

6. 港湾・空港

6.1 概要

ノースリッジ地震 (Northridge Earthquake) では、岸壁、護岸などの施設は無被害またはきわめて軽微な被害にとどまった。主な被害地点は、図 6.1 に示すとおり、震央から約 50~60 km 南方にあるロサンジェルス港 (Los Angeles Port) およびレドンドビーチ (Redondo Beach) のマリーナである。これらの地点では、いずれも液状化が発生している。これに対して、同じ図 6.1 に示す震央から約 20 km

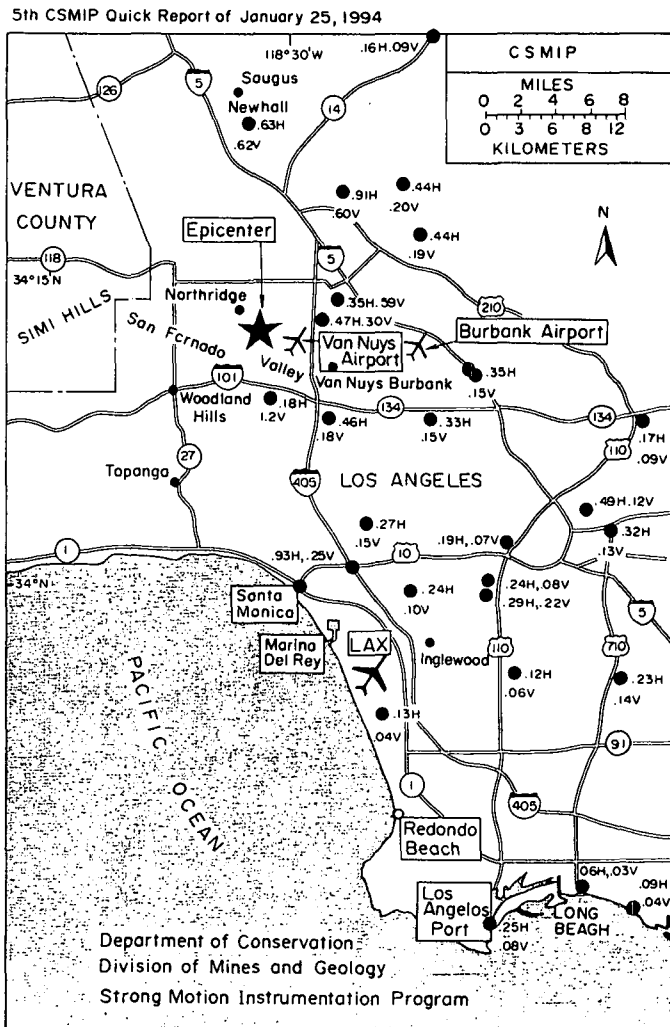


図 6.1 ロサンジェルス近郊における主な港湾・空港の位置と地震加速度

南方にあるサンタモニカ (Santa Monica) の海岸桟橋やマリーナデルレイ (Marina del Rey) などの施設は無被害であった。

ロサンゼルス近郊にある空港としては、震源域内に位置するバンナイズ空港 (Van Nuys Airport) をはじめとして、バーバンク空港 (Burbank Airport)、ロサンゼルス国際空港 (Los Angeles International Airport) などがあるが、バンナイズ空港内の建築物内部の非構造施設に被害が発生したほかは、いずれも無被害であった。

6.2 ロサンゼルス港 (Los Angeles Port) の被害

ロサンゼルス港は1872年頃に建設が開始され、特に、1920年代においては大々的な埋立等を含む拡張工事が行われ、現在に至っている。ロサンゼルス港の平面図を図6.2に示す。同図の中央付近に示す1点鎖線を境として、西側がロサンゼルス港、東側がロングビーチ港 (Long Beach Port) となっている。これまでに、1933年のロングビーチ地震 (Long Beach Earthquake)、1987年のウィッ

