

高性能コンクリートによるサステナブル建築 — サンフランシスコ公益事業委員会本部ビル設計・施工 —

著：Leo Panian, Phillip Williams, and Mike Donovan
訳：高津 比呂人

サンフランシスコ公益事業委員会本部ビルでは、アンボンドポストテンション PC と鋼-コンクリート合成リンク梁を組み込んだセルフセンタリング鉄筋コンクリートコア壁の革新的なシステムを採用し、大地震時にも損傷が小さく、直ちに再使用が可能で、簡単に修繕ができるといった高い耐震性能を達成することができた。また、コンクリートの二酸化炭素排出量を低減するため、フライアッシュとスラグセメントによりポルトランドセメントを置換したコンクリート配合を開発し、それを全面的に適用することにより、高い耐震性能と環境性能を両立するサステナブルコンクリート建物を実現した。

キーワード：耐震性能、サステナブルコンクリート、ライフサイクルアセスメント

はじめに

カリフォルニア州のサンフランシスコ公益事業委員会 (SFPUC) 本部ビル (図 - 1) は、厳しい耐震基準と挑戦的なサステナビリティの目標を両立させるための革新的な構造デザインの事例を提示している。最低限の耐震基準を満足して設計された建物とは異なり、SFPUC 本部ビルの構造は大地震時にも損傷が小さく、直ちに再使用が可能で、簡単に修繕ができるよう設計されている。

また、この建物は、米国グリーンビルディング評議会 (USGBC) の LEED プラチナに認定されるべく再評価を受けている。このすべてが、従来のオフィスビルに匹敵するコストで達成され、コンクリート構造物の耐震設計およびサステナブルデザインのための新しい基準を設定した。

2. 革新的な構造システム

あらゆる建築規準の基本的な目的は、居住者の安全性を保護することにある。耐震耐久性の概念が現在の基本建築コードや環境評価制度の枠組のなかでは明示されていないが、それを SFPUC 本部ビルの構造デザインにおいては性能目標の中心に据えた。われわれは、地震のあとの補修のために建物を長期に閉鎖する可能性を低減、あるいは無くすため、新しい建物の建設に必要な材料やエネルギーへの投資を行った。

この目標を達成するために、われわれは、油圧ダンパーや免震装置などの複雑な技術を使用することは避けた。これらの技術は、建物の応答を制御し、地震被害を最小限に抑えるうえで効果的であるが、非常に高価であり、設計や施工が煩雑になりがちであり、その適用性と実用性を制限することがあるためである。

われわれエンジニアリングチームの目標は、従来型の構成要素からなる革新的な構造システムを開発することであった。

しかしながら、以下の課題があった。

- 大地震時にも少ない損傷で耐えうること
- 施工コストや工期の面でより優れたエンジニアリングソリューションであること
- そして、このプロジェクトの建築デザインとサステナビリティの目標に適合していること

2.1 高さの壁を破る

SFPUC 本部ビルの建築デザインでは、その高さは 180 フィート (55 メートル) であった。米国の国際基本建築コードでは、コンクリート耐震壁構造の建物高さは 160 フィート (49 メートル) に制限されており、これが設計上の大きな障害となった。高層建物の場合、鉄筋コンクリート造では、モーメント抵抗フレームシステムまたはデュアルシステム (モーメント抵抗フレームと耐震壁を持つシステム) のみが許可されている。しかし、モーメント抵抗フレームシステムは、我々の耐震性能目標を満たすには不十分であり、デュアルシステムでは多大な追加コストが必要であった。さらに、モーメント抵抗フレ



図 - 1 SFPUC 本部ビル完成イメージ
(Photo©KMD Architects)

ームを建物周囲に配置すれば、建物の内部で利用可能な自然光の量は減少し、それによって、電気照明とエネルギー使用が増加することとなる。

そこでわれわれは、一般的な基本建築コードの規定を満たし、われわれが求める耐震安全性の向上を図ることが可能な代替の構造システムを実現できる、性能規定型の設計手法を採用することとした。この方法では、詳細な非線形地震応答解析と、専門家による厳しい評価プロセスによって検証が行われる。

