

サグラダファミリアの地下聖堂

－ 既存基礎の補強 －

著：Carles Buxadé
訳：高津比呂人

聖堂や教会のように大規模で記念碑的な建物の建設においては、建築様式の流行の変化や現場での計画の修正または変更により、最終的に当初計画したものとはかなり異なったものとなるケースも多く見られる。

サグラダファミリア教会の建設の歴史も、過去2世紀にわたる数度の建築様式の流行の変化と関連している。サグラダファミリア教会の設計とその後の建設を理解するための一つの重要なポイントは、建築家がフランシスコ・ビリャールからその助手であったアントニ・ガウディに代わったことにある。ガウディが1906年に彼の流儀に沿った設計に変更したことにより、この教会のプロジェクトに変化がもたらされた。

本報では、フランシスコ・ビリャールが計画した建物に対して、ガウディの設計により建物の規模が大規模化し、荷重が増加したため、その荷重に抵抗するために今世紀の初めに実施した基礎の補強工事の詳細について述べる。このプロジェクトでは、地盤に荷重を伝達するためのマイクロパイルの施工と、既存の組石造の基礎と鉄筋コンクリート造パイルキャップを一体化させる工事を実施した。

キーワード：補強、基礎、サグラダファミリア、マイクロパイル、ポストテンション工法

1. 歴史の紹介

民間カトリック団体「サン・ホセ協会」が、ホセ・マリア・ボカベージャ・バルダゲールにより1866年に設立され、1881年に、マヨルカ通り・マリナ通り・プロバンス通り・サルデーニャ通りに囲まれる区画を購入した。そこに地下聖堂の建設が構想され、バルセロナ司教区付の建築家、フランシスコ・デ・パウラ・デル・ビリャールにその設計が依頼された。その数ヶ月後には、ゴシック様式の地下聖堂の建設が始まった。だがその後すぐ、ボカベージャのアドバイザーである建築家ファン・マルトレルとの意見の不一致によりビリャールは辞任してしまった。ボカベージャはマルトレルにプロジェクトの依頼をしたのだが、彼は代わりに若手建築家で学生でもあり、ビリャールの助手を過去2年間務めていたアントニ・ガウディを推薦した。この職務がアントニ・ガウディに引き継がれたのは、1883年11月3日であった。建設中であった地下聖堂の支柱の高さが変更され、それにより地下室全体へ外部との換気がいきわたるようになった。地下聖堂の建設は1889年に完了した。

当初から、地下聖堂の位置を念頭においた教会の設計が行われた。1890年に祭壇の後ろ（（訳注）半円形に突出する部分、以下、後陣とする）から見た教会の全容に関する図面が完成し、そこには12本の塔と中央に高いドームが描かれていた。1892年にはその後陣のファサードの建設が始まり、1893年にはガウディは生誕のファサードの研究を始め、教会の設計原案を立案した。その時以来、ガウディのデザインの導入が開始され、その幾何学的複雑さを長年にわたって進展させ続けている（（図 - 1））。

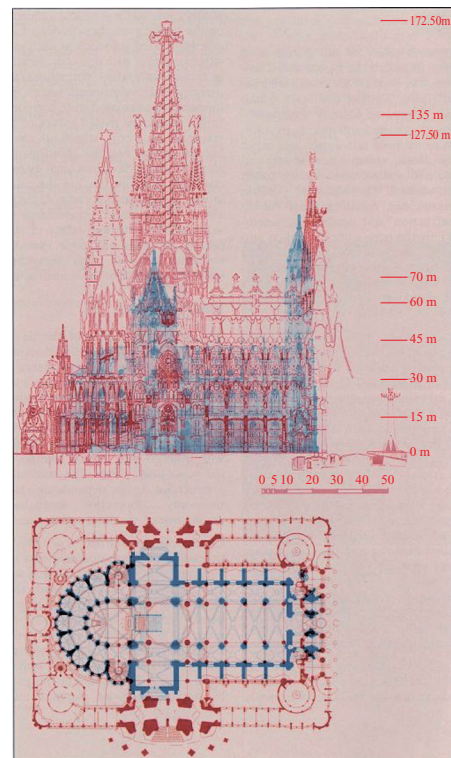


図 - 1 ビリャールの設計（青）とガウディの設計（赤）の比較

2. 教会の概要と補強の理由

サグラダファミリア教会はバシリカ式（（訳注）教会建築の平面形式のひとつ）であり、5スパンの身廊（（訳注）入口から主祭壇に向かう中央通路のうちの翼廊に至るまでの部分）と、3スパンの翼廊（（訳注）十字形の建物の、身

