第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

ゴールデンゲート橋と耐震補強について

幸左　賢二[1]・渡邊　學歩[2]・佐々木　達生[3]

[1]正会員　Ph.D　九州工業大学名誉教授（〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1）
[2]正会員　工博　山口大学大学院創成科学研究科（〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1）
[3]正会員　工博 大日本コンサルタント（株）（〒541-0058 大阪府大阪市中央区南久宝寺町3-1-8）

1. はじめに

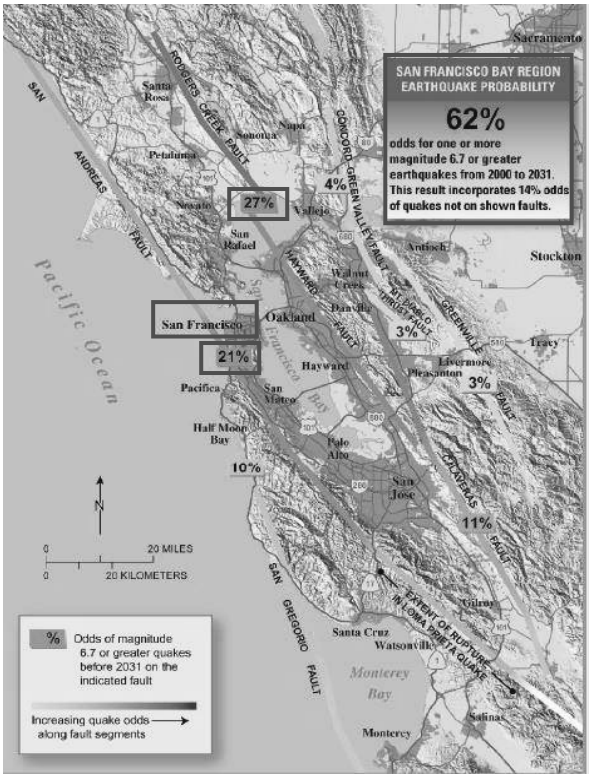
ゴールデンゲート橋はカリフォルニア州の道路網をなす重要幹線道路であり，約85年前の1937年に完成し，その規模からも世界的に極めて有名な橋梁である．ロマプリエータ地震により大規模地震による被害が懸念され，検討の結果大規模な耐震補強が必要となった．しかしながら財政上の制約のため現在まで段階的に耐震耐震改修工事が進められている．

本稿ではまず過去30年前に実施された耐震検討の概要を参考文献1から9を基に取りまとめる．ついで実施される代表的な耐震補強工事の概要を示す．最後に我が国において実施されている耐震補強との相違点について個人的意見を述べる．

2. 耐震補強の概要

参考文献１の道路管理者(District)による説明を以下に要約する．1989年10月17日マグニチュード7.1のロマプリエータ地震によりサンフランシスコ地域周辺で68人が死亡，少なくとも3700人が負傷し，推定60億ドルから70億ドルの損失が発生した．ロマプリエータ地震ではゴールデンゲートブリッジには被害は観察されなかったが，震源地が約90マイル南に位置していたため，この地震は大規模な耐震改修プログラムのきっかけとなった．

参考文献2の**図−1**に示すように，米国地質研究所(USGS)により2031年までにサンフランシスコ湾地域において広範な被害を引き起こす可能性のあるマグニチュード6.7以上の地震が少なくとも1回発生する可能性が62%であると発表された．**図−1**によると2本の断層(27, 21%)と不確定な断層(14%)の合計として62%となる．このような危険性の指摘からさまざまな規模の地震と予想される性能レベルに対する設計地震動が以下のように定義された．サイト固有の中程度の50年間で10%の確率で超過する地震は，加速度が0.46Gの地震として定義された．サイト固有の最大地震は再現周期が1000年あるいは最大加速度が0.65Gとして定義された．これはマグニチュード8.3の1906年のサンフランシコ地震に相当する．



図−1 UCGS のサンフランシスコの被害分布

しかしながら財政上の制約のため，構造的脆弱性の程度を反映した方法で段階的に耐震改修工事を進めることとし，1996年には次の3段階の施工となっ

た.

