

都市内高速道路拡幅改良工事における合成構造フーチングの設計と施工

(株) 大林組 正会員 ○天野 寿宣 正会員 齋藤 隆
 正会員 兼丸 隆裕 正会員 北原陽太郎
 首都高速道路 (株) 正会員 松崎 久倫 正会員 市川 衡

1. はじめに

首都高速中央環状線は、平成 27 年 3 月の品川線の開通により全線の供用が開始され、全体ネットワークが効率良く利用できるようになった一方で、板橋・熊野町ジャンクション間では 5 号池袋線と短い区間で合流・分流するため慢性的な渋滞が発生している。解決策として、上・下層を 1 方向 3 車線から 4 車線に拡幅（片側最大拡幅量 1.7m、延長 520m）する改良工事を平成 25 年度から実施している¹⁾(図-1)。

板橋・熊野町ジャンクション間の構造形式は、既設の SRC 橋脚がラケット型であり、下層を拡幅するためには上層を支える橋脚の側柱を撤去する必要があった。高速道路を供用しながら、かつ、高架下の山手通りの規制を限定的な範囲に留めて施工するため、既設橋脚を仮設バントで仮受けして撤去・新設する一般的な工法を採用せず、新しい構造形式および施工方法を検討することとした。結果として、上部工・橋脚に関しては、既設橋脚の前後に 1 車線分広いラケット型の鋼製橋脚を新設し、供用下にお

いて支承の受替えを行った後、既設橋脚を撤去する「サンドイッチ工法」を採用している(図-2)。この工法では既設橋脚の前後に 2 本の橋脚を新設するため、既設フーチングを拡幅することとして、橋脚基部を低土被り内で定着する「合成構造フーチング」という新しい基礎形式を考案した。

合成構造フーチングは、平面的な広がりをもつ「鋼製格子部材」という鋼製橋脚の基部部材をフーチングの土被り範囲内に設置して、浮上り防止の拘



図-1 事業概要

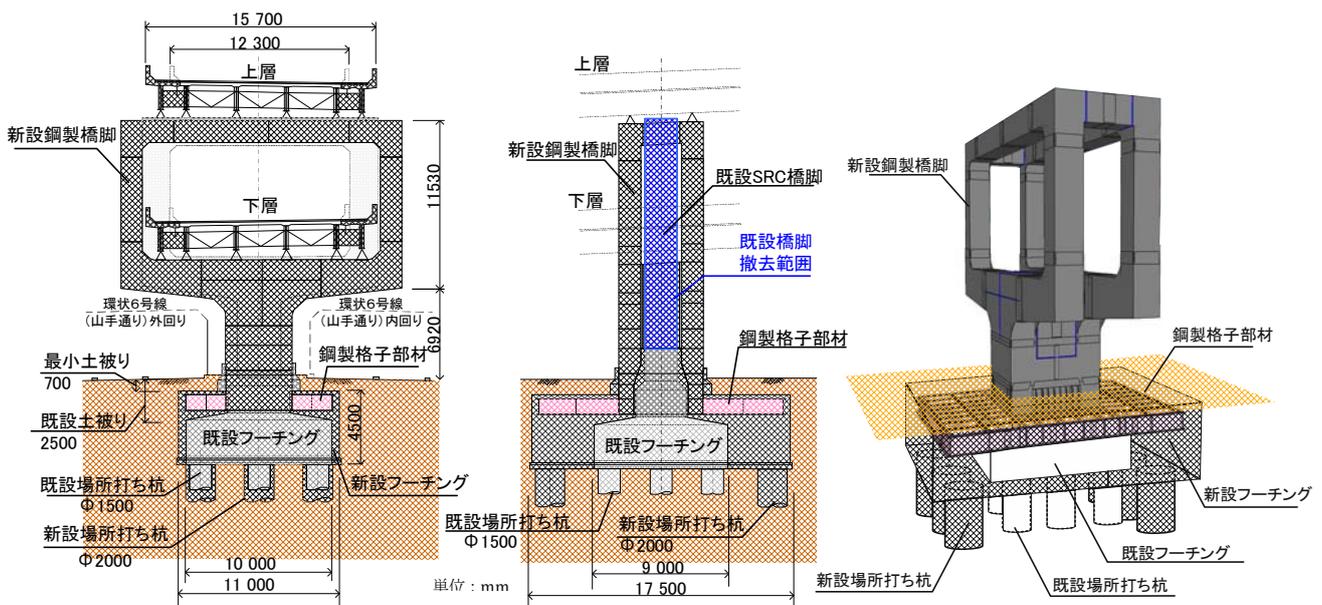


図-2 サンドイッチ工法と合成構造フーチング

キーワード 合成構造, 鋼製格子部材, 格子梁解析, 非線形 FEM 解析, 载荷実験

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟 株式会社大林組 TEL03-5769-1306

束鉄筋や RC フーチングとしての鉄筋を組み立ててからコンクリートを打設し、既設フーチングや増し杭と一体化する手法である(図-2)。鋼製格子部材は、拡幅により増加する上部工死荷重をフーチングに伝える伝達部材の役割を担うだけでなく、フーチング全体が合成構造として挙動するための構造部材の機能も期待されている。本稿は、この合成構造フーチングに関する概要や性能確認試験の結果、さらに設計・施工方法について紹介するものである。