廊に対して直角に建てられた部分) から成る。身廊と翼廊の中央の通路は、幅 15 m・高さ 45 m で、それと平行して並ぶ幅 7.5 m・高さ 30 m のものより大きい (図 - 2)。

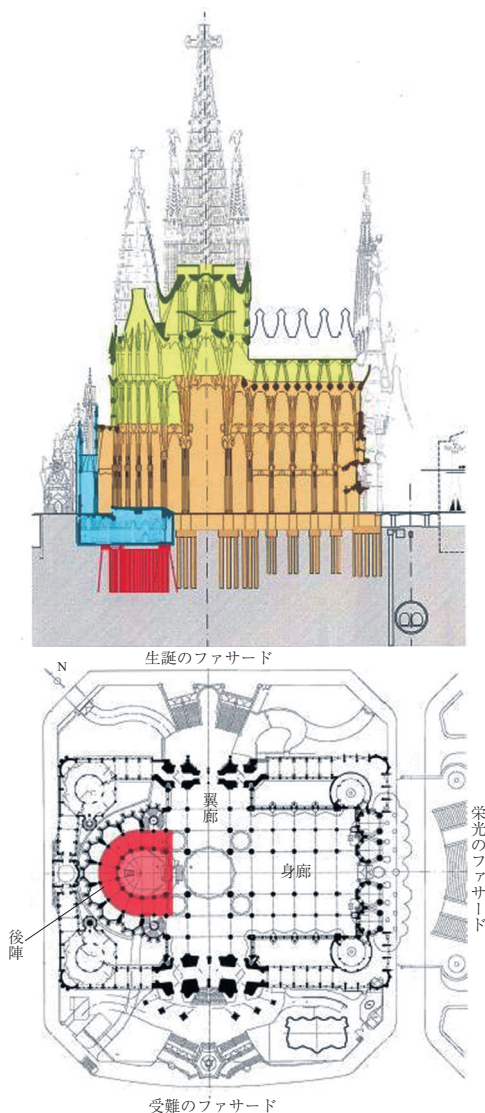


図 - 2 平面図と断面図

1925年までのビリャールの計画(青), 2007年の地下聖堂の補強(赤), 2007年の補強以前の教会(橙), 2013年現在の教会(黄)

身廊の北西の奥には、2つの聖具室(訳注)宗教行事に使う品々や僧衣を保管する場所が隣接する。後陣(ガウディにより50mの壁が建てられた)があり、その反対側に位置するのが栄光のファサードである。翼廊の北東側にはガウディが完成させた4つの17mの塔をもつ生誕のファサードがあり、その反対側には4つの110mの塔がある受難のファサードが位置する。

身廊と翼廊の交差部には、中央に172.5mのイエスの塔、その周りに高さ120mの4つの福音伝道師の塔が配置されている。それに加えて、後陣の上には高さ127.5mの聖母マリアの塔が配置されており、地下聖堂はこの聖母マリアの塔の下に位置している。

生誕のファサードは1935年に完成した。この荷重は予想されたものであったが、地下聖堂についてはそうではなかった。聖堂上部に後陣の建設が始まった1892年以前の1889年に地下聖堂は完成している。当初、聖堂は120mの高さとなる予定であった。地下聖堂の基礎と下層の柱は、後陣のデザインが修正される前にすでに建設されており、増加した荷重を支持できる構造になっていなかった。2007年、後陣の建設が最終荷重の30%に相当する30mに到達した時点で地下聖堂基礎が支持できる最大荷重に達することとなり、地下聖堂基礎の補強工事が実施されることとなった。

