論文　３次元照査ツールを活用した地下駅舎のフラットスラブ設計

伊東　希典[1]・大野　広志[2]・小谷　真史[3]・田中　直樹[4]

[1]正会員　日本工営株式会社 鉄道事業部 鉄道設計室（〒102-8539 東京都千代田区麹町 5-4）
E-mail: ito-mr@n-koei.jp(Corresponding Author)

[2]正会員　清水建設株式会社 土木国際支店 土木技術部（〒104-8370 東京都中央区京橋 2-16-1）
E-mail: h-ohno@shimz.co.jp

[3]正会員　日本工営株式会社 鉄道事業部 鉄道設計室（〒102-8539 東京都千代田区麹町 5-4）
E-mail: kotani-sh@n-koei.jp

[4]正会員　八千代エンジニヤリング株式会社 都市・地下空間部（〒111-8648 東京都台東区浅草橋 5-20-8）
E-mail: no-tanaka@yachiyo-eng.co.jp

清水建設（株）を代表とする共同企業体(SFTE-JV)は，フィリピン共和国で初の地下鉄工事「マニラ首都圏地下鉄事業 CP101 工区」において，地下駅ボックスカルバートの詳細設計を実施中である．一般的に地震が多い日本では地下駅も梁を設けて耐震性に配慮したラーメン構造を用いるが，当該地域は地盤が良く，地下駅が固い軟岩層に全て収まるため地震の影響は少ない．そのため，構造がよりシンプルなフラットスラブ構造を採用し，施工性を高めて品質を確保すると同時に内部空間の有効活用を図った．従来の 2 次元フレーム解析を前提とした設計手法は，得られた断面力を一定割合で再配分して照査する簡略的な方法をとっている．本設計では，3 次元 FEM 解析により駅舎の細部にわたり応力発生状況を明らかにし，必要な範囲に必要な量の補強鉄筋を配置する合理的な設計を目指している．

Key Words: *railway structures, underground stations, flat slab structures, 3DFEM*

1.　はじめに

現在建設中のマニラ首都圏地下鉄（Metro Manila Subway）は，首都中心部における深刻な交通渋滞の緩和を目的として，北部ケソン市のミンダナオ通りと南部パサイ市のニノイアキノ国際空港第 3 ターミナルおよびパラニャーケ市ビクタンを結ぶフィリピン国で初となる地下鉄路線である．総延長は約 33km，17 の地下駅と 1 つの地上基地が計画されている．マニラ首都圏地下鉄の路線図を**図-1** に示す．

計画路線の北部に位置する先行整備工区において，Quirino Highway Station ; キリノ・ハイウエー（以下，QHS と称す）を含む 3 つの地下駅の詳細設計をデザインビルド方式にて実施した．同国には地下鉄道に関する技術基準が整備されていないため，日本で多くの実績を有する鉄道構造物等設計標準・同解説（以下，鉄道標準と称す）[注 1)～注 4)]に準拠するものとし，現地で調達するコンクリートや鉄筋等の材料に関する強度特性や加工方法については AASHTO（American Association of State Highway and Transportation Officials）[注 5)]や DPWH（Department of Public Works and Highways）[注 6)]等の基準と照らし合わせることで現地仕様に適合させた．