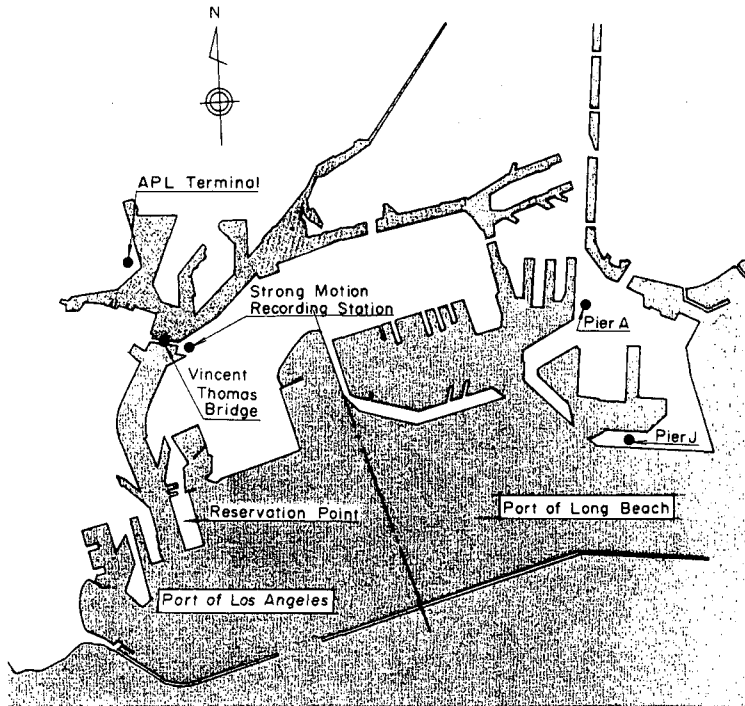


図6.2 ロサンゼルス港・ロングビーチ港平面図

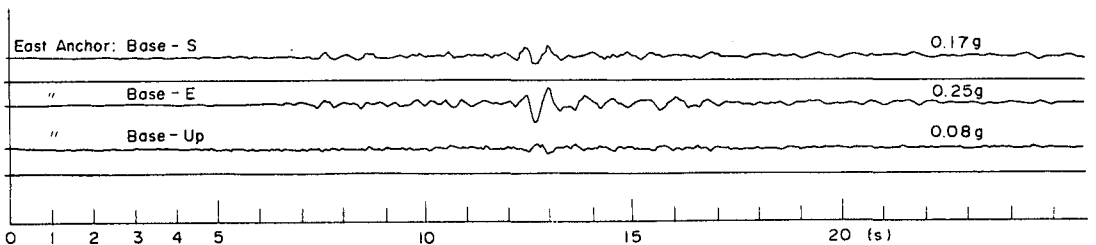


図6.3 ロサンゼルス港における強震記録 (CDMGによる)

ティアナローズ地震 (Whittier Narrows Earthquake) などが近隣で発生しているが、いずれの地震においても、地震被害は発生しなかった。

ノースリッジ地震においては、同図に示す APL (American President Line) 埠頭において軽微な被害が発生した。地震加速度記録は同埠頭の約 1 km 南に位置するヴィンセントトーマス橋 (Vincent Thomas bridge) において記録されている。同吊橋の東岸のアンカーにおける加速度は図 6.3 に示すとおりであり、その最大値は南北、東西、上下それぞれ 0.17, 0.25 および 0.08 g となっている¹⁾。

被害を受けた APL 埠頭の平面図を図 6.4 に示す。同図に示す旧海岸線より前面は、埋立により造成されたもので、この部分で液状化の発生が見られた。その結果、B126 (New) 岸壁の背後で直径 30 m 程度の範囲にわたり噴砂が舗装面上に堆積した。ロサンジェルス港の埋立に用いられている土の粒度を図 6.5 に、また、その液状化抵抗を図 6.6 に示す¹⁾。