ガウディの設計変更による荷重の増加および、現行基準における安全係数への適応が、20世紀初期に建設された部分の構造部材を補強する理由であった。

3. 教会のモデル化

FEMモデルを使って、構造解析を実施した。数カ所のきわめて特異な部分を除いて、主に3次元シェル要素と梁要素を用いた。シェル要素で、シェルやプレート(アーチ型の屋根、床スラブ、壁)をモデル化した。この四角形3次元シェル要素は、それぞれ回転3成分、並進3成分の6自由度をもつ4つの節点で定義される。柱や梁のモデル化に用いた梁要素は、それぞれ回転3成分、並進3成分の6自由度をもつ2つの節点で定義される3次元要素である。

サグラダファミリアの構造設計には以下の3つの荷重ケースを想定した。

- 1) 常時荷重と積載荷重、荷重係数は1.8とした
- 2) 常時荷重と積載荷重に水平方向の風荷重を足したものの、荷重係数は $0.9 \times 1.8 = 1.62$ とした
- 3) 常時荷重と積載荷重に地震荷重を考慮したもの、荷重係数は、ここでは他の荷重の割増はせず、地震荷重のみ $0.8 \times 1.8 = 1.44$ とした

サグラダファミリアの構造設計に用いた安全係数はEH-80 (Spanish building code on plain or reinforced concrete design and construction; 無筋および鉄筋コンクリートの設計と施工に関するスペインの建築基準) から採用した。改訂版のEH-91では、標準の材料が用いられたtypeC建物(破壊によってかなりの損失を引き起こすもの)での荷重係数は1.8となっている。一方、その後の基準(EHE-98やEHE-08)ではこの数字が低減されているが、ここではこの建物の他の部分の構造との一貫性と、まだ詳細が決まっていない未建築のエリアの不確実性の度合いから、1.8を採用することとした。

また、それぞれ3つのケースに対して、重ね合せの原理が適用できないため、必要に応じて2次の微小項まで考慮した非線形解析モデルを作成した。この全体モデルで、地下聖堂の既存基礎に必要な補強量を求めることができた(図 - 3)。

4. 地下聖堂の基礎の材料と地盤

サグラダファミリアの地下聖堂の下の地盤は、2つの

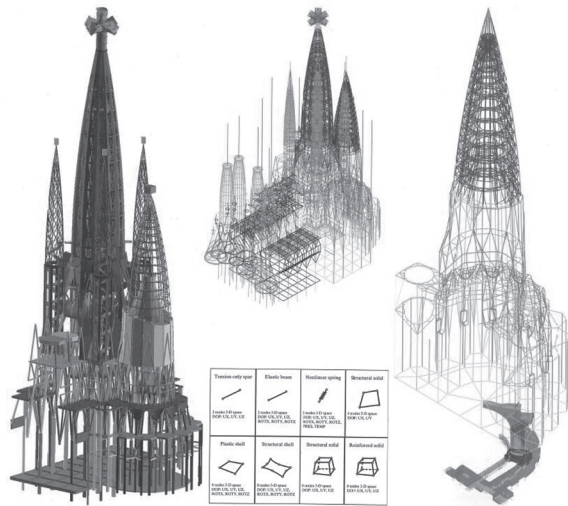


図 - 3 教会の FEM モデル

地質单元から構成されている。

- 1) 第四紀 (訳注) 260 万年前から現在までの期間) のユニット: 粘土・赤色シルト質粘土・小さな石英とスレートの礫・岩の堅さをもつ炭化物の団塊から成る層と、礫・赤色粘土を含む小さな石英とスレートの礫から成る層と、シルト質の茶褐色の砂から成る層の三つの層で構成される。試験の結果、圧縮強度は 1.12 ~ 1.37 N/mm² であり、変形係数は 12.8 ~ 18.1 N/mm² であった。
- 2) 第三紀 (訳注) 6430 万年前から 260 万年前まで) のユニット: 粘土と茶褐色の泥灰質粘土を含む薄い砂層から成る。地盤の支持力は、2.35 ~ 3.21 N/mm² であり、弾性係数は 34.5 ~ 43.9 N/mm² であった。