性能規定型の耐震設計における主要なパラメータは、通常、建物の変形であり、ある階の建物の水平変形をその階高で除した層間変形角がもっとも注目される。層間変形角は、構造部材および非構造部材で発生することが予想される損傷の程度と関連させることができる。従来の建物の設計では、設計基準地震の下での最大層間変形角は一般的に2.0%に制限されている。SFPUC本部ビルでは、建物が地震後まもなく再使用できるようにする目的から、被害を最小限に抑えるため、最大層間変形角を1.0%と設定した。

もう一つの重要な目標は、地震後の残留変形を防ぐことであった。従来の設定では、構造部材の残留変形がエレベータ、室内ドア、および他のシステムの機能に影響を与えることが考えられ、具体的に基本建築コードには記述されていないものの、これらの残留変形を調整して元に戻すには非常にコストが掛かる結果となる場合がある。

そこでわれわれは、アンボンドポストテンションPCと鋼-コンクリート合成リンク梁を組み込んだセルフセンタリング鉄筋コンクリートコア壁の革新的なシステムを採用することとした。このシステム(図-2)では大地震時の建物の揺れの制御と、地震後に建物を元の位置に戻すことが可能となる。建物を元の位置に戻すために必要な強度と剛性を付与する垂直に配置されたポストテンション緊張材は、壁の全高にわたって配置されており、壁の上から挿入された緊張材の束は基礎内で折り返して

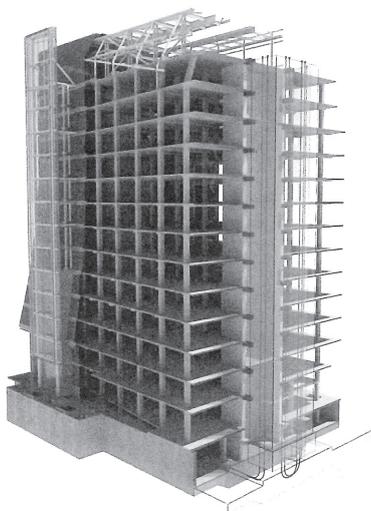


図 - 2 構造システム (Photo©Tipping Mar)

(図-3)、再び壁の上部に向けて配置される。2枚の壁のそれぞれに、建物高さの約2倍に相当する約400フィート(120メートル)の長さの8本の緊張材の束を配置した。

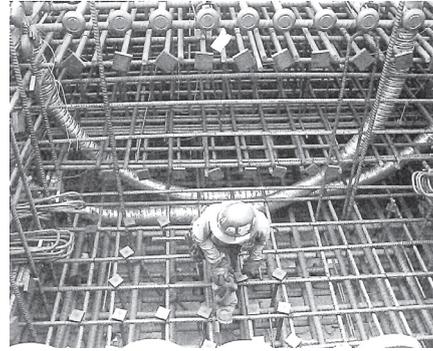


図 - 3 マット基礎の配筋 (Photo©Tipping Mar)

各緊張材は、28-φ0.6インチ(15mm)のストランド(図-4)とした。ポストテンション鋼材の配置により、コア壁において鉛直方向に配置する普通鉄筋量のほぼ50%が削減可能となり、配筋作業量の削減および過密配筋の最小化を図ることができた(図-5)。



図 - 4 耐震壁の緊張状況 (Photo©Tipping Mar)

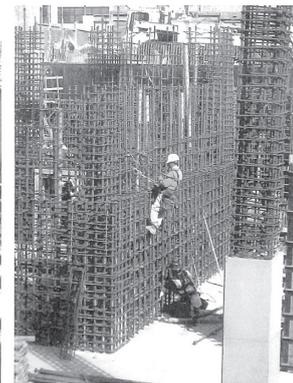


図 - 5 耐震壁の配筋 (Photo©Tipping Mar)

2.2 リンク梁

われわれのシステムに組み込まれた鋼-コンクリート合成リンク梁は、従来の設計手法からの革新的な発展を示すものである。典型的な鉄筋コンクリート構造では、耐震壁の各階出入口の上に形成される境界梁はせいが大きく、鉄筋量も非常に多く、X型配筋がなされることもある。結果として、従来型の境界梁は施工が非常に困難となる場合があった。また、その剛性のために、X型配筋がなされた境界梁は、地震によりひび割れなどの損傷を受けやすくなる。境界梁は数多く、かつ建物全体に分散されて配置されるので、地震後の補修費用がかかり、継続的な運用に悪影響を与える可能性がある。