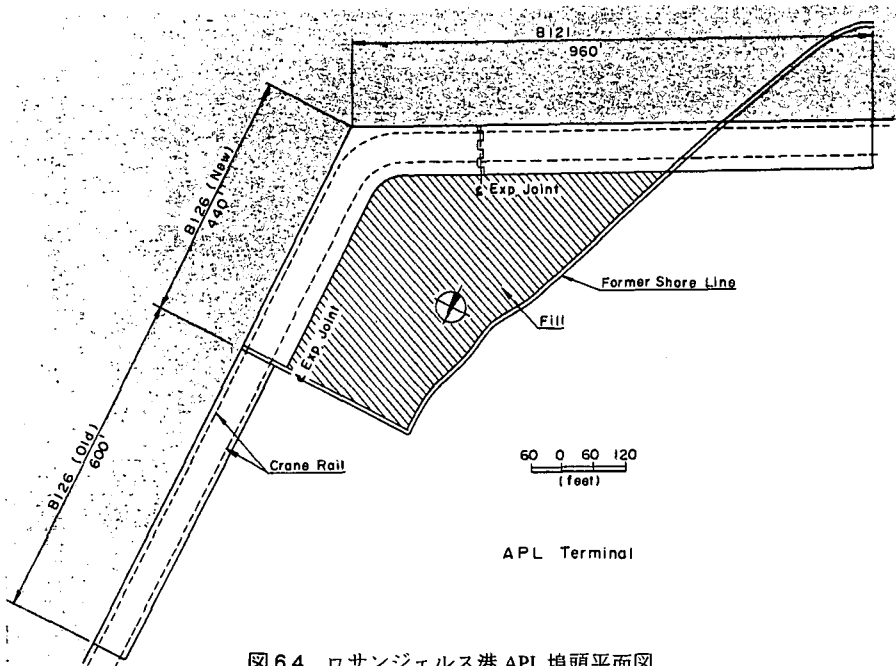


図 6.4 ロサンジェルス港 APL 埠頭平面図

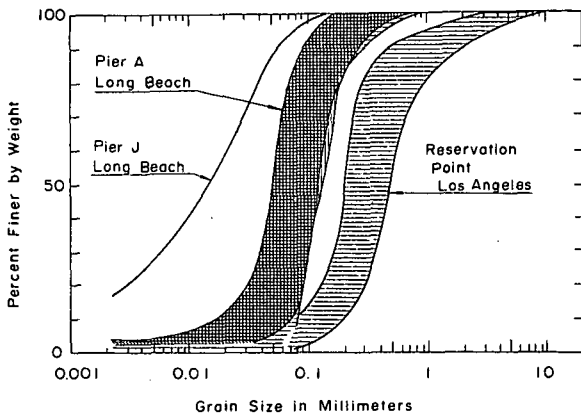


図 6.5 ロサンジェルス港・ロングビーチ港の土の粒度

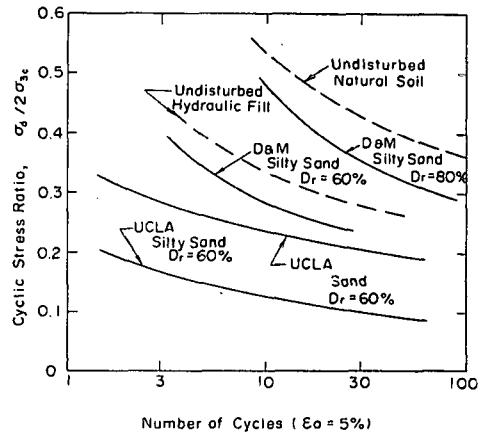


図 6.6 ロサンジェルス港・ロングビーチ港の砂の液状化抵抗¹⁾

APL埠頭のB126 (Old) 部分の岸壁は、図 6.7 に示すように原地盤に腹付けする形でマウンドを形成し、その前面に斜杭と直杭の組み合わせによる横棧橋を張り出すタイプとなっている。杭としては、正八角形断面、46 cm (18 inch) のプレストレストコンクリートが用いられている。この構造は、ロサンジェルス港で1960年代に建設された多くの岸壁に共通している。なお、B126 (Old) 部分については、これに続くB126 (New) およびB121部分が1982年に建設された際に、その耐震性の再評価が行われ、同図および図 6.8 に示すようなデッドマンアンカーを用いた補強が1987年になされている。

B121 および B126 (New) の部分の岸壁の構造は、図 6.9 に示すように大断面の捨石堤の前面に直杭式の横棧橋を張り出すタイプとなっている。直杭には、正八角形断面、直径 61 cm (24 inch) のプレストレストコンクリートが用いられている。この構造は、ロサンジェルス港で1980年代に建設された多くの岸壁に共通しており、既往の地震被災事例で斜杭の被害が著しかったことから、それまでの斜杭を用いる設計を見直して、直杭のみの設計としている。