また、地下聖堂の構造体と基礎で使用されている材料である、石・レンガ・モンジュイックストーン (地元の石で教会の建築に使われている) などの材料特性を把握するための試験を実施した。その結果、モンジュイックストーン・レンガ・石の弾性強度をそれぞれ、52 N/mm²・3.8 N/mm²・3.39 N/mm² とすることとした。

5. 補強モデルについて

最初の解析モデルは、最大の軸力を支える地下聖堂の柱を含む部分である。ここは、2つのタイプの有限要素 (2次元のシェル要素と3次元のソリッド要素) でモデル化した。両要素とも1つの節点あたり6つの自由度をもつ3次元要素であり、幾何学的非線形と材料非線形 (弾塑性特性) を扱うことができる (図 - 4)。

2つ目の解析モデルは、支柱の基部と、既存の組石造の基礎と、鉄筋コンクリート製のパイルキャップと PC 鋼棒を組み合わせた部分である。支柱の基部とパイルキャップの部分については、ソリッド要素でモデル化し、弾性解析を実施した。一方、既存の組石造の基礎は引張力を負担させないように弾塑性のソリッド要素でモデル化した。PC 鋼棒は梁要素でモデル化を行った。

3つ目の解析モデルは、マイクロパイルとリング状の

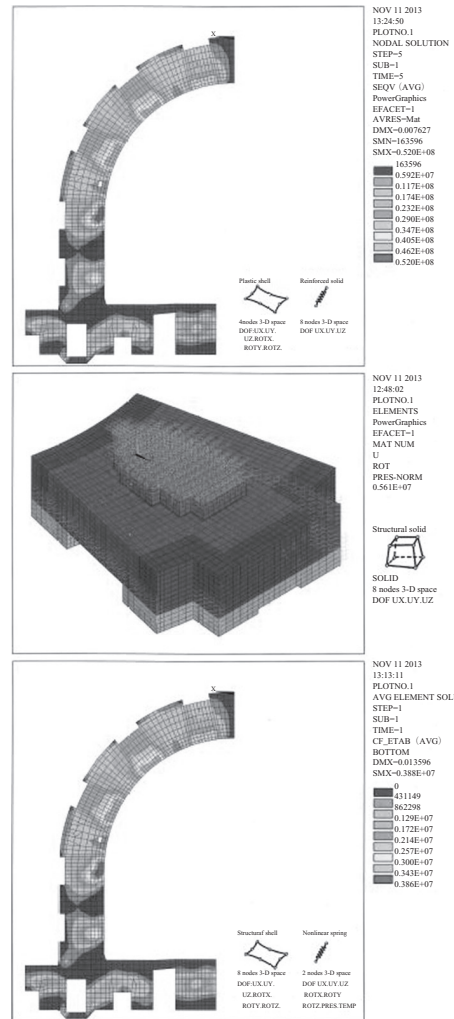


図 - 4 Octava de Nadal の柱、支柱の基部と既存基礎と新設の補強の集合体、マイクロパイルとパイルキャップの詳細モデル

梁とパイルキャップを固定するための基礎スラブの部分である。リング状の梁は梁要素でモデル化し、スラブはシェル要素でモデル化した。マイクロパイルは特殊なバネ要素でモデル化し、鉛直方向は、最大耐力がマイクロパイルの構造耐力に等しい荷重変形関係係数線上を挙動するものとした。

この構造は教会の建設における以下の2つの仮定の影響下にある。一つ目の仮定が初期荷重で、後陣が 30 m まで完成した荷重を考慮し、荷重増加は考えず、PC 鋼棒の荷重は考慮する。2つ目の仮定が最終荷重で、建設が完了して値が増えた教会の全荷重を考慮する。

6. 補強について

既存の基礎は、石と石灰モルタルによる組石造の構造であり、高さ 0.95 m で地下聖堂の支柱の直下にある。基礎は鉄筋コンクリート製スラブの一群で支持されており、荷重はスラブに結合されたマイクロパイルを通じて支持層に伝達される。