SFPUC本部ビルに採用した鋼-コンクリート合成リンク梁は、打込み型枠と梁補強材を兼ねた3/8インチ(10mm)のプレートを用いた鋼殻構造とした(図-6)。

○ 海外文献 ○

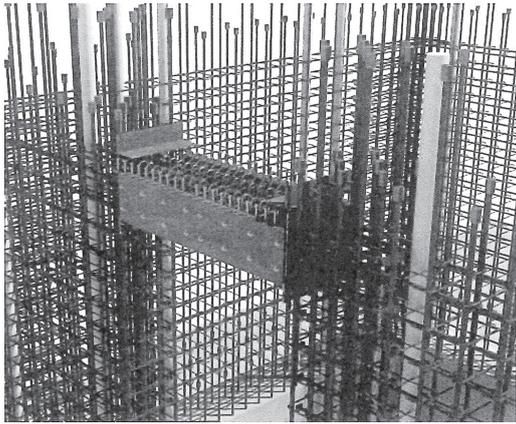


図 - 6 鋼 - コンクリート合成リンク梁と耐震壁接合部
(Photo©Tipping Mar)

結果的に、従来の境界梁よりせいが小さくなり、より柔軟な構造となった。また、一般的な X 型配筋をなくし、せん断補強筋の必要量を削減できたため、施工も簡素化された。床システムに導入される水平方向のプレストレスの影響により、鋼 - コンクリート合成リンク梁も、地震後に建物を元に戻す挙動に寄与するように設計されている。本プロジェクトの鋼 - コンクリート合成リンク梁は、幅 30 インチ (760 ミリメートル)、せい 20 ~ 36 インチ (500 ~ 900 ミリメートル) となった。

型枠を兼用した鋼板により、境界梁の挙動が根本的に変わる。繰返し地震荷重下では、従来の鉄筋コンクリート梁では塑性ヒンジ領域にひび割れが分散するのに対して、今回採用した梁では鋼板の作用により壁と梁の境界面に単一の曲げひび割れのみが形成される。さらに、鋼板が、コンクリートの圧縮ひずみを軽減するので、より耐力劣化が小さく粘り強い挙動が可能となる。ただ、これらの効果を実現するために、いくつかの特殊な設計上の考慮を必要とした。

鋼 - コンクリート合成リンク梁の梁主筋は、梁端部においてワックス掛けしたスリーブで覆うことにより、周りのコンクリートとの付着を切って早期に引張破壊することを防止した。さらに、壁との界面に鋼製ブラケットを埋め込み、機械的に拘束することによって直接かつ確実にせん断力を伝達するようにした (図 - 7)。外部の鋼板は、従来の境界梁に地震時に発生することが予想されるコンクリートのひび割れやはく落を防止するので、大規模な地震後の修理の必要性を最小限に抑えることができる。結果として、単に生命の安全を確保するだけのものよりもずっと高い性能を達成することができ、より費

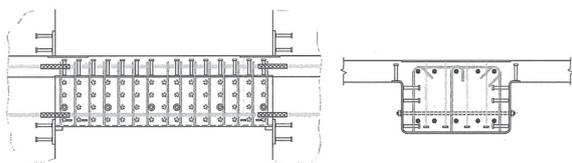


図 - 7 鋼 - コンクリート合成リンク梁 詳細図
(Photo©Tipping Mar)

用対効果と耐久性の高い構造部材となった。

これら革新的な構造部材の組合せにより、非常に復元性の高い骨格構造が実現され、地震の被害から建物とその重要なシステムを保護することができ、地震後に直ちに再使用および業務を開始することを可能とした。

2.3 床 構造

耐震設計の課題に加えて、コスト、建設の速度、および床厚さを最適化できる床システムを考案することも重要であった。一般的には、ポストテンション二方向版でこれらの制約を満たすことができるであろうが、建物の専有面積と建築計画上、一方は長スパン (ほぼ 41 フィート [12 メートル])、もう一方は短スパン (20 フィート [6 メートル]) となる非対称のグリッドであった。このような柱の配置で、一定の厚さの版を採用するのは、非効率的で非現実的であった。