1)フェーズ1 (2001年, 費用100億円) : マリン側（北）アプローチ高架橋の改修

2)フェーズ2 (2001～2006年, 費用260億円) : サンフランシスコ側（南）アプローチ高架橋，サンフランシスコ側（南）アンカレッジハウジング，フォートポイントアーチおよびパイロンS1およびS2の改修

3)フェーズ3Aおよび3B (2008～2029年, 費用1400億円の見込み）：主吊橋とマリン側（北）アンカレッジハウジングの改修．他のフエーズに比べて規模が大きく，バイデン大統領のインフラ整備による600億円のサポートが実施されている.

なお上記内容の詳細な検討内容および工程などについては不明確な点も多く個別にヒヤリングする必要がある.

3. 設計の考え方

(1) 橋梁概要

ここでは約30年前にまとめられ参考文献3～9を基に設計の考え方を説明する．**図-2**には橋梁一般図を示す．**図-3**にはゴールデンゲート橋の耐震改修の箇所を示す．**図-3**に示すように両アプローチ部の耐震補強が完成したことにより，今後は主塔部，サドル，ダンパーの設置，主塔橋脚補強といった大規模補強

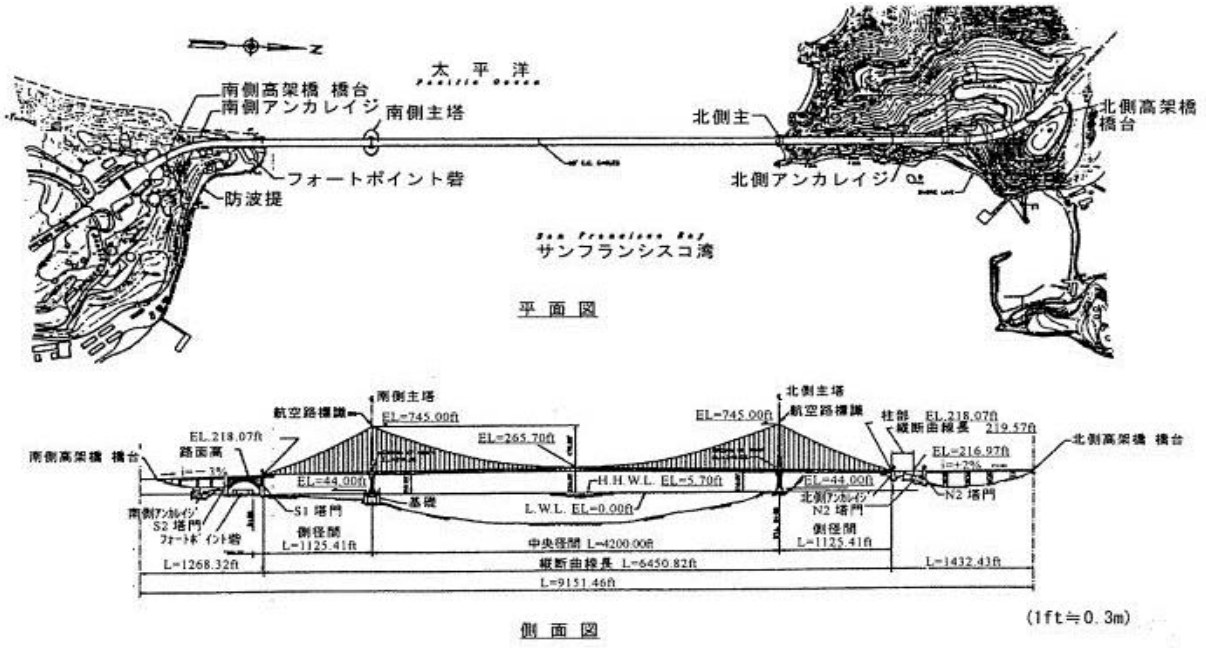


図-2 橋梁一般図

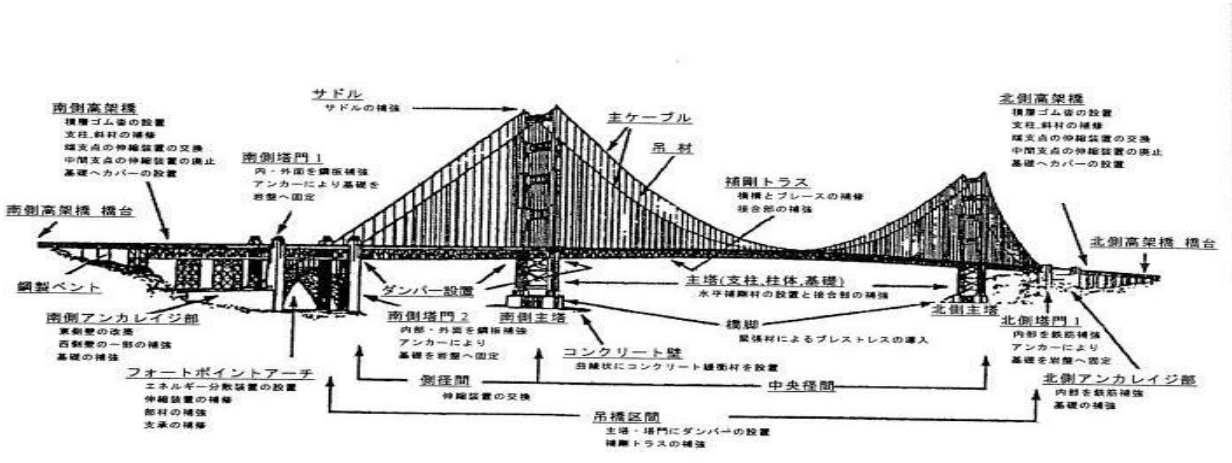


図-3 ゴールデンゲートブリッジの改修対策の概要

が予定されている．

図-2に示すように，ゴールデンゲート橋は1937年に建設されたメインスパンが1280mの吊橋で当時は世界最長の橋梁であった．

メイン部は3径間2ヒンジ吊橋で上部構造は鋼製トラス補剛桁であり，主塔は高さ210mでリベット接合されたマルチセル構造である．南北の取付け高架部は，鋼桁，鋼トラス，鋼アーチ橋（南側のみ）となっている．

(2) 解析手法