2. 合成構造フーチングの構造概要

本工事では、現場の制約条件、具体的には既設フーチングの土被りが約 2.5m と少ないことから、新設鋼製橋脚とフーチングの定着方式に従来のアンカーフレーム方式を採用できず、新たに開発された合成構造フーチングを採用している。

合成構造フーチングは図-3 に示すとおり、新設鋼製橋脚基部と剛結した鋼製格子部材を新設フーチングに埋設し、一体化させた構造である。橋脚からの荷重を均等に、鋼製格子部材を介してフーチングおよび杭へ伝達させるものである。合成構造フーチングの各構成要素の特徴を示す。

(1) 鋼製格子部材

鋼製格子部材は、スタッドや孔あき鋼板ジベル(PBL)等、一般的なずれ止め構造を用いることなく橋脚からの荷重に抵抗させるため、極力支圧面積を大きく確保できる I 型断面の鋼製部材を格子状に組んだものである。新設フーチング内部に埋設することで、鋼製格子部材と新設フーチングの一体化を図っている。橋脚からの曲げモーメントおよび軸力

は、鋼製橋脚基部と剛結した鋼製格子部材のウェブ・上下フランジを取り囲むコンクリートの支圧により、フーチングへ伝達される。

(2) 拘束鉄筋

図-4 に示す 3 次元弾性 FEM 解析の結果から、橋脚基部に発生する曲げモーメントにより、引張側の鋼製格子部材の浮き上がりが確認されたため、それを抑制する目的で、鋼製格子部材とフーチング上側鉄筋を取り囲む形で、拘束鉄筋を配置した。なお、拘束鉄筋はあと施工アンカーとして必要な定着長を確保して既設フーチングに定着させることとし、新設フーチング部の拘束鉄筋はフーチング下側鉄筋まで埋込むこととした。

3. 合成構造フーチングの設計

(1) 合成構造フーチングの設計概要

図-5 に合成構造フーチングの設計フローを示す。新設フーチングの上下主筋、せん断補強筋は道路橋示方書IV編に準拠した方法により、諸元を決定した。また、本構造特有の鋼製格子部材および拘束鉄筋は、骨組み要素を格子状に配置した格子梁解析により決定した。これら個々の手法により決定した各部材をモデル化し、3次元 FEM 解析を実施することで、全