そこでわれわれは、せいの小さいポストテンション梁と一方スラブを組み込んだ最適化された床システムを考案した (図 - 8)。梁は、おおむね幅 36 インチ (900 mm)、せい 16 インチ (400 mm) とし、スラブ厚は 6 インチ (150 mm) とした。採用した床システムの全せいは、鉄骨フレームの設計としたときよりも 12 インチ (300 mm) 小さく、同じ建物高さで 1 フロア分を追加することが可能となり、プロジェクトに大きな価値を付与することができた。

3. サステナブルコンクリート

最終的に、プロジェクト全体の目標を効果的に達成するためには、コンクリートの環境への影響に対処する必要がある。われわれの目標は、強度やワーカビリティの要件を損なうことなく、二酸化炭素の排出量を低減できるコンクリートの配合を開発することであった。高強度で、低セメント量のコンクリートの生産が実現可能であることは知られているが、このプロジェクトに必要な規模で、コスト的にも効率良く、そのようなコンクリートを生産することができるかどうかは明らかにはなかった。

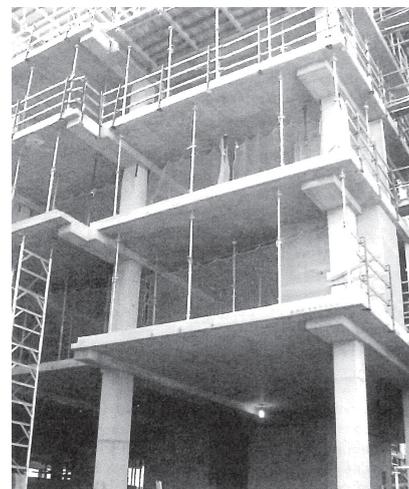


図 - 8 ポストテンション床システム (Photo©Tipping Mar)

3.1 低セメントコンクリート

以前のプロジェクトでの経験に基づき、われわれはクラス F フライアッシュとスラグセメントによりポルトランドセメントを 70% 置換するという目標を設定した。スラブの仕上げを損ねることなく、または打設にかかる時間を遅らせることなく、所定の強度を確実に発揮するためにいくつかの改良が必要であった。

配合設計において、以下の仕様を設定した。

- マット基礎スラブ：90 日の強度 8 000 psi (55.2 MPa)、最大ポルトランドセメント量 200 lb/yd³ (119 kg/m³)
- 柱と耐震壁：90 日の強度 8 000 psi (55.2 MPa)、最大ポルトランドセメント量 225 lb/yd³ (133 kg/m³)
- ポストテンションスラブ：3 日強度 4 500 psi (31 MPa)、56 日強度 6 000 psi (41.4 MPa)、最大ポルトランドセメント量 350 lb/yd³ (208 kg/m³)

建物が供用されるまで設計基準強度の発現は必要ないと考え、56 日と 90 日の強度を確認することとした。設計チームとコンクリート供給業者の協力により、この特殊なコンクリートの開発を行った。このコンクリートでは、高性能減水剤を使用し、低水セメント比を実現している。ただし、現在 LEED の枠組では、地元産の材料を使用することによる強力なインセンティブがあり、コンクリートの二酸化炭素排出量削減の全体的な目標とのバランスをとる必要があった。事前の実験で、地元で利用可能な細骨材の多くは、かなりの量のセメントを置換する高性能コンクリートには適合しないことがわかった。品質が劣る骨材を使用すれば、相対的に高い割合のポルトランドセメント量が必要となることが考えられる。そこでわれわれは、場所打ちコンクリートの全体的なコストと二酸化炭素排出量を効果的に削減するため、現場から 500 マイル (800 キロ) 離れた場所から高品質骨材を調達して使用することとした。

