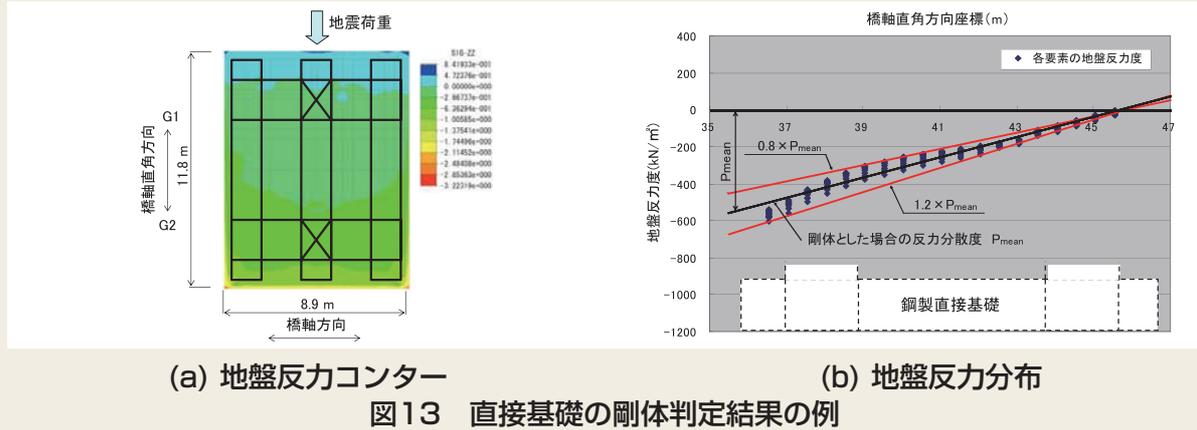


図14 北花田跨道橋の構造概要

あれば剛体と見なせるものとした。

本形式の設計段階における基礎の安定性の照査や部材の設計は、連続フーチング形式と同様、地盤を離散的なばね支点としてモデル化した立体骨組解析により行う。しかし、鋼製基礎部材の剛性の評価に骨組解析を用いると連続フーチングの場合と同様、地盤のモデル化の妥当性に問題が生じる。そのため、設計段階で決定した鋼製基礎部材の剛性に対する評価方法には、図12に示す鋼製基礎部材と3次元性を持つ地盤の影響を適切に考慮できる3次元FEM解析を用いることとした。このFEM解析は、基礎部材の剛性評価だけでなく、設計で用いる立体骨組解析の妥当性の検証も併せて行うことのできる方法である。

結果の一例として、地震荷重が上下部工の橋軸直角方向に作用した場合の地盤反力分布を図13に示す。この結果から、鋼製直接基礎の剛性評価に必要な地盤反力の分散度が確認できる。

このように、単独フーチング形式の基礎部材に対しては、従来基礎と同程度の地盤反力の分散が図れる剛性を必要剛性とし、設計段階で決定した部材の剛性はFEM解析により評価することができる。

5. 実施工への適用とその効果

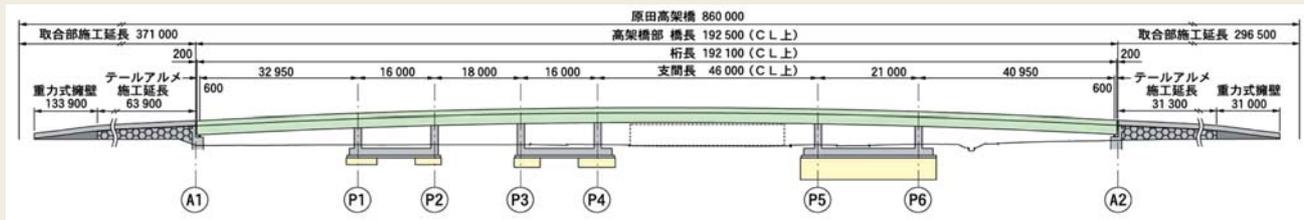
5.1 北花田跨道橋 大阪府堺市に位置する北花田交差点は主要道路が交差し、地下には地下鉄の北花田駅が位置する厳しい現地条件である。この交差点での円滑な交通を実現する目的で1994年に大阪府から発