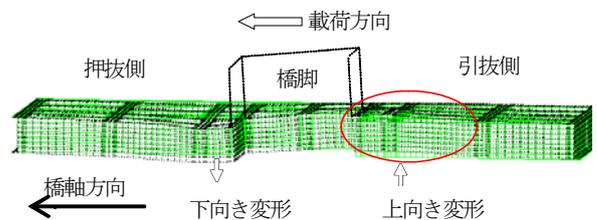


図-4 鋼製格子部材の浮き上がり

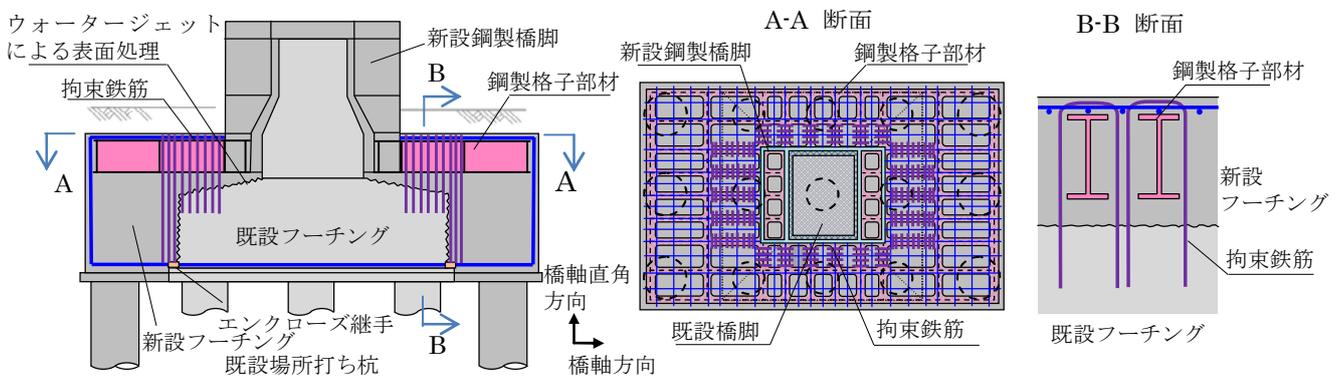


図-3 合成構造フーチング概要図

図-3 合成構造フーチングの構成部材

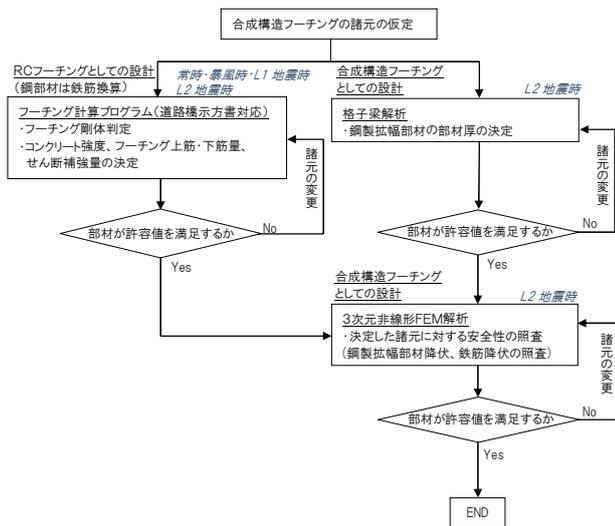


図-5 合成構造フーチングの設計フロー

体挙動の把握およびレベル 2 地震時の安全性を照査した。なお、合成構造フーチングの耐震性能としては、「レベル2地震時においても各部材は降伏しないこと」としている。本稿では代表的な合成構造フーチングの設計結果を示す。

(2) 鋼製格子部材諸元の決定方法

1) 解析モデルの概要

鋼製格子部材の設計に用いた解析モデルの概要を図-6 に示す。フーチングが上下2つの部位により構成されるものと考え、鋼製格子部材の下フランジより上側のSRC断面とそれより下側のコンクリート部より構成されると仮定した。上側のSRC部材のモデル化は図-7 に示すように鋼製部材のウェブ位置に骨組み要素を格子状に配置し、下側のコンクリート部をバネ支点としてモデル化して格子梁の支持条件として考慮した。荷重は、レベル 2 地震時に橋脚基部に作用する曲げモーメントを鉛直方向の偶力（引張力と圧縮力）に換算し、作用させた。引抜側のコンクリートバネは引張強度以上抵抗しない条件とし、引張抵抗力の不足分を補うように拘束鉄筋の諸元を決定した。

2) 鋼製格子部材の諸元

格子梁解析により各骨組み要素の応答値（曲げモーメントおよびせん断力）を算定し、鋼製格子部材の諸元を決定した。せん断力に対しては、安全側の配慮より、鋼製格子部材のウェブのみを抵抗断面とした。曲げモーメントに対しては、SRC断面で抵抗するものとして、図-8 を参考に鋼製格子部材を鉄筋換

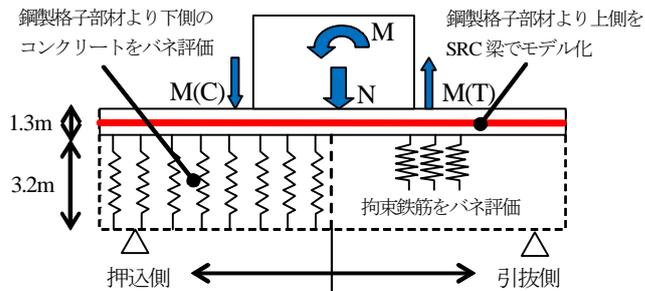


図-6 解析モデルの概要

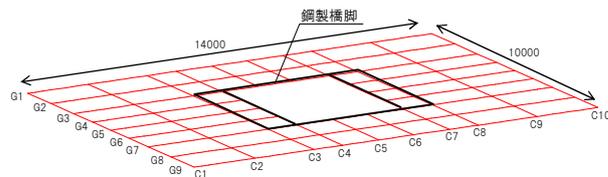


図-7 格子梁解析モデル

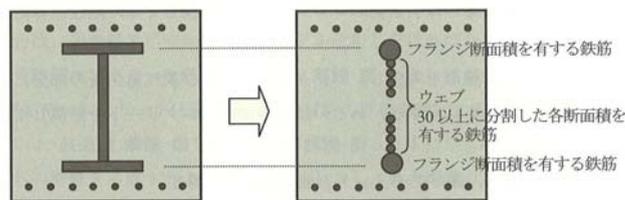


図-8 SRC断面における鋼製部材の鉄筋換算法

表-1 鋼製格子部材の諸元

格子桁	桁高 (mm)	フランジ幅 (mm)	フランジ厚 (mm)	ウェブ厚 (mm)
G1,G2,G8,G9	1050	350	10	9
G3~G7	1050	350	25	33
C1,C2,C9,C10	1050	350	10	9
C3~C8	1050	350	25	33

算した。応答値の判定には以下の照査を行い、鋼製格子部材の諸元を決定した（表-1）。

- 作用せん断力 $S <$ ウェブのせん断降伏強度 S_y (1)
- 作用曲げモーメント M
- $<$ SRC断面の降伏曲げモーメント M_y (2)

(3) 3次元非線形 FEM 解析による照査

1) モデルの概要

FEM 解析（解析コード：FINAL）モデル（橋軸方向荷重）を図-9 に示す。解析はレベル 2 地震時の安全性確認を目的とした静的非線形解析とし、作用力は橋脚天端に水平力を徐々に増加させながら与えて、上部工設計時の動的解析における橋脚基部のレベル