USGBC では現在、包括的なライフサイクルアセスメント (LCA) との関連で、建設資材の製造にかかる正確なエネルギーを考慮に入れた方法を組み込むため、LEED の枠組を再検討している。この方法はまだ正式なものではなく、広く使用されていないが、われわれが適切なコンクリート配合を選択したことを示すため、この方法を使用した。“ハイブリッド産業関連”炭素会計法を、素早く、適切にかつ自動的に、一貫した測定基準に基づくデザインオプションの分析のために適用した。

この方法は、コンクリート配合の環境影響を定式化し評価するための高い信頼性と柔軟なアプローチを提供する。低セメント配合の設計は紛れもなく環境にやさしく、設計段階での炭素含有量の評価では、標準的な配合の設計に比べ CO₂ 換算で 49% 減少することが示された。

ハイブリッド LCA 炭素会計法は、産業関連 LCA の網羅性と限定条件のあるプロセス LCA の特異性を兼ね備えたものである。プロセス LCA では、材料やエネルギーの正確な消費量と排出値を把握するために、ライフサイクルの各段階において、そのフローを秩序だった方法で分析するが、この方法は時間がかかり、実際の適用範

囲は限定される。プロセス LCA が、相互に関連するフローの分析を下位から上位に向かって構築するのに対して、産業関連 LCA は経済上のトップダウンのモデルの構築から着手する。この方法は、産業関連表で、原材料の採掘にまで遡ってすべての入力相互関係を捉えるため、プロセス LCA より優れているといえる。しかし、産業関連 LCA は実産業スケールのデータのみが提供されている点が問題である。ハイブリッドアプローチは、それぞれの弱点を最小限にし、それぞれの強みを活用するために 2 つの方法を組み合わせたものである。このハイブリッド法は、Climate Earth 社が開発した独自のソフトウェアを使用して SFPUC 本部ビルプロジェクトで実践された。これにより、コンクリート配合の環境影響を、一貫して確実に評価することができた。

3.2 コンクリート打設

コンクリートの仕様が確定して、施工が始まり進行するにつれて、われわれの設計の真価が問われた。われわれは重要な教訓を多数学んだ。将来の適用の際にはさらに発展させることができるであろう。

マット基礎の配合では、ポルトランドセメント量をもっとも小さいものとしていた。そのプラスシチシーは非常に優れていて、10 フィート (3 メートル) の厚さのマット基礎を構築するのに、ほぼ 5 000 yd³ (3 800 m³) を連続して打設することが可能であった。コテ押さえは、コンクリート打設終了後 4 時間で完了した。マットスラブ内部の温度は、設定値の 150° F (66° C) を大きく下回っており、大きなひび割れもその後観察されなかった (図 - 9)。品質管理用の 48 セットの円柱供試体を実験室でテストした結果、各円柱供試体とも要求強度の下限値を超えた。すべての平均値は 90 日で 8 560 psi (59 MPa) であった。

柱と耐震壁は、ほぼ同様の配合とした。おおむね、型枠は 24 時間以内に脱型され、その表面仕上げは非常に素晴らしいものであった。一様に滑らかで、表面の欠陥もほとんど無かった。ただし、柱および耐震壁に用いたコンクリートの強度試験結果の一部が、指定された強度



図 - 9 マット基礎の打設 (Photo©SFPUC)

○ 海外文献 ○

よりも低いものとなった。コア試料も採取し試験を行ったが、柱および耐震壁の一部で強度が不足していた。場所によっては、強度が 6 500 psi (44.8 MPa) 以下のところもあった。

強度不足を特定した後、実験結果から推定される下限強度の値を用いて、常時荷重と地震荷重に対する柱と耐震壁の設計・再評価を行った。評価の結果、耐震壁の全体的な設計には問題がないこと、局所的なコンクリート強度不足の影響でこのシステムの耐震性能に有害な影響がないことが示された。しかしながら柱の評価では、地震荷重と常時荷重の組み合わせ時に、いくつかの場所で設計許容荷重を超えてしまうことが示された。結果的に、いくつかの柱で最初の 2 層で 1 方向に断面を拡大することによって対処した。

またこのコンクリートは、試料採取法、保管方法、および実験方法により結果が大きく左右されることがわかった。したがって、当初はコンクリート打設の各 100 yd³ (76 m³) ごとに円柱供試体を採取していたが、その頻度を増やすこととした。