注された北花田跨道橋は、工事中の現車線数の確保と大幅な工期短縮、さらに地下鉄駅舎への影響を最小にするためUFO工法が採用され、1996年に完成した。

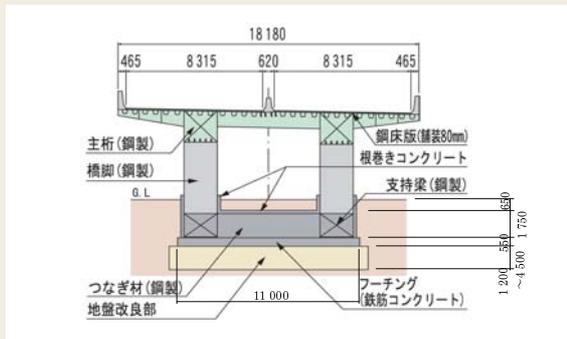
本橋の構造プロポーシオンは図14に示すように15径間連続鋼床版箱桁ラーメン橋である。構造プロポーシオンの計画に際しては、地下鉄駅舎が付加荷重を想定して設計されていなかったことから、橋梁設置による影響を極力与えないよう配慮する必要があった。具体的には、鋼製直接基礎を地中に埋設し、埋め戻し材に軽量のEPSを用いることなどで駅舎に新たな負荷を与えないようにしている。また、基礎地盤の改良を行って上部工反力が地盤にできる限り均等に分散するよう鋼製直接基礎を連続フーチングとして橋脚間隔を決定した。図15には鋼製直接基礎の施工状況を示す。連続フーチングの採用にあたっては、過去に例がない基礎構造であったことから図7に示すように縮尺1/10の模型を用いた載荷実験などにより直接基礎と地下鉄駅



図15 鋼製直接基礎の施工状況



(a) 側面図



(b) 断面図

図16 原田高架橋の構造概要

舎に対する安全性を確認した。

本工法の採用により、現地工期を従来工法（上部工：2径間連続非合成I桁と3径間連続鋼床版箱桁ラーメン橋、下部工：杭基礎として想定）の27ヶ月に対して12ヶ月にすることができ、50%以上の現地工期の短縮を実現した。⁴⁾

5.2 原田高架橋 香川県丸亀市に位置する原田交差点は、交通渋滞の緩和と交通事故防止を目的に国土交通省四国地方整備局により国土交通省で初めてとなる急速施工法を用いた立体交差化が計画された。急速施工法の選定にあたっては、四国地方整備局において基本計画の段階で現地に適用可能な急速施工法12工法が選定され、それらについて工期、工費および施工性などの比較が行われた。その結果、総合的に評価が高く、施工実績のあったUFO工法が採用された。本工事は2003年に発注され、翌年完成した。

本橋の構造プロポーシオンは図16に示すように7径間連続鋼床版箱桁ラーメン橋である。構造プロポーシオンの計画では、地表から3～8mの深さに支持層となる良好な地盤が存在し、地下埋設物も少なかった

ことから、地盤条件の厳しい北花田高架橋よりも橋脚数を著しく減らすことが可能となった。また、現地工期の短縮を目的として地盤改良工を併用することで掘削土量を極力少なくした。この地盤改良体への反力をできるだけ広く分散させるために鋼製直接基礎には連続フーチング形式を採用したが、地盤強度が比較的大きかったことから基礎部材の規模も北花田高架橋より大幅に削減している。図17に基礎と橋脚の施工状況、図18に完成時の写真を示す。

本工法の採用により、現地工期を従来工法（上部工：中空PC床版橋と単純合成I桁橋、下部および基礎工：RC構造として想定）の630日に対して250日とすることができ、60%以上の現地工期短縮を達成した。また、工期短縮に伴い、交通規制期間も40%削減した。⁵⁾