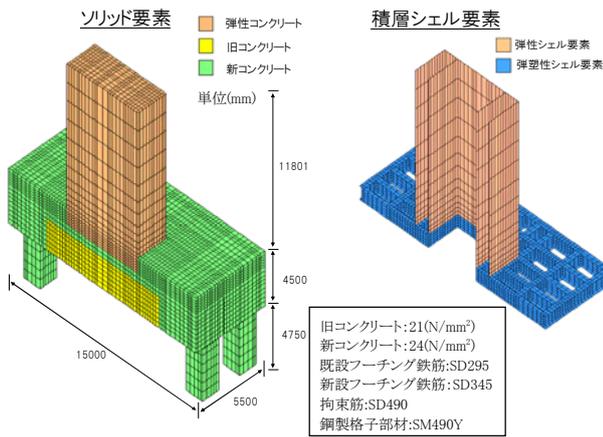


図-9 3次元非線形 FEM 解析モデル（橋軸方向載荷）

2 地震時反力（曲げモーメントとせん断力）を再現した。また杭基礎は実際の円形断面と等価な断面積を有する矩形断面を $1/\beta$ (β : 杭の特性値) の長さまでモデル化した。鋼製格子部材および鋼製橋脚はシェル要素，コンクリート部はソリッド要素とし，鉄筋は埋込み鉄筋要素を適用している。なお，本解析は後述する 1/5 スケールの耐荷力実験結果を検証した上で，採用している。

2) 解析結果

図-10 および表-2 に非線形 FEM 解析における各部材降伏時の荷重（橋軸方向載荷）を示す。各部材はレベル 2 地震時相当荷重以降に降伏していることから，要求性能を満足していることを確認した。なお，橋軸直角方向載荷についても同様の結果であった。

4. 合成構造フーチングの載荷実験

合成構造フーチングは，これまでに実例のない新しい構造であり，構造成立性や設計方法の妥当性について十分な検証を行う必要がある。そこで，縮小試験体を用いた正負交番載荷による静的載荷実験に加え，破壊に至るまで片側単調載荷を実施し，合成構造フーチングの耐荷性能および破壊過程について確認することとした。また，試験体をモデル化した 3次元非線形 FEM 解析を併せて実施し，設計手法の妥当性を検証することとした。

(1) 実験概要

載荷実験および 3次元非線形 FEM 解析は，橋軸方向載荷試験体，橋軸直角方向載荷試験体の 2 ケースについて行った。これは，街路への影響を最小限とするため，合成構造フーチングの形状が橋軸方向に長くなっており，橋軸方向と橋軸直角方向とでは耐

荷機構が異なると考えたためである。

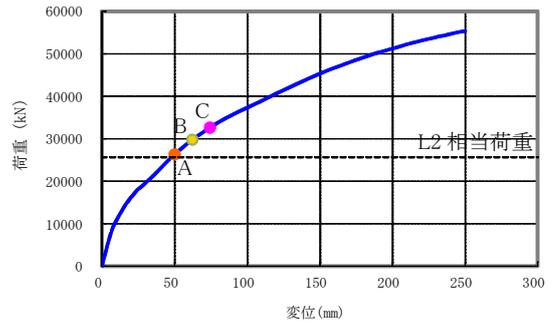


図-10 荷重－変位関係（橋軸方向載荷）

表-2 各部材の降伏荷重（橋軸方向載荷）

	降伏発生時の 水平荷重(kN)	L2荷重との比率	図-10 対応記号	
(L2地震時相当荷重)	25,660	1.00	-	
鋼製格子部材	32,590	1.27	C	
フーチング 上側鉄筋	橋軸方向	26,300	1.02	A
	橋軸直角方向	37,380	1.46	
フーチング 下側鉄筋	橋軸方向	29,750	1.16	-
	橋軸直角方向	38,360	1.49	
拘束鉄筋	G3桁	33,050	1.29	B
	G4桁	33,890	1.32	
	G5桁	34,690	1.35	
	C3桁	33,890	1.32	
	C4桁	29,750	1.16	
	C5桁	30,230	1.18	
	C6桁	44,260	1.72	
	C7桁	43,940	1.71	
C8桁	降伏なし	-	-	