吊橋は一般に基本周期が長くなる．周期が長い構造物の地震応答は短周期よりも変位量が大きく地震力が低いという特性がある．モード解析法に基づいた応答スペクトル解析では塔脚のような高次振動モードは見過ごされがちであるため，直接積分による時刻歴応答解析が用いられている．

解析では部材の降伏や大変形が予測されるため，材料および幾何学的非線形性が考慮された．非線形動的解析は接戦剛性反復法に基づいたニュートン・ラプソン法により解かれた．減衰はレーリー減衰が仮定され，周期が5秒から20秒の間で5%の減衰率として計算された．

以上のようにいずれの論文も解析手法の概要説明に留まっており，詳細な解析手法，解析結果についてはヒヤリングにより詳細設計法を確認する必要がある．

(3) 応答スペクトル

参考文献7における設計に用いる応答スペクトルを**図-4**に示す．50年再現期間の50%と10%の発生確率の5%減衰の応答スペクトルを示す．

図-5 には文献 9 に示される応答スペクトルを示す．橋の耐震補強は最新の技術で行われ，プロジェクト固有の補強基準が作成されている．**図-5** に示したサイト固有の応答スペクトルは，現在の AASHTO の要件と同様の需要/容量分析で改修に使用されている．特に 2 つのスペクトルの違いについては十分には理解できないことから設計者に直接確認する必要がある．

図-6 には道路橋示方書のタイプⅠ地震動の応答スペクトルを示す．**図-7** には道路橋示方書のタイプⅡ地震動の応答スペクトルを示す．

例えばタイプⅠのⅢ種地盤の長周期側では応答スペクトルが 1 秒で 1.2G，2 秒で 0.8G，5 秒で 0.3G となっている．これに対して**図-5** の応答スペクトルは 1 秒で 1.1G，2 秒で 0.6G, 5 秒で 0.15G となっておりやや小さ目の値となっている．