ポストテンションスラブの配合設計は、制約条件が多いため、より挑戦的であった。床の施工に必要なサイクルタイムを確保するため、つまり早期の緊張と脱型を可能にするため、コンクリート強度が 3 日間で 4 500 psi (31 MPa) に到達する必要があるがあった。確実にスケジュールに適合し、問題が発生する可能性を最小限に抑えるために、現地での養生実験により屋外条件下でコンクリート強度の測定を行った。最終的に、コンクリート供給業者が強度要件を満たすことができる特殊なコンクリート配合を開発した。この配合では、ポルトランドセメントを最大許容含有量 350 lb/yd³ (208 kg/m³) まで使用した。このコンクリートは打設性がよく仕上げも容易で、サンフランシスコベイエリアの異常な寒さにもかかわらず、従来の建設スケジュールで製造することができた。

3.3 光の反射率

スラブコンクリートの設計におけるもう一つの重要な課題は、指定された光の反射率の基準を満たすことであった。その仕様はスラブ下面で、日射反射指数 (SRI) 70 以上を満たすことであった。表面が非常に明るい色となると、必要な電気照明および追加の仕上げ材の大幅な削減が可能となる。コンクリート供給業者は、以前の経験と研究から、多量のスラグセメントを用いることで、必要な反射率に達する可能性があると考えた。

実物大模型によりスラブ下面の反射率の実験を行い、現場で発生するであろう問題について確認を行った。実験では、高スラグセメントコンクリートが、従来のセメントだけ、またはセメントに所定量のフライアッシュを混合したコンクリートよりも大幅に明るい色となることを確認していたが、実物大模型ではその期待した目標には及ばなかった。その理由として、スラブ下面が直射日光にさらされていないことが考えられる (日光にさらされていれば、より明るい色になる可能性がある)。その他の問題として、型枠のはく離剤とその時間変化に

よる変色が含まれていたことが考えられる。

4. おわりに

革新的なソリューションと、それが構造システムにもたらした相乗効果は、プロジェクトチーム内での緊密な連携の成果といえる。生産段階における発注者、設計者、施工業者間の交流はまた、将来のプロジェクトに応用可能な独自のソリューションを産み出した。このような背景のなかで進化した本建物は、堅牢で信頼性が高く、施工も容易であった。

施工業者とコンクリート供給業者が緊密に協力した結果、設計チームは、おのおの異なる構造部材に対して、種々の必要条件を満たすことができる、環境にやさしい高強度コンクリートの配合設計を確立することができた。結果的に、スラグセメントとフライアッシュの混合物により、最大 70 % のセメントを置換したコンクリート配合を開発し、ポルトランドセメントの上限値を最小で 200 lb/yd³ (119 kg/m³) とすることが可能となった。これは、おおむね通常の配合で使用するセメント量の 1/4 である。このプロジェクトでは、高性能で環境にやさしいコンクリートの大胆な目標を設定したが、それがコスト的にも実用上においても実現可能であることを証明した。

構造設計に革新的なアプローチを取り、地震に対する耐久性とサステナビリティの考え方をリンクさせれば、プロジェクトにおいては、構造システムと材料の選択がサステナブルデザインのより広い目標に対していかに重大で肯定的な貢献をするかが実証できた。この建物の構造が、高性能コンクリート建物の設計のための新たな基準を表わしたといえる。

さらに、このプロジェクトのための共同研究が現在進行中であり、以下の二つのプロジェクトでは、Charles Pankow 財団により資金が提供されている。

- Users Guide to Green Concrete Building Construction (建設における環境にやさしいコンクリート使用のためのガイドライン)
- Post-Tensioned Cast-in-Place Concrete Walls for Seismic Resistance (ポストテンション現場打ちコンクリート耐震壁の設計法)

プロジェクトの詳細については、以下の URL で参照することができる。

www.pankowfoundation.org/grants.cfm

Reprinted and translated with permission by the authors and the American Concrete Institute

原典

Leo Panian, Phillip Williams, and Mike Donovan: Redefining High-Performance Concrete Structures -Design and Construction of the San Francisco Public Utilities Commission Headquarters-, Concrete International, pp.23-30, 2012.11

【2013 年 4 月 24 日受付】