※括弧内は図-10に対応

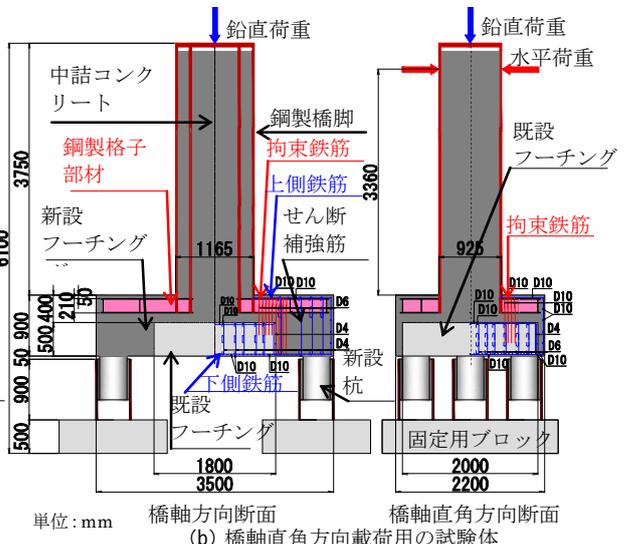
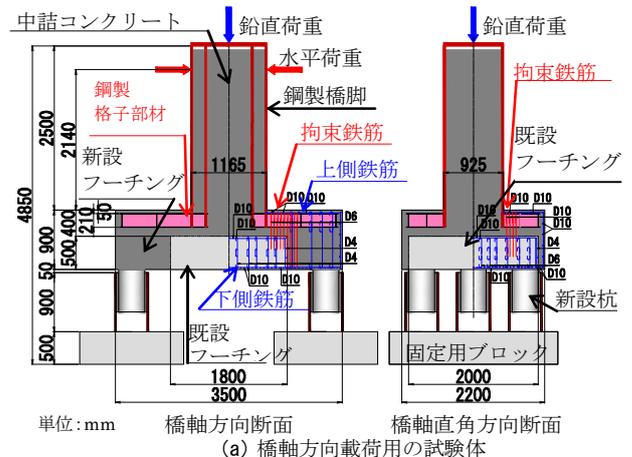


図-11 試験体構造図および配筋図

試験体は荷重装置の能力に合わせて実構造物の1/5モデルとした。図-11に試験体の構造図および配筋図を示す。なお、実構造物では既設杭がレベル2地震時にせん断破壊するため、既設杭のモデル化は行っていない。

鉛直荷重は実橋脚基部におけるレベル2地震時の鉛直荷重の設計値をもとに700kNとし、球座を介して荷重することで曲げモーメントが作用しないよう配慮した。

水平荷重は、実構造物の動的解析によるレベル2地震時の橋脚基部応答値に基づいて設定した（橋軸方向荷重試験体 $P_{L2}=850\text{kN}$ ，橋軸直角方向荷重試験体 $P_{L2}=810\text{kN}$ ）。 P_{L2} の0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0倍を正負交番で3回ずつ荷重した後、片側への単調荷重を行い、最終破壊形態を確認した。

(2) 3次元非線形FEM解析

合成構造フーチングの各部材の降伏順序および耐荷機構の究明を目的として、3次元FEM解析（解析コード：FINAL）を実施した。解析モデルの寸法および荷重位置は実験の試験体と同様とし、対称性を考慮して1/2モデルとした。荷重方法は片側単調荷重とし、境界条件は杭下端を完全固定とした。

(3) 橋軸方向荷重実験および解析結果

図-12に正負交番荷重時における荷重-変位関係を示す。正負交番荷重終了時における残留変位は0.11mmと小さく弾性挙動を示していることを確認した。

図-13に実験と解析における片側単調荷重時の荷重-変位関係を示す。表-3に各部材の初降伏荷重を示す。各部材の初降伏は、引抜側の既設部拘束鉄筋、上側鉄筋、上フランジ、新設部拘束鉄筋、下フランジの順に発生し、その後、押込側の下フランジが初降伏に達していることから、抵抗部材が引抜側から押込側へ徐々に移行していることがわかる。引抜側下フランジの初降伏以降、全体剛性は低下し、荷重増加がほとんどみられないことから、引抜側下フランジの初降伏が最大耐力に及ぼす影響は大きいと考えられる。なお、最大荷重はレベル2地震時相当荷重の約3.5倍である2,967kNであった。