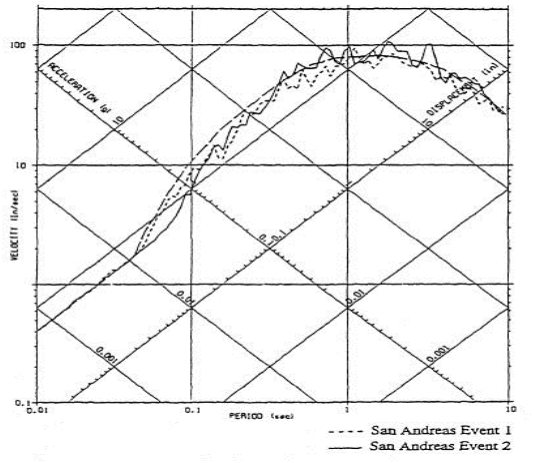


図-4 加速度応答スペクトル

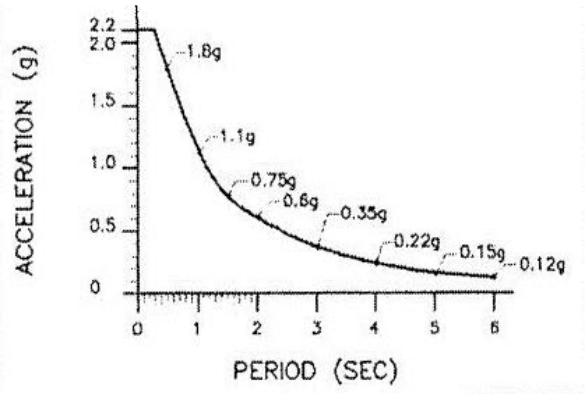


図-5 加速度応答スペクトル

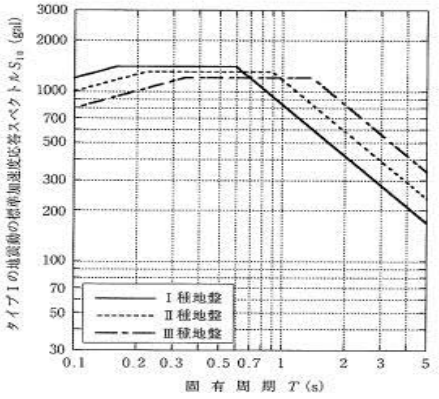


図-6 タイプⅠ加速度応答スペクトル

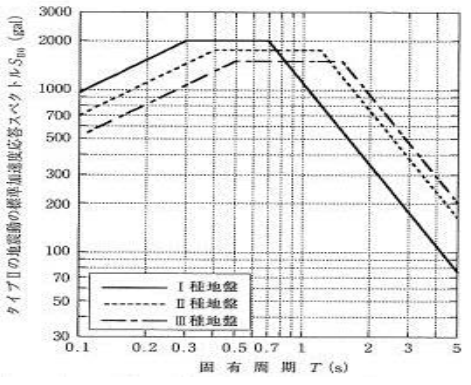


図-7 タイプⅡ加速度応答スペクトル

4. Ⅱ期補強工事の代表例（取付け高架橋）

ここではⅡ期工事のうちの代表例として南北取付け高架橋について説明を加える．**図-8**に北側取付け高架橋の改修計画を示す．**写真-1**には南側アプローチ部の施工を示す．取付け高架橋は，5径間の単純トラスで，1橋脚上で一方を固定式の鋼製支承，もう一方を可動式のロッカー支承で支持していた．解析の結果，地震力により支承に上揚力が生じることが懸念されたため，支承を交換するとともに単純トラスを連続化し，伸縮装置の交換，接合部の補強を図った．

図-9には支承部の改修を示す．支承はロッカー支承に替えて，鉛を核とした積層ネオプレンで構成される免震支承が用いられる．これにより高架橋全体に作用する地震力が低減され，構造全体での耐震性の向上が図れた．

上記のように単純桁は連続トラス構造に変更されている．これはロマプリエータ地震によりオークランドベイブリッジで発生した単純桁の落橋の事例を避けるためと説明されている．