図-1　マニラ首都圏地下鉄の鉄道路線図

「白地図データ」（国土地理院）（https://maps.gsi.go.jp/）をもとに著者ら作成

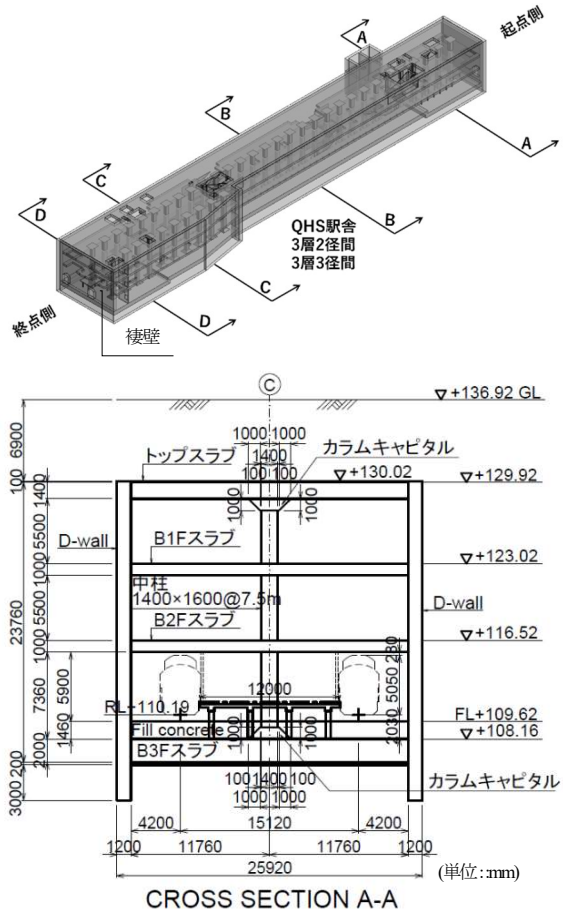


図-2　Quirino Highway Station

また，日本の地下駅は梁を設けて耐震性に配慮したラーメン構造を用いることが一般的であるが，当該地域は地盤が良く，地下駅が固い軟岩層に全て収まるため地震の影響は少ない．そのため，構造がよりシンプルなフラットスラブ構造を採用し，施工性を高めて品質を確保すると同時に内部空間の有効活用を図った．

QHS の構造は図-2 に示す通り，A・B 断面の 3 層 2 径間から C・D 断面の 3 層 3 径間へ変化する地中連続壁一体型 RC ボックスカルバート構造である．

本稿では，この複雑な形状を有する QHS を対象にフラットスラブを用いた地下駅の合理的な設計手法について報告する。

2.　フラットスラブ適用上の設計課題

フラットスラブ構造は，スラブを柱で直接支持する構造であり，梁等の突起物が少なく，駅構内の空間を広く確保できるため，建築仕上げや換気設備類の配置が容易となるほか，将来のニーズに合わせて駅構内のレイアウト変更にも柔軟に対応できるメリットがある．従来のラーメン構造とフラットスラブ構造の比較を図-3 に示す．

また，過密配筋になりがちな梁を不要とすることで，

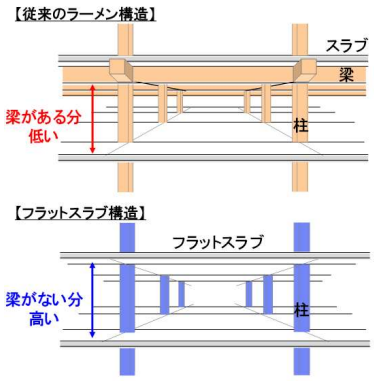


図-3　従来のラーメン構造とフラットスラブ構造

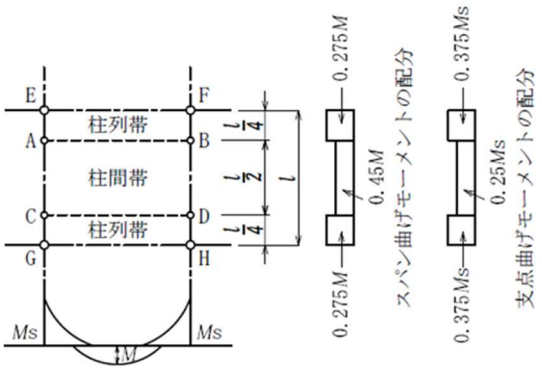


図-4　フラットスラブにおける曲げモーメントの配分[注1)]

スラブや柱の鉄筋との干渉も減り，熟練工が確保しにくい現場でも施工性が良く品質の向上が期待できる．

一方，フラットスラブの柱接合部には応力が集中するため，柱周りの局部的なモーメント増加や押し抜きせん断破壊（以下，パンチング破壊と称す）による脆性的な損傷が懸念される．