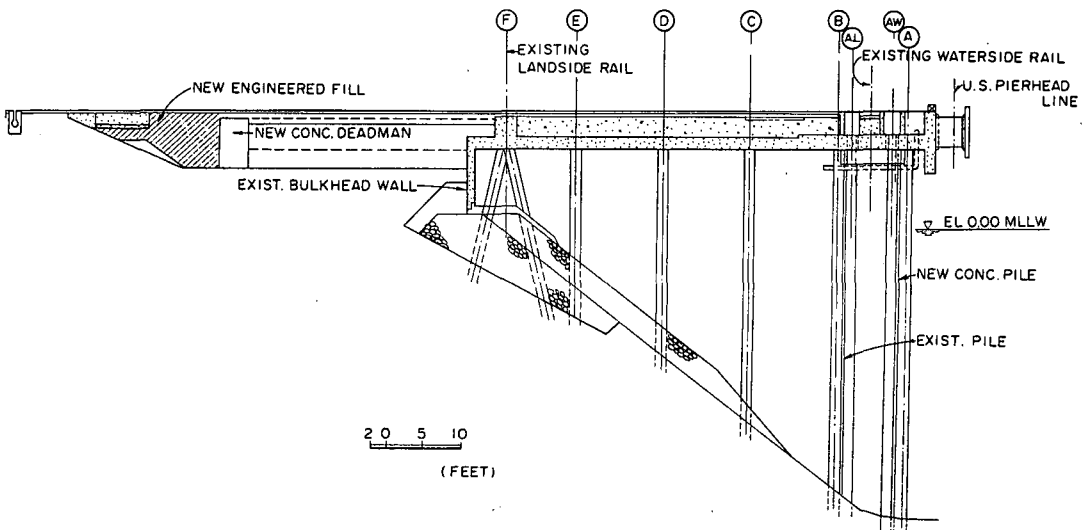


図 6.7 ロサンジェルス港 B126 (Old) 岸壁の断面図

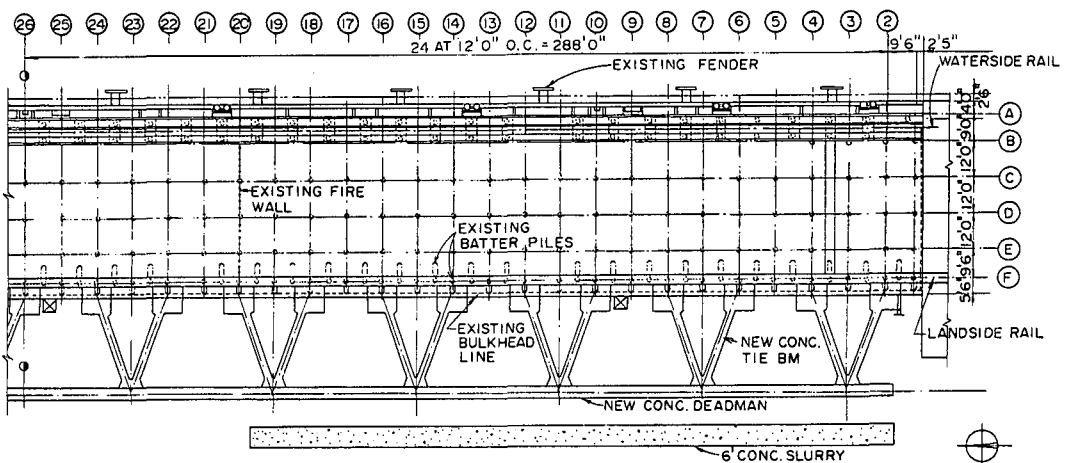


図 6.8 ロサンジェルス港 B126 (Old) 岸壁の平面図

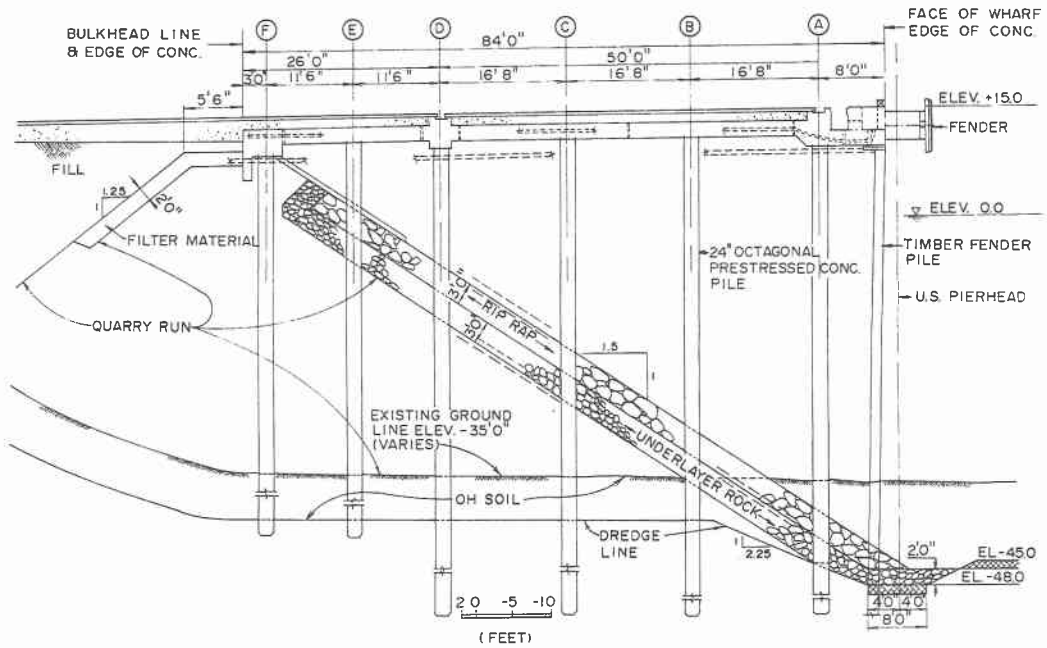


図 6.9 ロサンジェルス港 B126 (New) および B121 岸壁の断面図

ロサンジェルス港における棧橋の設計では、1980年代のものについては、設計震度として水平方向0.12，同直交方向に0.04を同時に加えることとしている。また、最新の設計においては、レベル1（機能維持状態）の地震として設計震度0.25を、また、レベル2（崩壊防止）の地震として設計震度0.45を用いているとのことであるが、これらの条件を用いて設計された最新の岸壁の構造断面などのデータは入手できていない。

ノースリッジ地震においては、APL埠頭の埋立部分で発生した液状化の影響により B126 (New) 部分と B126 (Old) 部分の境界にあるエキスパンションジョイントにおいて、B126 (New) 部分が B126 (Old) 部分に対して相対的に 8 cm (3 inch) 海側に変位した。写真 6.1 はその状況を B126 (New) 側から眺めたものである。なお、変位した岸壁法線の右側に、防弦材に接するように黒い壁状に写っている物体は、写真撮影時に着岸していた船舶の一部である。