5. Ⅲ期B補強工事の代表例（タワーの耐震補強）

図-10に主塔基部の解析したモデルを示す．モデルは，塔の台座の底板から最初のダイアフラムまで，合計2.4mの高さになるように作成されている（台座

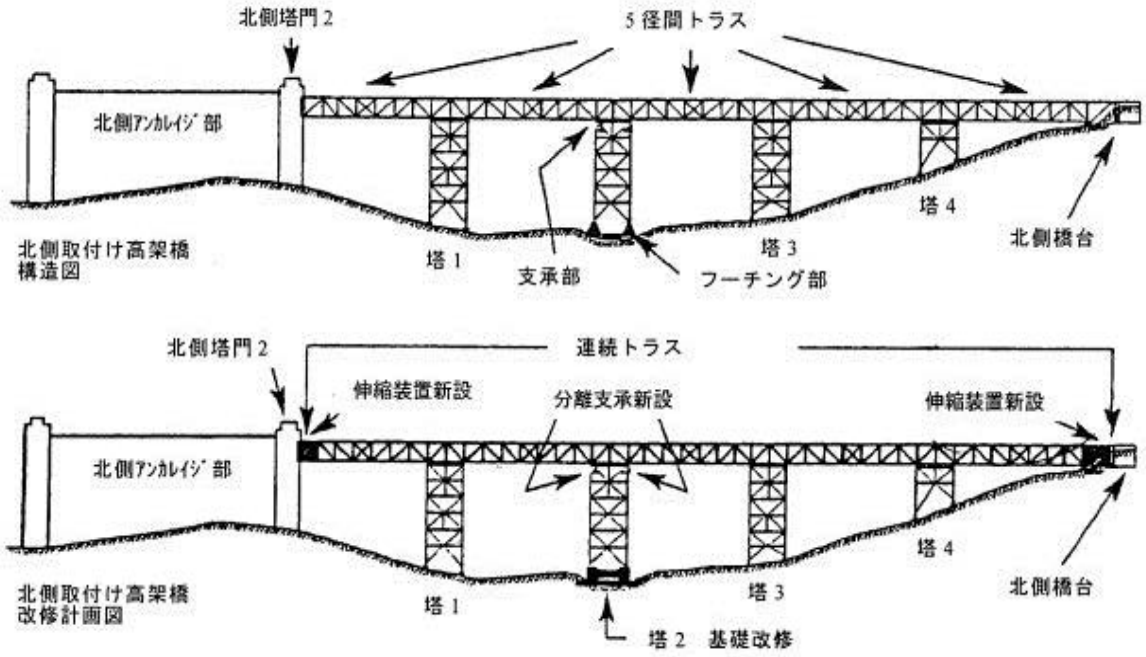


図-8 北側取付け高架橋改修計画

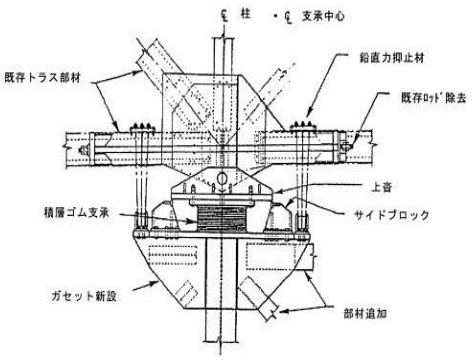


図-9 支承部の改修



写真-1 南側アプローチ部の施工

の「＋」字型の部分において，数値計算の手間を最小限にするために，適切な境界条件を付けて解析している）．

使用した有限要素モデルを**図-11(a)**に示す．荷重は単調増加とし，単純な三次元硬化塑性モデルを使用した．軸方向の延性が4のときのモデルの形状を**図-11(b)**に示す．板は正弦波状に座屈し，セルの両端間で座屈した．アングルは，座屈したプレートの形状に合わせて変形している．

図-12はこのモデルの応力-ひずみ応答を示している．個々のタワーセルのレトロフィットとして考えられるのは，プレートの中央部に補強材を追加して，プレートの幅と厚みの比率を小さくする方法である．このモデルの計算応答は既存セルと合わせて**図-12**に示す．