これらの懸念に対して従来型の 2 次元フレーム解析を前提としたフラットスラブ設計手法では，柱中心を結ぶ線を基準としてスラブを柱列帯と柱間帯に区分し，従来型の 2 次元フレーム解析から得られた断面力を一定割合で再配分して照査する簡略的な方法をとっている．フラットスラブにおける曲げモーメントの配分を図-4 に示す．

しかし，地中連続壁と柱を支持する下床版では沈下量が異なり，径間長も場所によって変化する場合は，断面力の再配分割合も変わるものと想定される．

これらの問題点を解消するため，本設計では，3 次元 FEM 解析（以下，3D 解析と称す）により駅舎の細部にわたり応力発生状況を明らかにし，必要な範囲に必要な量の補強鉄筋を配置する合理的な設計を目指している．

3.　3D 解析による断面力の算出

(1)　3D 解析モデルの概要

3D 解析にあたっては，柱の支承板にあたるカラムキ

ャピタル等の多面体構造も忠実に再現することができるソリッド要素でモデルを作成した．1 メッシュの長さは 200mm 以下として高い精度を確保するが，解析機器の性能と処理時間に制約があることから，地下駅を部分的に 3 スパン（約 25m）程度切り出して評価することとした．図-5 に 3D 解析モデルを示す．

解析ソフトは様々な分野にて実績のある ABAQUS [注7] を採用し，図-6 に示す地盤ばねの条件や各荷重の組合せ，荷重係数等は 3 次元解析と比較する 2 次元フレーム解析（以下，2D 解析と称す）と同じ条件を入力する．

鉄道標準に沿った安全性や耐久性に関する検討は，ABAQUS の応答値から各制限値指標に対する安全率をコンター図として視覚的に確認できるように開発された 3D 解析照査プログラム[注8]を用いることで，見落としを防ぎつつ設計作業の効率化を図ることが可能となった．

a) ソフトウェア：Abaqus /CAE 20207)[注7]