エキスパンションジョイントをはさんで発生したこのような岸壁の変位により、コンテナクレーンの走行用レールが被害を受けた。また、海側への同程度の変位が B121 の部分においても発生した模様である。これらの変位に対応して、最も陸側に位置するコンクリート杭上部には、曲げによると見られるヘアークラックが発生した。

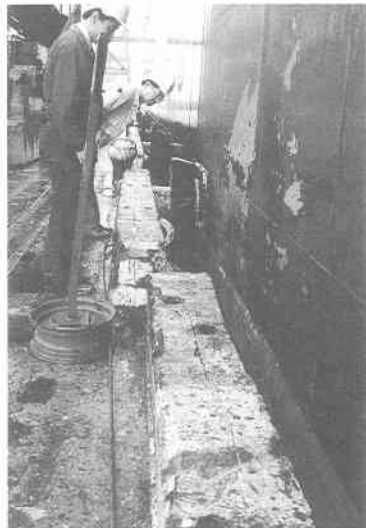


写真 6.1 ロサンジェルス港 B126 (New) と B126 (Old) 岸壁の境界の法線のずれ

また、B126 (New) 部分に比べれば変位が小さいと見られる B126 (Old) の部分でも、斜杭の上部

にクラックが発生した。クラック発生割合は陸側の斜杭 15%、海側の斜杭 20%程度となっており、そのほとんどはヘアークラックであったが、最大のクラックは幅 3 mm (1/8 inch) あった。

B126 (Old) に続く B127 岸壁は、その基本構造は B126 (Old) と同様であるが、補強はなされていず、一部には、図 6.10 に示すように、マウンドが埋立材に上乘せされるタイプとなっているものがあった。このためか、2本の斜杭では、その上部が図 6.11 に示すように、コンクリートの床版から引き抜かれる被害を受けたと報告されている。また、エキスパンションジョイント近くの 8~10本の斜杭の上部には、クラックなどの被害が発生した。写真 6.2 はその一例である。エキスパンションジョイ