補強材の追加強度が既存セルの面積に平均化されるため，補強セルの「降伏」強度は既存セルのそれよりも高いように見えるが，これは補強材の追加強度が既存セルの面積で平均化されたためである．補強されたセルは，既存のセルよりもはるかに延性があることがわかる．**図-13**は延性要求が4.0である場

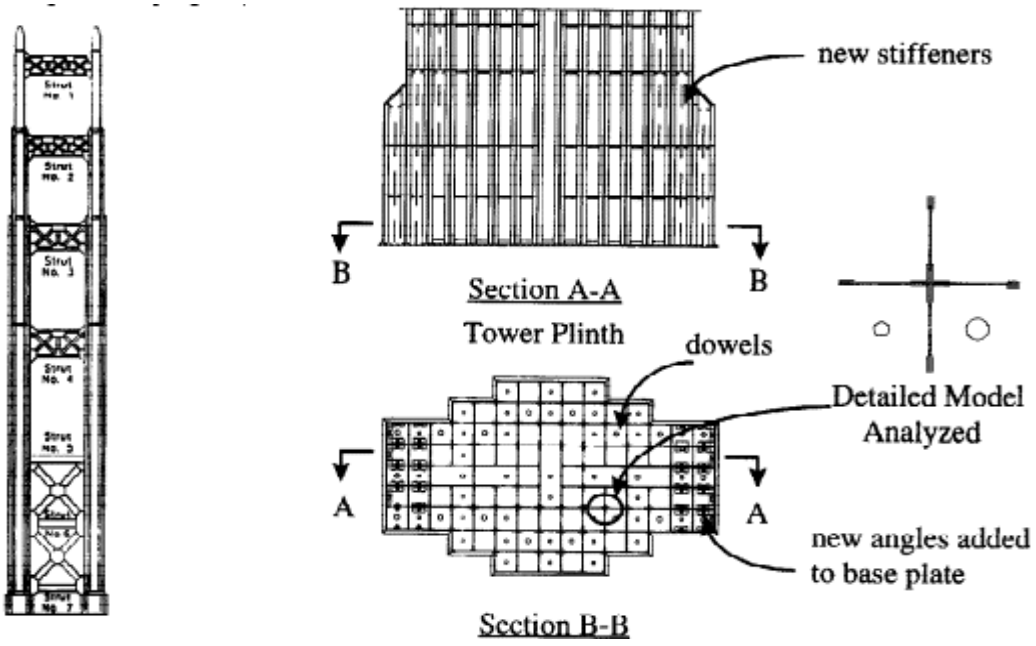


図-10 主塔基部の解析モデル

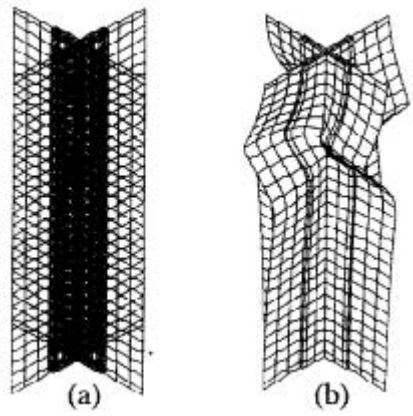


図-11 有限要素モデル

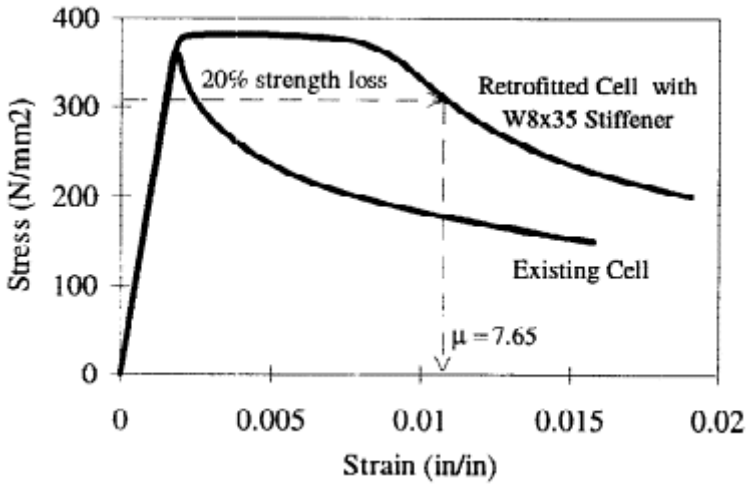


図-12 応力―ひずみ応答

合の補強セルの変形形状を示したものである.