b) 3D 解析モデル：ソリッドモデル

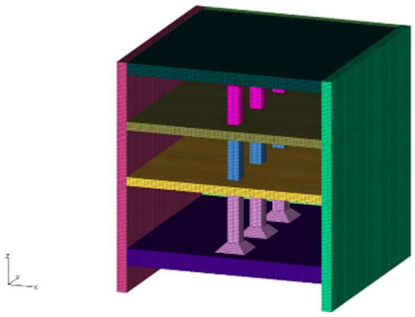


図-5 モデル図

c) 地盤ばね

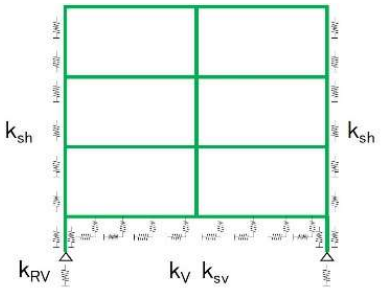


図-6 地盤ばね

d) 荷重条件

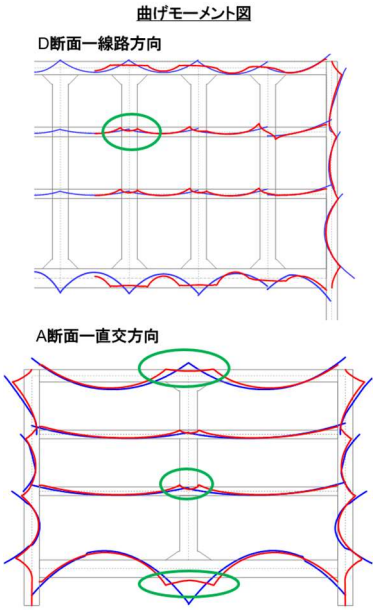
死荷重+土圧+水圧+周辺建物荷重+路面活荷重等

e) 断面力抽出

弾性モデルによる 3DFEM 解析の断面力を抽出

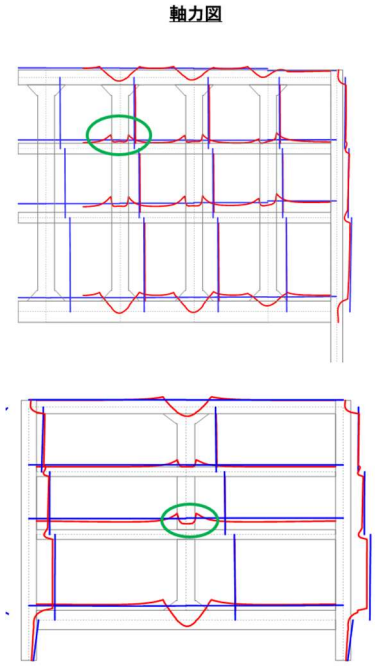
(2) 3D 解析結果の妥当性評価

3D 解析は一般的に入出力のデータ量が多く，解析結果の妥当性を正確に評価する手間が大きい．そのため，入出力データの基本的なチェックを実施した上で，別に実施した 2D 解析の結果と照合することでモデルの妥当性を確認した．



赤線：3D 解析　青線：2D 解析

図-7 2D･3D 解析曲げモーメント比較



赤線：3D 解析　青線：2D 解析

図-8 2D･3D 解析軸力比較

a) 曲げモーメントの比較

図-7 に示すように 2D 解析と 3D 解析の曲げモーメントを重ねると，相違がみられるのはフラットスラブと柱の接合部周辺のみであり，側壁や柱から離れた範囲のスラブ等，連続性がある部材については，ほぼ一致している．

これは，フラットスラブと柱の接合部における応力集中状況を適切に再現できていることを示すと同時に，連続性のある部材の設計は 2D 解析で十分な精度が得られていることを示している．

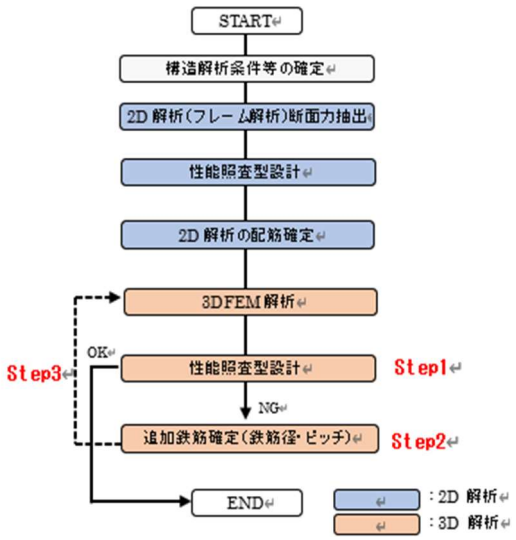


図-9　照査フロー

b)　軸力の比較

図-8 に示すように軸力についても重ね合わせを行ったところ，カラムキャピタルによって断面が大きくなる柱接合部付近を除き，ほぼ一致する結果となった．

フラットスラブの設計において柱の軸力はスラブの押し抜きせん断破壊の照査を行うために重要な要素となる．押し抜きせん断破壊を防ぐためには，鉄筋補強よりスラブ厚を増やすことが有効である．そのため，2D 解析で押し抜きせん断照査のみを先行して行い，決定したスラブ厚で 3D 解析モデルを作成すると手戻りを大幅に削減することができる．

4.　3D 解析による照査方法

フラットスラブを有する地下駅の合理的な設計手法の照査フローを整理すると図-9 のようになる．

照査フローの 2D 解析部分はフラットスラブを考慮しない一般的なフレーム解析であるため，ここでは 3D 解析部分について具体的な照査手順を示す．

(1)　Step-1 の照査

Step-1 では，2D 解析で決定した基本配筋（原則 1 段目に配置）に対し，3D 解析による性能照査を実施する．

図-10 は，B1F スラブの耐久性ひび割れ照査のコンター図である．

柱周りのフラットスラブは制限値を超過していることを示す赤色にマークされており，2D 解析で決定した基本配筋では要求性能を満足できていないことが分かる．これは，モーメントの重ね合わせ図によって確認した内容と一致しており，補強鉄筋が必要な範囲と必要な量を特定することができる．