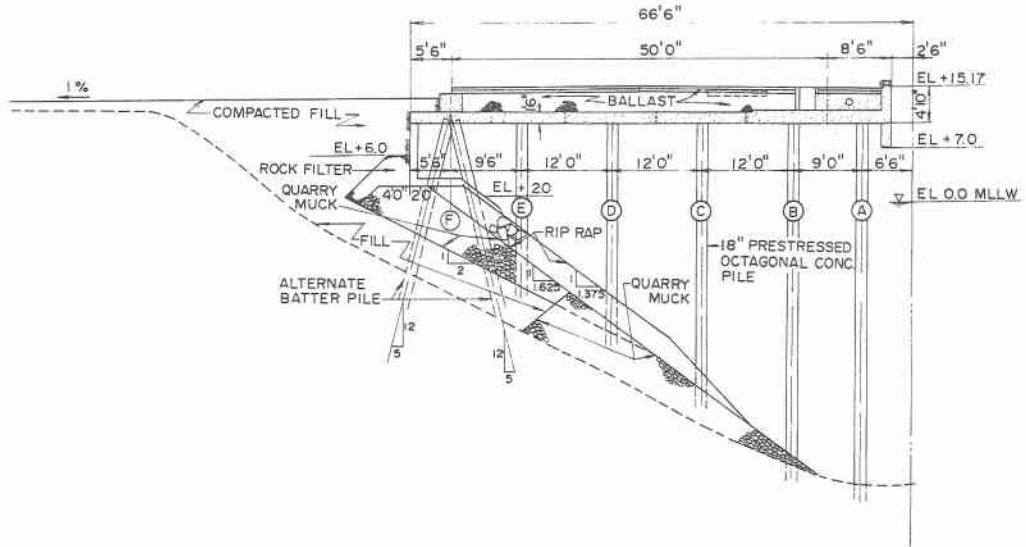


図 6.10 ロサンジェルス港 B127 岸壁の断面図

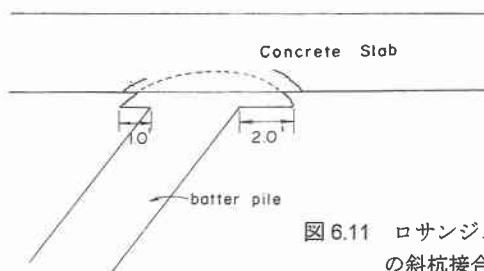


図 6.11 ロサンジェルス港・B127 岸壁の斜杭接合部の被害の概念図

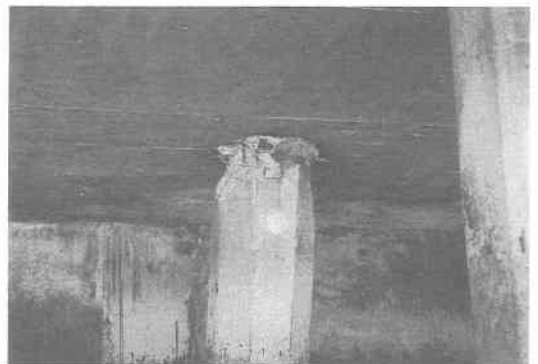


写真 6.2 ロサンジェルス港 B127 岸壁の斜杭の被害状況

ントには、幅 30 cm (12 inch) のシアーキー (shear key) が設けられていたが、これらにも被害が発生した。

6.3 ロングビーチ港 (Long Beach Port) の被害

ロサンジェルス港に隣接するロングビーチ港では、図 6.1 にも示されるとおり、地震による加速度がロサンジェルス港に比べて小さかったこともあり、構造的な被害は全く発生しなかった。なお、観光用の係留船として利用されているクイーンメリー客船 (Queen Mary) の乗船用の連絡人道橋の一部に軽微な損傷が発生したと報告されている。

さきに述べたとおり、ロサンジェルス港では、既往の地震被災事例を踏まえて、斜杭を廃し、直杭棧橋としての構造を積極的に採用する方針に転換されているのに対して、ロングビーチ港では、地盤と杭の相互作用などの検討²⁾に基づき、斜杭の働きを積極的に評価しようとする設計を行っており、両港における設計方針の対照が興味深い。もちろん、ロングビーチ港による検討においても、斜杭に著しい応力集中が発生することは認められているが、この問題に対処するために、構造的ヒューズ (Structural Fuse) とよばれるからくりを設けて、レベル 2 (崩壊防止) の地震における靱性を高める方策を施している。ここに、構造ヒューズとは、図 6.12 に示すとおり、斜杭上部を直接棧橋の床板に結合する代わりに、鉄骨部材を介して結合したものである。これにより、鉄骨部材の降伏強度を越えるような大きな外力が斜杭頭部に作用した場合には、鉄骨部材のねじれによる大きな変形吸収能力が発揮される構造となっている。なお、ロングビーチ港における想定地震としては、1933 年のロングビーチ地震の震源に相当するニューポート・イングルウッド断層 (Newport-Inglewood Fault) 沿いのマグニチュード 7.0 クラスの地震、およびサンアンドレアス断層 (San Andreas Fault) 沿いのマグニチュード 8.0 クラスの地震である。

ロングビーチ港における岸壁以外の構造物の被害としては、港湾局庁舎の漆喰のクラック、鉄道のレールの破損、セメントサイロ (高さ約 50 m) に取り付けられているコンベヤの取付け部の被害などの軽微な被害が挙げられる。なお、鉄道のレールの破損は常時でもしばしば発生しているとのことである。