補強案は、既存基礎を支持し、直径 0.15 m、深さ 15 m

のマイクロパイル群に荷重を伝達する鉄筋コンクリート造パイルキャップで構成されている。

新設パイルキャップと既存基礎の一体化は、組石造部分を貫通するPC鋼棒が新設パイルキャップに定着されることで行われる。さらに、組石造の基礎は、新設のパイルキャップの0.5mのアゴの部分で接続される。パイルキャップの高さは1.55mである。

一体となった新しい基礎は、後陣と聖母マリアの塔からの荷重を的確に地盤に伝達できるようになる。生誕のファサードの表層土は砂であるが、他の部分は粘土である。

使用したコンクリートはC-35（立方体供試体の圧縮強度 35 N/mm²）、異形鉄筋はB500SD（降伏強度 500 N/mm²）、鋼板はS275JR（降伏強度 275 N/mm²）、PC鋼棒は降伏強度 500 N/mm² 級のものを用いた。

7. 改修工事手順

改修工事の概要を図-5、6、7に示す。基礎の補強工事の施工手順は以下に示すとおりである。

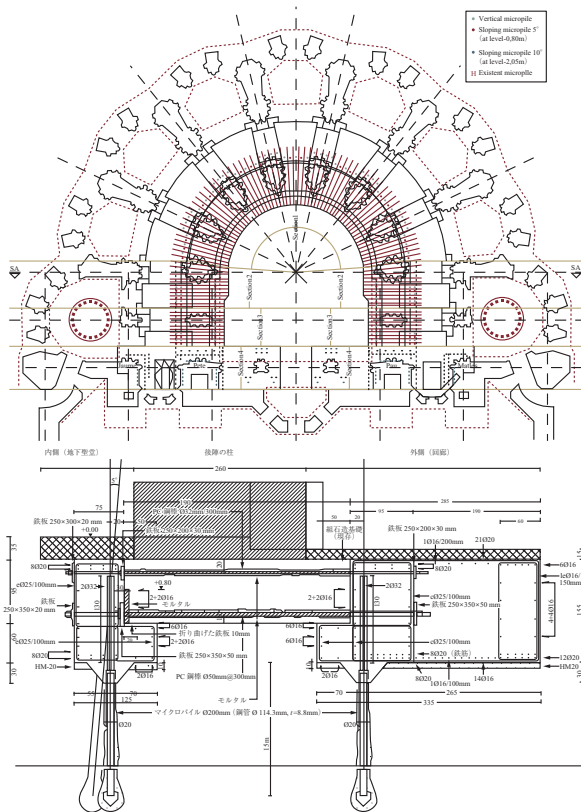


図-5 地下聖堂のマイクロパイルとパイルキャップの位置および、新設RC基礎と既存基礎のPC圧着により一体化する部分の断面詳細

- 1) マイクロパイルを打設する場所の仕上げを-0.8mまではがす(図-8a)。
- 2) マイクロパイル部の削孔を行う。マイクロパイルには鉛直のものと斜めのものがある。
- 3) マイクロパイルを設計強度 30 N/mm² のセメントで