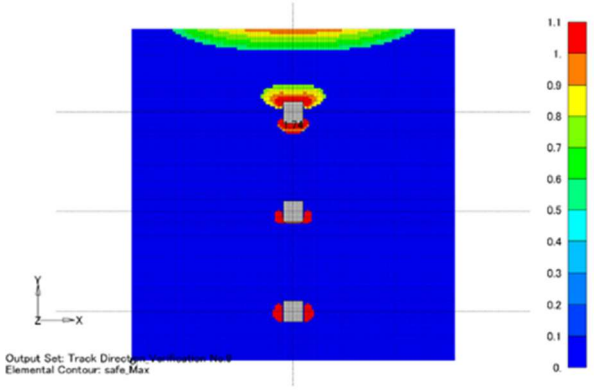


図-10　B1F スラブ耐久性ひび割れコンター図

Step-1

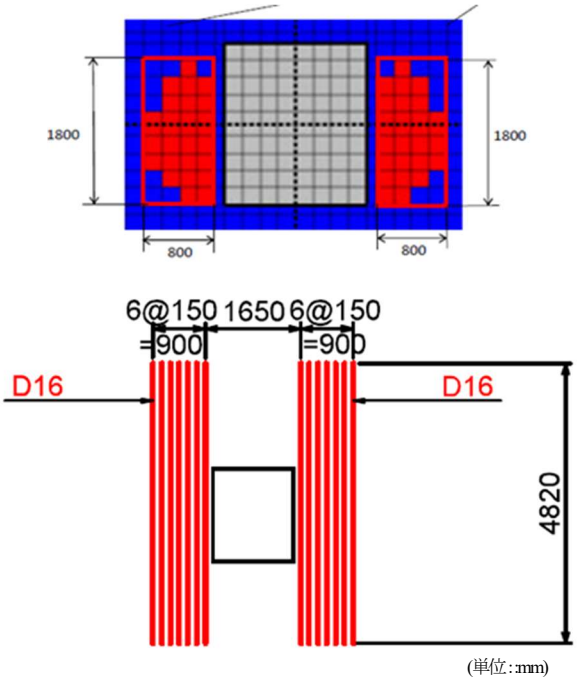


図-11　追加補強範囲と補強鉄筋

(2)　Step-2 の照査

図-11 は，図-10 の柱周り部分を拡大した耐久性ひび割れ照査結果のコンター図と追加補強鉄筋である．

コンター図から柱の両側の 800mm×1800mm の範囲に補強鉄筋が必要であることが分かる，この範囲に必要な定着長を考慮した補強鉄筋（D16@150mm）を 1 段目の基本配筋と干渉しない 2 段目に追加する．