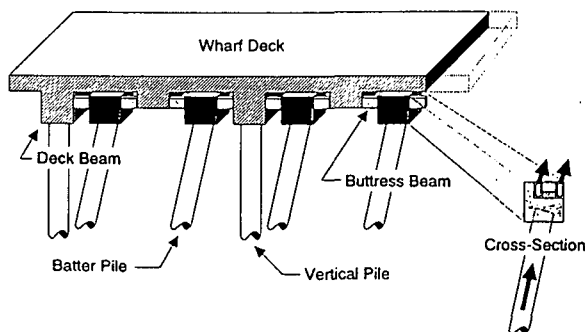


図 6.12 ロングビーチ港 J 岸壁の構造ヒューズの概念図

6.4 レドンドビーチ (Redondo Beach) の被害

レドンドビーチでは、図 6.13 に示す突堤および人工海浜の一部で液状化が発生した。突堤の砂は、細砂～中砂、人工海浜の砂は、中砂～粗砂と見られる。突堤は、長さ約 300 m、幅約 45 m にわたって埋立により建設されており、その中央部約 90 m が写真 6.3 に示すように液状化し、この区間の南側コンクリート製の護岸（深さ約 1.5 m）が、写真 6.4 に示すように、最大 3.0 m 程度海側にはらみ出した。被害状況から判断して、護岸の基礎地盤に相当する海底地盤も液状化した可能性が高い。

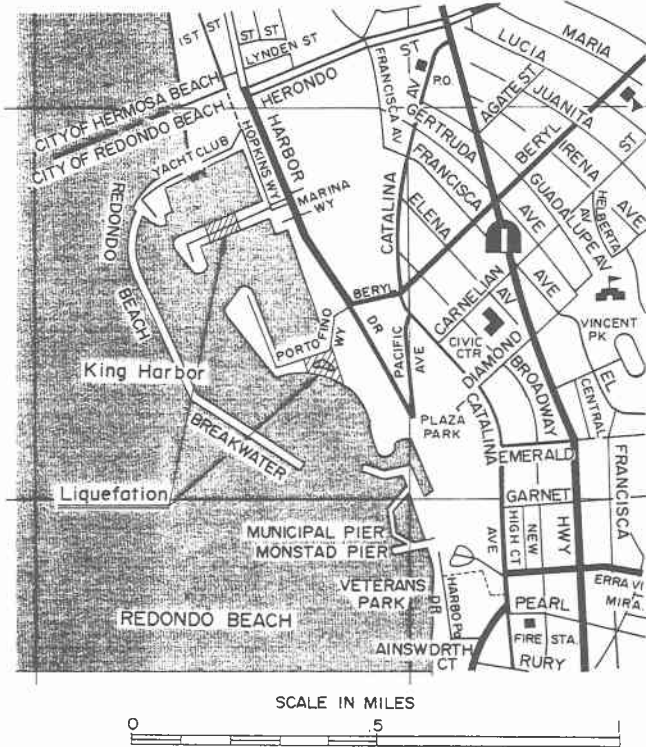


図 6.13 レドンドビーチ平面図



写真 6.4 レドンドビーチの護岸の海側への変位状況



写真 6.3 レドンドビーチのマンホールの浮き上がり



写真 6.5 ハーモサビーチの突堤式栈橋

レドンドビーチから2 km 程度北に位置するハーモサビーチ (Hermosa Beach) には、写真 6.5 に示すように海岸から沖合いに向かって建設された長さ約 500 m 程度の突堤式の栈橋があるが、これには被害が発生していない。同栈橋は、直杭と斜杭で支持される構造であり、杭はプレストレストコンクリート製のものと見られる。

6.5 サンタモニカビーチ (Santa Monica Beach) の被害

震源から南へ約 20 km に位置するサンタモニカビーチでは、図 6.1 に示すように 0.93 g もの最大加速度が記録されているが、写真 6.6 に示すように海岸から沖合いに向かって建設された長さ約 500 m 程度の突堤式の栈橋には被害が発生していない。同栈橋は、直杭および斜杭により支持された構造のものであり、杭は主にプレストレストコンクリート製のものと見られる。なお、この栈橋の陸側取付け付近の駐車場においては液状化が発生し、被害を受けた。この被害については、第 4 章において記述している。

なお、はじめに触れたとおり、サンタモニカビーチから約 5 km にあるマリナーデルレイ (Marina del Rey) では、マリナー関連の種々の施設があるが、被害は発生していない。



写真 6.6 サンタモニカビーチの突堤式栈橋

6.6 空港の被害

先に触れたとおり、ロサンジェルス近郊には、ロサンジェルス国際空港 (Los Angeles International Airport) をはじめとして、バンナイズ空港 (Van Nuys Airport)、バーバンク空港 (Burbank Airport) の 3 つの空港がある。このうち、バンナイズ空港は、今回の地震の震源域内に位置しており、著しい地震動を受けたものと思われるが、管制塔のガラスが一枚割れたこと、また、空港関連建築物内部の非構造施設に被害が発生したにとどまり、空港滑走路などの空港土木施設には被害がなかった。なお、同空港の中央部は、滑走路の下をくぐる形で、写真 6.7 に示すようなトンネルが設けられている。トンネルの内部は写真 6.8 に示すようにタイル貼りの仕上げとなっているが、クラック一つ発生していない状況であった。なお、さきに触れた空港関連建築物内部の非構造施設の被害金額は 100 万ドルに