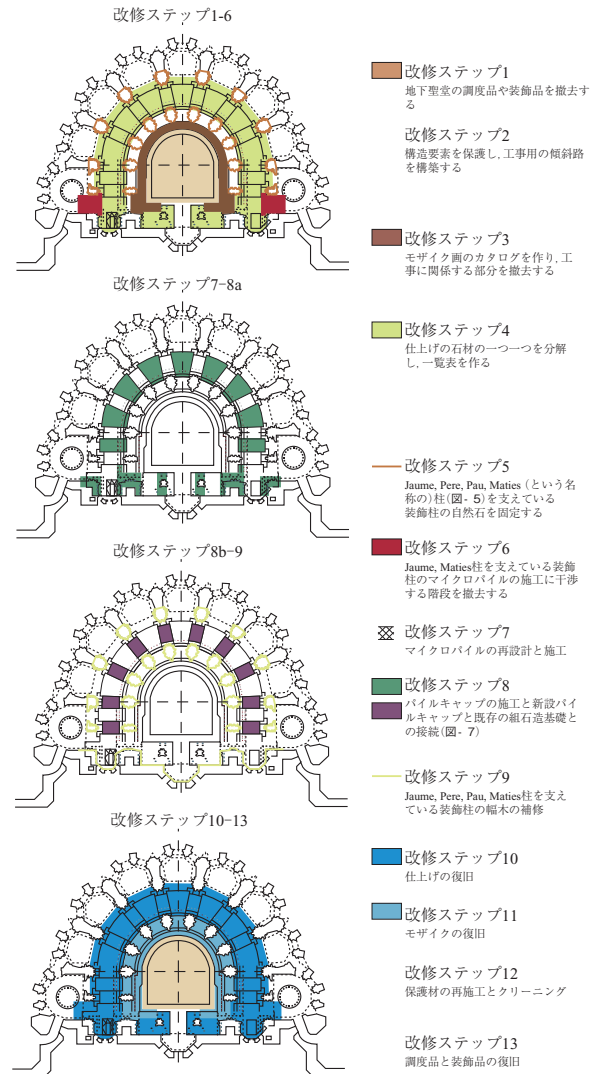


図-6 改修工事概要

施工する。鋼管の端部は、コンクリート製パイルキャップの下端に配置する(図-8b)。

- 4) マイクロパイルの施工完了後、回廊側の放射状の基礎の間をトレンチ状に掘削する(図-8c)。
- 5) 各マイクロパイル周りの掘削を行い、定着部に鋼管を配置する。
- 6) 回廊側のパイルキャップ部分の配筋を行い、放射方向の鉄筋を重ねて配置する(図-8h)。
- 7) 配筋作業と並行してシースを設置する。
- 8) すべての要素の配置が完了したら、曲線に沿って鉄筋を固定する。
- 9) パイルキャップの型枠を設置し、コンクリートを打設する。
- 10) 地下聖堂の中心側の掘削を行う。その際作業スペースも考慮する。
- 11) 組石造基礎の側面に10mmの鉄板を配置し、隙間に膨張モルタルを打設する。
- 12) 既存基礎にPC鋼棒を配置するための穴あけを行う。削孔は、機械を回廊側に設置して一つずつ行う。