柱周りに限らず，他の制限値超過範囲に対しても同様に補強鉄筋を追加配置する．

(3)　Step-3 の照査

Step-3 では，Step-2 で補強を行った配筋条件にて，再度，3D 解析による照査を実施して全ての範囲にて制限値を超過するメッシュが無いことを確認する．

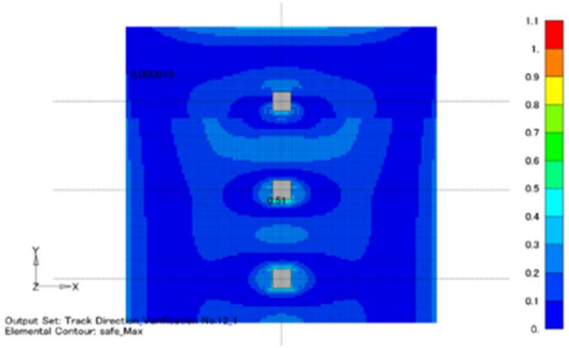


図-12　B1F スラブ耐久性ひび割れコンター図

Step-3

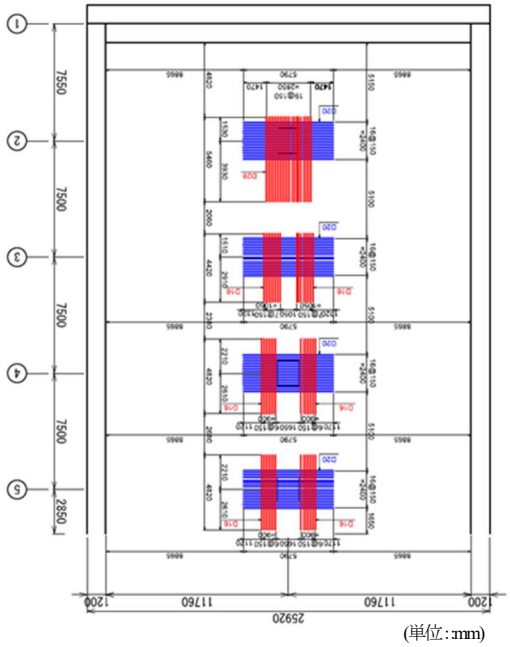


図-13　B1F スラブ補強配筋略図

図-12 は，補強後の B1F スラブの耐久性ひび割れ照査を示したコンター図である．

補強後も制限値を超過していた場合には，鉄筋径を更にランクアップする等の対応をとり，要求性能を満足するまで繰り返せばよい．

図-13 は B1F スラブの 3D 解析により追加されたフラットスラブの 2 段目補強鉄筋である，赤線は 3D 解析による補強鉄筋，青線はパンチング破壊照査によって調整のために追加した補強鉄筋を示している．

本設計では 3D 解析を活用することによって，補強範囲や補強鉄筋量を柱周りの必要範囲のみに限定することができた．

従来型の 2 次元フレーム解析は得られた断面力を柱間帯や柱列帯毎に一定割合で配分する簡易的なものであるため，フラットスラブに配置する補強鉄筋量は安全側に考慮して広く多めに配置するしかなかったが，本設計手法を採用することで無駄を無くすことができた．

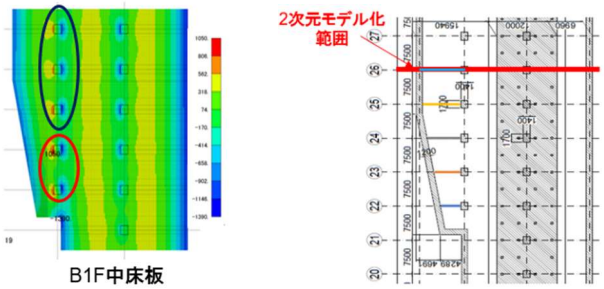


図-14　断面変化点のモーメント分布

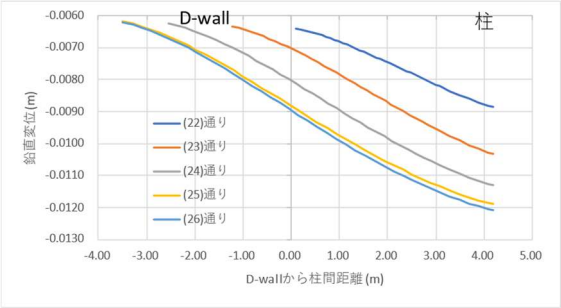


図-15　B1F　鉛直変位 － 柱・D-wall 間距離

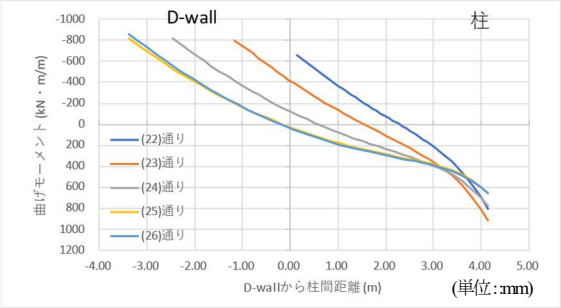


図-16　B1F　曲げモーメント － 柱・D-wall 間距離

5.　径間長が変化する断面における特異点

従来型の 2 次元フレーム解析では，径間長が長い大断面の設計結果を小断面に適用することが一般的に行われているが，3D 解析の結果，小断面でも支持条件や妻壁等の近接部材の影響により曲げモーメントが局所的に大きくなる部分があると判明した．