5.3 問屋町跨道橋 2007年に国土交通省関東地方整備局から発注された問屋町交差点立体工事は、栃木県宇都宮市に位置する問屋町交差点の渋滞対策を目的としたものである。本工事は、設計・施工一括発注方式を採用し、高架橋部に加えアプローチ部ならびに交差点下の道路改良等を含めた施工延長1,190mの大規模な工事である。入札の結果では、発注者が設定した現場施工日数を50%以上の短縮が可能で、工費の最も低かった当社JVの提案が採用された。現地工事は、2009年5月に着工し、2010年2月に完成した。

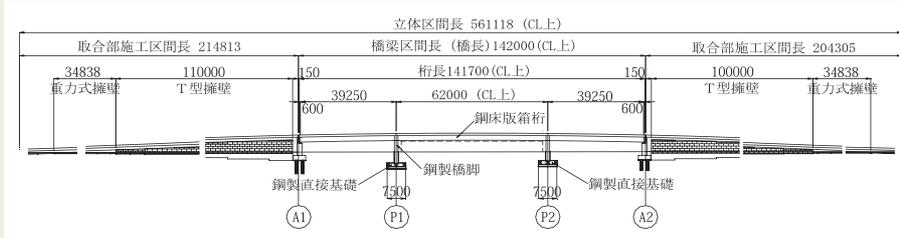
高架橋の構造プロポーシオンは、図19に示すように3径間連続鋼床版箱桁ラーメン橋である。本橋では、工期短縮と工事費のバランスを考慮して橋梁区間と擁壁区間の割合を決定した。また、鋼製直接基礎は、北花田跨道橋に比べて地下埋設物の影響がないことや、原田高架橋よりも支持地盤の強度が高かったことから、連続フーチングではなく単独フーチングを採用した。



図17 基礎と橋脚部材の施工状況



図18 原田高架橋全景



(a) 側面図



(b) 断面鳥瞰図

図19 問屋町跨道橋の構造概要



図20 単独フーチングの施工状況

図20に単独フーチングの施工状況を示す。

このような工夫により、現地工期は発注者の設定した標準工期を所期の目標のとおり50%以上低減した。

6. 結言

交差点の迅速な渋滞解消を目的として開発したUFO工法について、開発の概要と実施工における効果を紹介した。UFO工法は実施工において、それぞれ異なる現場条件にもかかわらず所期の目標どおり現地工期の大幅な短縮を実証した。

本論文の結論をまとめると以下のとおりである。

- 1) UFO工法の鋼製直接基礎は、単独フーチングと橋軸方向に鋼製基礎部材を連続させた連続フーチング形式があり、現地の条件に応じて基礎形式が選定できる。
- 2) 鋼製直接基礎は地盤を離散化したばねモデルとした立体骨組解析を用いて設計する。本手法は、縮尺模型を用いた載荷実験や地盤を3次元要素でモデル化したFEM解析によりその妥当性を検証している。

- 3) 現地条件の異なる3橋の立体交差工事において本工法を適用した結果、従来工法に対して現地工期を50%以上低減し、その有用性を実証することができた。

本報告が渋滞する交差点の立体化事業に対して一助となれば幸いである。

参考文献

- (1) 若林：UFO工法の特徴と課題，建設機械，2003.7，44-48.
- (2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編，2002.3.
- (3) 飯島：フーチングの厚さ，橋梁と基礎，Vol.15，1981.5
- (4) 早川ほか：北花田跨道橋の設計，橋梁と基礎，Vol.31，1997.1.
- (5) 山田ほか：原田高架橋の設計と施工，橋梁と基礎，Vol.39，2005.9

【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 機械・インフラ本部
鉄構ビジネスユニット 鉄構ソリューション室
美島 雄士
Tel : 06-6569-7052 Fax : 06-6569-7033
e-mail : mishima_y@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation
Machinery & Infrastructure Headquarters
Steel Structure Business Unit
Yuji Mishima
Tel : +81-6-6569-7052 Fax : +81-6-6569-7033
e-mail : mishima_y@hitachizosen.co.jp



美島 雄士



若林 保美