実験と解析で初降伏の発生順序を比較すると、押込側下フランジ（図中F点）までの挙動は、荷重値は異なるものの、ほぼ一致しており、概ね実験結果

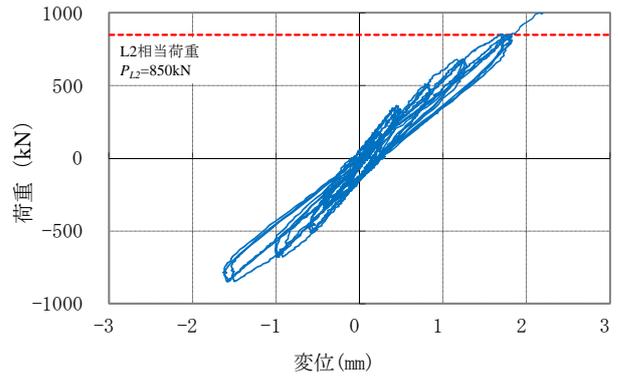


図-12 荷重-変位関係（正負交番荷重時）

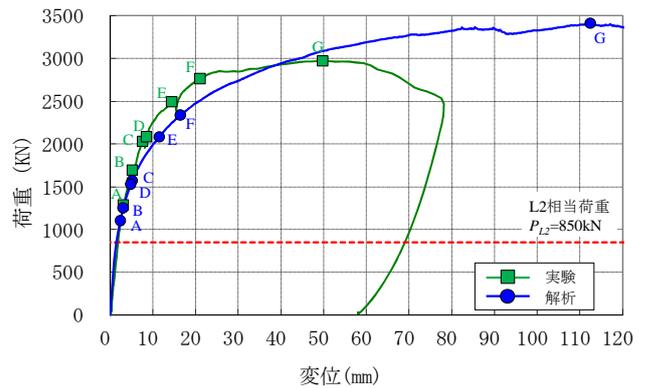


図-13 荷重-変位関係（片側単調荷重時）

表-3 各部材の初降伏荷重（図-13のA~G点に対応）

	イベント	荷重(kN)	
		実験	解析
A	既設部拘束鉄筋初降伏	1286	1102
B	上側鉄筋初降伏	1692	1251
C	(引抜側)上フランジ初降伏	2028	1569
D	新設部拘束鉄筋初降伏	2083	1526
E	(引抜側)下フランジ初降伏	2491	2081
F	(押込側)下フランジ初降伏	2762	2335
G	最大荷重	2967	3408

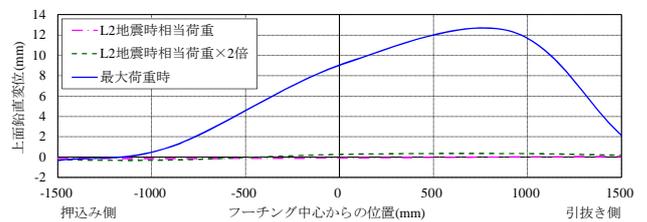


図-14 フーチング上面の鉛直変位（実験）

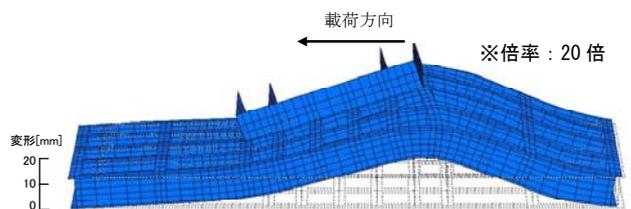


図-15 鋼製格子部材の変形図（解析：最大荷重時）

を表現できている。図-14, 15 に実験におけるフーチング上面の鉛直変位と、解析における鋼製格子部材の変形図を示す。この結果から、フーチング上面の変形は、鋼製格子部材の浮き上がりに起因するものと考えられる。

(4) 橋軸直角方向荷重実験および解析結果

図-16 に正負交番荷重時における荷重－変位関係を示す。正負交番荷重時における残留変位は 1.02mm とわずかであり、弾性挙動を示していたことを確認した。

図-17 に実験と解析における片側単調荷重時の荷重変位関係を示す。表-4 に各部材の初降伏荷重を示す。各部材の初降伏は、橋軸方向荷重試験体同様、引抜側の既設部拘束鉄筋、上側鉄筋、上フランジの順に発生し、押込側下フランジへと遷移した。その後、引抜側の新設部拘束鉄筋、下フランジが初降伏に達した。橋軸方向荷重試験体とは異なり、押込側下フランジ初降伏後も剛性は大きく低下せず、引抜側で抵抗部材が機能していたことがわかった。なお、荷重はレベル 2 相当荷重の約 2 倍である 1,557kN で最大となった。

実験と解析で初降伏の発生順序を比較すると、初降伏順序は押込側下フランジ (D 点) と引抜側新設部拘束鉄筋 (E 点) 以外において実験と同じであった。図-18 に解析における最大荷重時の鋼製格子部材の応力および変形図を示す。この結果から、解析においても、鋼製格子部材にはねじれ現象が発生し、部材の降伏範囲も全体的に広がっていることがわかった。

5. 合成構造フーチングの施工

本工事の施工箇所である山手通りは、昭和 20 年代に盛土化され、昭和 40 年代の首都高速 5 号線新設に合わせて 40m 幅員に拡幅された箇所であり、当時の擁壁や山留め壁、旧街路の埋設物等、多数の障害物出現が予測された。また、直上に首都高速高架橋、両側を山手通り内外回りに挟まれた幅約 16m、空頭 6～9m の非常に制限された施工空間であること、周辺は住宅地が密集していることから工事着手時より騒音・振動に対する高い配慮が求められたことが立地に関する特色である。また、本工事で採用されている合成構造フーチングは、鋼製格子部材のウェブや