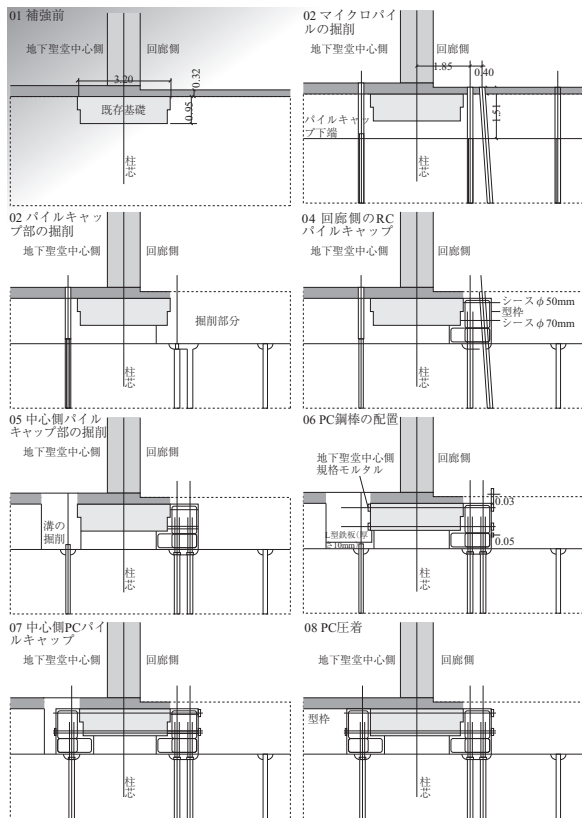


図 - 7 基礎補強工事の詳細

- 13) 上部は直径 32 mm, 下部には直径 50 mm の PC 鋼棒を開けた孔に配置する (図 - 8 d)。
- 14) PC 鋼棒の緊張を 4 段階で行う。
 - (1) 上部 (直径 32 mm) の鋼棒を 15.10 t まで緊張
 - (2) 下部 (直径 50 mm) の鋼棒を 34.35 t まで緊張
 - (3) 上部の鋼棒を 30.20 t まで緊張
 - (4) 下部の鋼棒を 68.70 t まで緊張
- 15) ポリウレタンパテで孔をふさぎ, モルタルを注入する。
- 16) 中心側のパイルキャップの鉄筋を施工する (回廊側と同様に 5)~9) に示した項目の施工) (図 - 8 i)。
- 17) 直径 50 mm のシースを既存の放射状の基礎の下に配置する。
- 18) 新しい基礎の残りの鉄筋を設置する。この鉄筋は, 新しい基礎と既存の基礎の間に設置した発泡スチロールに固定する。
- 19) コンクリートを打設する。
- 20) ダイヤモンドワイヤーを直径 50 mm のシース間に配置して, 既存の放射状基礎を切断する。
- 21) 既存の放射状基礎を撤去する。

8. おわりに

サグラダファミリア教会の地下聖堂の基礎の補強によって, 19 世紀の終わりに建設が始まった建物の安全性を, 現在の基準まで高めることができた。実際の施工は, 形状の複雑さと教会の大きな荷重のため, 難易度の高い

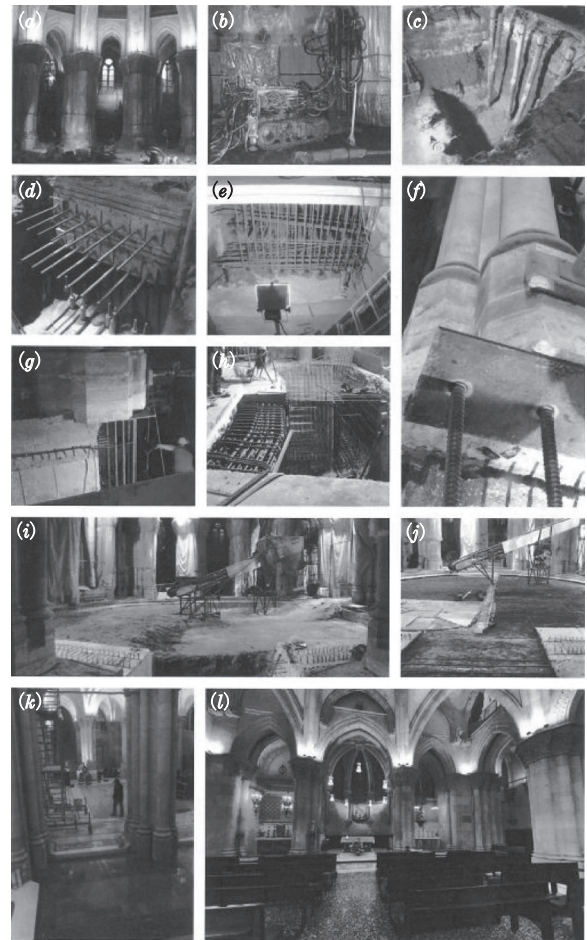


図 - 8 (a) 特殊な部材の保護と撤去 (b) マイクロパイル工事 (c) 溝の掘削 (d) PC 鋼棒 (e) 中間部の配筋 (f), (g) 後陣の柱の定着 (h) 回廊側のパイルキャップ (i) 地下聖堂中心側のパイルキャップ (j) 床防水工 (k) 仕上げ材の復旧 (l) 現在の状況

ものであった。補強工事の 2 年間の間も, 教会の残りの部分の建設工事は続いており, 一部は観光客にも解放されていた。結果として, 地下聖堂の外観はまったく変更されなかった。

マイクロパイルを使った補強工事は, 既知の工法であり, 他の既存建物の基礎の補強工事にもよく使われているが, 建物の特異性および全工程にわたり安全な施工計画に従って施工精度を確保したことが, 本工事における特色となっている。

This article was first published in English in *Structural Engineering International*, SEI, Vol.24, Nr.1, 2014, pp. 74-81, IABSE, Zurich

原典

Carles Buxadé, Sagrada Família' s Crypt: Reinforcement for the Existing Foundations, *Structural Engineering International*, Vol.24, Nr.1, 2014, pp.74-81

【2014 年 3 月 25 日受付】