6. 補強工事に関する課題

30年前より実施されている長大橋梁の耐震補強の検討について個人的意見を述べる.

1)補強費用が膨大

建設費(現在価格として5000億程度と想定)に比べて補強費が2000億にも達する大規模なものである.これは建設当時の耐震設計が十分ではなかったとともに，抜本的な耐震対策を実施しようとする考え方もあるためと考えられる.

2)高架橋の耐震対策

ロッカー支承のゴム支承への取り替えなどは我が国で一般的である．一方単純桁の連続桁への変更は大規模となることから我が国では一般には実施されていない．このような連続桁が望ましい考え方の背景にはロマプリエータ地震のオークランドベイブリッジの単純桁の落橋事故が考慮されていると考えられる．このように耐震補強の考え方には落橋した構造物の被害事例の影響が大きいと考えられる.

3)主塔基部の耐震対策

大規模な主塔耐震対策が提案されている．我が国では主塔基部の大規模な対策は少ないように思われる．このような差異が生じる理由についてはより詳細に検討する必要がある.

7. まとめ

ゴールデンゲート橋補強に関する過去の参考文献を取りまとめ，我が国の耐震補強法と比較した結果を以下に示す.

1)ゴールデンゲート橋では2000億円規模の主塔基部を含む大規模な耐震対策を実施する予定であり，我が国の長大橋の耐震補強に比較して極めて大規模な補強が実施される.

2)実施項目を我が国と比較すると，高架橋を単純桁から連続桁に変更する，あるいは主塔を補強するなど抜本的対策が認められた.

3)一方補強の規模だけでなく補強期間が30年間におよぶ長期間となるなどの特徴が認められる．これらの点については今後詳細にヒヤリングを実施し，我が国の耐震補強の取り組みの違いを明らかにする必要がある.



図-13 補強セルの変形形状

参考文献

1) Highway&transportation district : Seismic Retrofit Conctruction Project, https:// www.goldengate. org/district/district-projects/seismic-trofit/(2023年6月5日閲覧)

2) USGS : The USGS Earthquake Hazards Program in NEHRP-Investing in a Safer Future, https: //pubs.usgs.gov/fs/2003/fs017-03/fs017-0.3.pdf.(2023年6月5日閲覧)

3) 土木学会 地震工学委員会：既設構造物の耐震補強に関する研究報告書，2002.

4) 小島真志：ゴールデンゲートブリッジ，コンクリート工学，Vol. 46, No. 9, pp. 61-64, 2008.

5) 土木学会：ゴールデンゲート橋耐震補強2期工事竣工間近，土木学会誌 vol. 93, No. 4, pp. 4-5, 2008.

6) M. N. NADER and T. J. INGHAM：SEISMIC RETROFIT OF THE TOWERS OF THE GOLDEN GATE BRIDGE, Eleventh World Conference on Earthquake Engineering.

7) Charles Seim and Santiago Rodriguez： Golden Gate Bridge seisic retrofit project: A refernce for approaching the seismic aspects of the Gibraltar Strait bridge, Tenth world Conference on Eartquake Engineering.

8) Roy. A. IMBSEN, Robert A. SCHAMBER and Gerald V. DAVIS： Seismic Retrofit of the North Approach Viaduct of the Golden Gate Bridge, IABSE Symposium, San Francisco, CA 1995.

9) Fay BERNSTEIN, Michael O'SULLIVAN and Jerry CAO： Extending the Lifespan of the North Anchorage Housing of the Golden Gate Bridge, IABSE Symposium, San Francisco, CA 1995.

10) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編,2017.3.