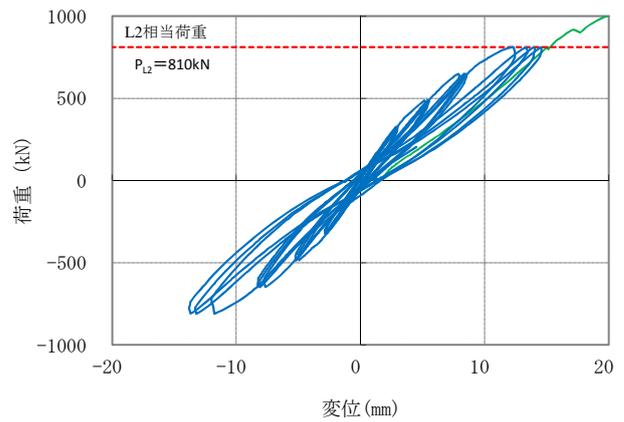


図-16 荷重－変位関係（正負交番荷重時）

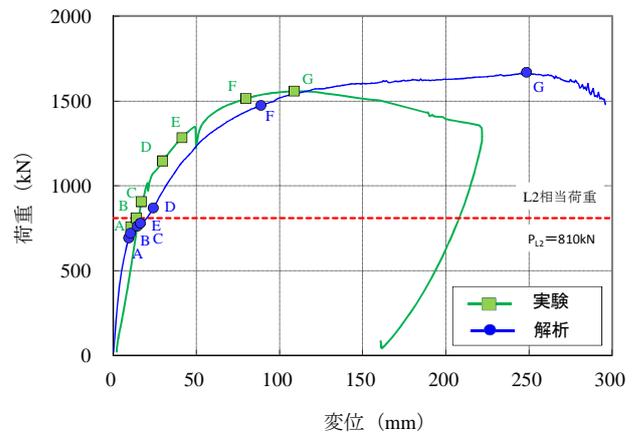


図-17 荷重－変位関係（片側単調荷重時）

表-4 各部材の初降伏荷重 (図-17 の A～G 点に対応)

	イベント	荷重 (kN)	
		実験	解析
A	(引抜側) 既設部拘束鉄筋初降伏	757	692
B	(引抜側) 上側鉄筋初降伏	811	720
C	(引抜側) 上フランジ初降伏	906	761
D	(押込側) 下フランジ初降伏	1146	869
E	(引抜側) 新設部拘束鉄筋初降伏	1283	779
F	(引抜側) 下フランジ初降伏	1514	1473
G	最大荷重	1557	1668

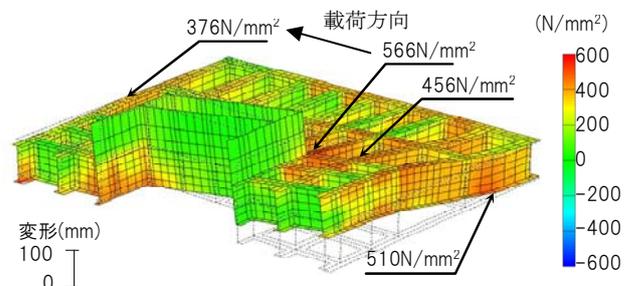


図-18 鋼製格子部材の応力および変形図

フランジに作用する支圧力によって橋脚からの力をフーチング、杭に伝達するものである。このため、鋼製格子部材を拘束するコンクリートの品質や充填性が極めて重要となる。

以上の特徴をふまえ、本工事における (1) 各種障害物対策、(2) 低空頭条件下での場所打ち杭の施工、(3) 合成構造フーチングへの中流動コンクリートの適用、について紹介する。

(1) 各種障害物対策

前述の通り、工事着手後の試掘や文献調査等により基礎工施工箇所における多数の障害物出現が予測された。これらの予期せぬ障害物の出現は大幅な工程遅延の原因となる可能性が高く、本工事における大きなリスクであった。そこで、試掘調査から障害物撤去に関する詳細な施工フローを立案し、迅速な意思決定のもと工事を進める方針とした。なお、工法の選定にあたっては、狭隘な施工空間で可能なこと、低騒音・低振動工法であること、を採用の基本方針とした。結果、予想通り多数の障害物が出現したが、大きな工程遅延を伴うことなく完了することが出来た。一例として鋼矢板打設箇所における障害物対策の施工フローを図-19 に示す。

(2) 低空頭での場所打ち杭の施工

本工事では上部工拡幅による荷重増加に対し、既設のフーチングをかわした位置に新設杭を増設し、フーチング拡幅を実施する。フーチング拡幅は、街路（山手通り）への影響を最小限にするため橋軸方向としている。新設する場所打ち杭の施工は、上空に供用中の首都高速があるため、空頭制限を受ける中で施工しなければならない。そのため、杭の工法は低空頭条件下で施工可能な TBH 工法とし、鉄筋かご長は標準3.5mとして低空頭仕様の鉄筋建込み機にて建込むことで、低空頭条件下での課題をクリアした。通常、杭主筋の継手は重ね継手を採用することが一般的であるが、鉄筋かご長を 3.5m とした場合、鉄筋径によっては重ね継手同士が重なりあってしまうため、機械式継手を採用した。写真-1 に鉄筋かごの建込み状況を示す。