図-14 の B1F 曲げモーメントコンター図では，柱通り 22，23 の柱周辺が赤くマークされている範囲が広く，柱通り 24~26 に比べて曲げモーメントが大きくなっていることが分かる．

これは，地中連続壁と柱の間隔が短くなるほど沈下量の差は小さくなるが，曲率は逆に大きくなり，その結果として曲げモーメントが増加したためと考える．**図-15**, **16** に柱と D-wall 間距離における鉛直変位と曲げモーメントの関係を示す．

このような構造上の特殊部分についても，3D 解析を用いることより適切な設計を行うことが可能となる．

6. まとめ

3D 解析の断面力分布からメッシュ単位で性能照査を行うことで，複雑な構造を有する地下駅の隅々まで漏れなく要求性能を満足し，部材補強を必要最小限に留める合理的な設計手法を実用化することができた．具体的な成果としては，従来型の 2 次元フレーム解析を前提とした設計手法により必要とされていたスラブ鉄筋量に対して，3 駅平均で約 10%の削減を達成した．また，断面変化位置では，3D 解析で照査することにより，従来の手法では見逃す可能性があった応力超過箇所の補強も事前に行うことができた．

地震の影響が少ない海外地下駅構造において，フラットスラブを採用する機会は多くなると思われる．今後はさらにひび割れ後の剛性低下を考慮することや，大小の開口を反映する等，3D 解析の高度化や活用範囲の拡大に挑戦し，労働生産性の向上の実現に寄与したいと考えている．

NOTES

注1) 鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物)平成 16 年 4 月　鉄道総合技術研究所

注2) 鉄道構造物等設計標準・同解説(開削トンネル)　平成 13 年 3 月　鉄道総合技術研究所

注3) 鉄道構造物等設計標準・同解説(土留め構造物)　平成 24 年 1 月　鉄道総合技術研究所

注4) 鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物)　平成 24 年 1 月　鉄道総合技術研究所

注5) American Association of State Highway and Transportation Officials Load and Resistance Factor Design (LRFD) Bridge Design Specifications, 2017

注6) Department of Public Works and Highways Design Guidelines, Criteria and Standards (DPWH-DGCS), 2015 Edition

注7) Abaqus /CAE 2020　マニュアル　2020 ITOCHU Techno Solutions Corporation

注8) FEM 照査ツールソフト　マニュアル ITOCHU Techno Solutions Corporation

(Received March 22, 2024)
(Accepted ●●, 2024)

FLAT SLAB DESIGN OF UNDERGROUND STATION BUILDINGS USING 3D FEM TOOLS

Maresuke ITO, Hiroshi OHNO, Shinji KOTANI and Naoki TANAKA

A joint venture (SFTE-JV) led by Shimizu Corporation is currently conducting the detailed design and construction of underground station box culverts for the first subway project in the Republic of the Philippines, the Metropolitan Manila Subway Project (MMSP), Section CP101. In Japan, where earthquakes are common, underground stations are generally constructed with rigid-frame structure which consist of beams for earthquake resistance, but in the project site of MMSP, the ground has good quality and the underground stations are all contained in solid soft rock layers, thus making the effects of earthquake minimal. Therefore, a simpler flat-slab structure was adopted to improve workability and ensure quality, and at the same time, make effective use of the interior space. Conventional 2D frame analysis is a simplified method in which cross-sectional forces obtained from 2D analysis are redistributed in a certain ratio for verification. In this design, 3D FEM analysis was used to verify stress development in every detail of the station structures, aiming for a rational design that provides the necessary amount of reinforcing steel bars in the critical areas.