写真 6.7 バンナイズ空港滑走路の下を走るトンネルの外景



写真 6.8 バンナイズ空港滑走路の下を走るトンネルの内景

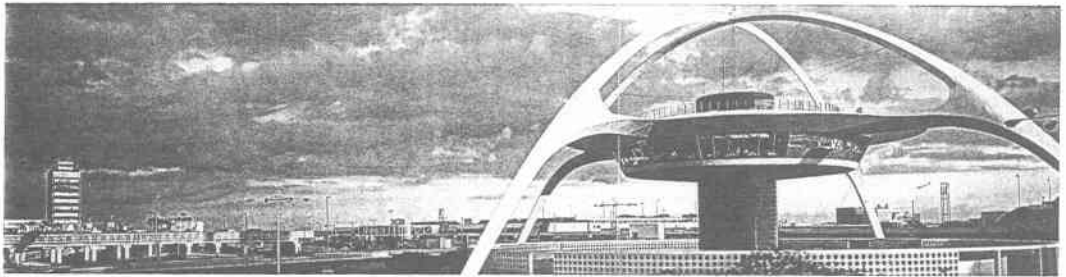


写真 6.9 ロサンジェルス空港のモニュメント状の建造物

達した。

また、バンナイズ空港から西に約 6 km 程度の地点にバーバンク空港があるが、この空港でも被害は発生していないと報告されている。

震央から約 30 km 南に位置するロサンジェルス国際空港でも滑走路などの空港土木施設には被害は全く発生していない。ロサンジェルス空港の地盤は、粒度のよい砂（均等係数の大きい砂）およびシルト質砂により構成されている。同空港は海岸線に近い位置にはあるが、標高が高いため、地下水位は地表から深さ 30 m となっている。同空港では、地震発生後、北側滑走路関連施設はそのまま供用を続けたが、南側滑走路関連施設については被害の有無の確認のため一時閉鎖し、滑走路の下を横断する形でトンネルが設けられている部分を中心として滑走路などの空港施設の点検を行った。しかし、地震発生後 2~3 時間後には被害が全くないことが明らかとなり、同空港は平常どおり全面稼働状態に戻った。また、地震後 30 分間停電となったため、非常用発電装置を起動して対応した。この発電装置は、ディーゼル油により 24 時間稼働可能とのことである。非構造施設の被害としては、ターミナルビル内における給水パイプの一部に被害が発生し、天井から漏水が発生したことが挙げられる。このため、7 万 5 000 ドルの被害を受けている。

ロサンジェルス空港には、空港関連施設として、写真 6.9 に示すようなモニュメント状の構造物や種々のパーキング用の建造物があるが、1989 年ロマプリエタ地震（Loma Prieta earthquake）後に空港関連施設の耐震性を一斉チェックした結果、パーキング用のビルのうちのひとつ（Parking 6）が耐震性

上問題があることが判明し、今回のノースリッジ地震前に取り壊されており、今回の地震では事なきを得ている。また、残りの7つのパーキング用のビルでは、せん断壁 (Shear Wall) などによる補強が加えられている。なお、ロサンジェルス空港における想定地震は、ロングビーチ港の15 km 西方から北方へ走るニューポート・イングルウッド断層 (Newport-Inglewood Fault) で発生するマグニチュード7.0クラスの地震となっている。

謝辞

今回の港湾・空港施設関連の調査にあたり、以下の方々には、多大なご協力を頂きました。ここに記して、衷心より謝意を表します。

Port of Los Angeles

Dick Wittkop

Max Weismair

Linden T. Nishinaga

Port of Long Beach

Robert R. Riffenburgh

Hendry F. Fong

City of Los Angeles Department of Airports

Robert H. Millard

California Institute of Technology

R. F. Scott

Andrew Gibson

参考文献

- 1) Pyke, R.M., Knuppel, L.A. and Lee, K.L. (1978) : "Liquefaction potential of hydraulic fills," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.104, GT11, pp.1335-1354
- 2) Roth, W.H., Fong, H. and de Rubertis, C. (1992) : "Batter Piles and the Seismic Performance of Pile-Supported Wharves," Ports '92, Proceedings of Conference, WW Div. ASCE, Seattle, pp.336-349