(3) 合成構造フーチングへの中流動コンクリートの適用

合成構造フーチングはマスコンクリートであるとともに、1 リフト目は既設フーチングの拘束を受ける

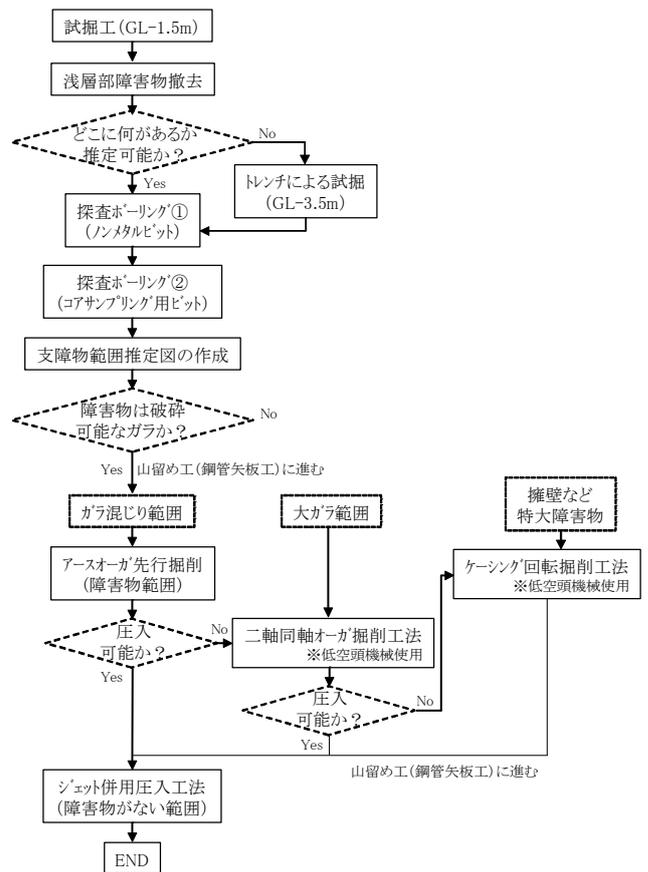


図-19 障害物対策の施工フロー（鋼矢板打設箇所）



写真-1 場所打ち杭鉄筋かご建込み状況

ため、温度ひび割れの発生が予想された。また、鋼製格子部材を据え付けた 2 リフト目は鋼製格子部材の交差部に空気溜まりが発生しやすく、既設橋脚の周囲では狭隘な箇所にコンクリートを打設する。さらにブリーディングの発生により、鋼製格子部材のフランジ下面やウェブ表面において、コンクリートとの付着力の低下が考えられた。

そこで、1 リフト目にはセメントに低発熱・収縮抑制型高炉セメント（MKC TYPEⅢ）を使用し、低添加型の石灰系膨張材を併せて使用した。2 リフト目は、

マスコンクリートであることを考慮し、単位粉体量の少ない中流動コンクリートを採用した。

中流動コンクリートの適用にあたり、鋼製格子部材の寸法と同じ実物大規模の模型を用いて充填実験を実施し、鋼製格子部材の交差部や既設橋脚周りの狭隘部に確実に充填できることを検証した²⁾。実物大充填実験の状況を写真-2に示す。



写真-2 実物大充填実験実施状況

6. まとめ

合成構造フーチングはこれまでに事例のない新しい構造のため、設計手法の確立やその妥当性を確認するための載荷実験を実施し、構造の安全性を検証した。また、施工においては、既設高架橋直下での施工や合成構造フーチングに適した中流動コンクリートの採用等、設計だけでなく施工についても多くの課題を抱え、各対策を講じた。まとめとして以下に本工事で得られた知見を示す。

1) 合成構造フーチングの設計では、特徴的な構造を有しているため、格子梁解析と FEM 解析を組み合わせた手法としている。今後はより簡潔な設計手法を確立することが課題となる。

- 2) レベル 2 地震時相当荷重までの正負交番載荷実験では、橋軸方向・橋軸直角方向ともに残留変位が小さく弾性挙動を示していたことから、合成構造フーチングは目標とした要求性能を満足する構造であることを確認した。
- 3) 実験においては、橋軸方向載荷ではレベル 2 地震時相当荷重の約 3.5 倍、橋軸直角方向載荷では約 2.0 倍の耐荷重を記録した。
- 4) 3 次元非線形 FEM 解析により、合成構造フーチング各部材の挙動を定性的に把握することができた。
- 5) 都市内高速直下で基礎工の改築工事を実施する場合、事前の調査により埋設物の現状を把握し、騒音・振動等、近隣環境へ配慮した対策を講じることで工程遅延リスクを排除した。
- 6) 本工事のように空頭制限のある場所打ち杭の施工では、設計の段階で現地状況に応じて鉄筋かご長を設定し、機械式継手を使用することで、低空頭下でも安全に施工することができた。
- 7) 合成構造フーチングに低発熱・収縮型高炉セメント、中流動コンクリートを使用することで、鋼製格子部材に確実にコンクリートを充填でき、温度ひび割れの発生を防止することができる。

参考文献

- 1) 村上裕真, 中野博文, 伊原茂, 仲田宇史: 板橋・熊野町ジャンクション間改良工事における合成構造フーチングの構造概要, 第 68 回土木学会年次学術講演会, 平成 25 年 9 月
- 2) 谷田部勝博, 森正浩, 兼丸隆裕, 伊原茂, 中野博文, 徳見敏夫: 合成構造フーチングへの中流動コンクリートの適用検証, 土木建設技術発表会 2014, 平成 26 年 11 月