

1999年台湾・集集地震における電力施設の被害について

1. はじめに
2. 台中火力発電所の被害
3. 変電施設・送電鉄塔の被害
4. おわりに

鈴木浩平*

要 約

1999年9月21日に台湾中部で発生した集集地震は、すでに報じられているように各地で甚大な被害をもたらした。著者は、日本機械学会の被害調査団の一員として主として産業施設、工場等の被害実態を調べるため、10月9日から3日間震災地を訪問した。

本報告は、その中で最も詳細な調査を行なうことができた電力施設の被害状況について述べている。特に台中県にある台中火力発電所は、大きな被害を受けた。被害は大型のボイラー構造物と関連設備に集中し、ボイラーの支持構造部材、配管系、さらにはハンガやダンパ等に集中した。このボイラー構造物の被害と復旧について、詳しく報告する。

さらに、変電施設や送電鉄塔の被害についても概要を述べている。

1. はじめに

1999年9月21日午前1時47分(台湾時間)に台湾中部の南投県集集付近を震源として発生した地震は、集集(チーチー)地震と呼ばれ各地に大被害を引き起こした。10月27日に行政院が発表した統計によると、死者は2,396人、行方不明は78人、全壊建物が46,016棟、半壊建物が33,452棟、であり、直接被害の資産損失は2,822億元(日本円で約1兆円)になり、これは台湾GDPの約3.3%にも相当する。

ライフライン関連では、電力施設、ガス供給施設、および水道に被害が生じた。電力施設については、発電所自体の被害は本報告で述べる台中火

力発電所を除くと全般的に軽微であった。特に原子力発電所は、それが台北北部(金山、国聖)と台湾最南端(馬鞍山)に設置されていて、震源から遠距離であったため、地震動の大きさがOBE(運転基準地震動)の半分以下であり、原子炉停止には至らなかった。しかし、震源近傍にあった中寮超高压変電所に被害が生じたため、北部の金山と国聖の原子炉3基は、外部電力喪失の状態になり自動停止したと報じられている。

一方、震源地を含む南投県は台北市や、産業都市である新竹市への電力供給源の役割を果たしており、火力発電所、変電施設、送電鉄塔などが多数損傷を受けたため、電力の供給が半減し、台湾北部では計画停電が実施され、多くの生産企業が操業停止または稼働率低減に至り、間接的被害が

* 東京都立大学大学院工学研究科

著しかった。

著者は、日本機械学会の被害調査員として、文部省の台湾地震被害調査団に加わり、電力施設や工場設備の調査を行った。本報告では、2章において最も詳しく調査を行った電力施設、特に台中火力発電所の被害状況について述べることにする。3章では、変電施設と高圧送電鉄塔の被害状況の概要についても述べているが、著者はこれらの施設・設備の被害調査を行っておらず、その内容は全面的に松田、上島らの報告書に依存していることをお断りする。

2. 台中火力発電所の被害

2. 1 概要

台中火力発電所は、図1に示すように台中市の西方約15kmにある台中湾南端の埋立地に建設され

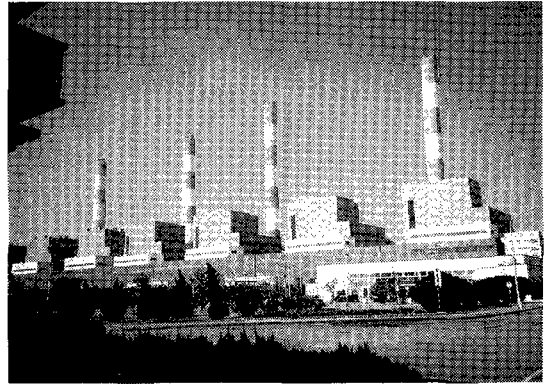


写真1 台湾電力公司・台中火力発電所

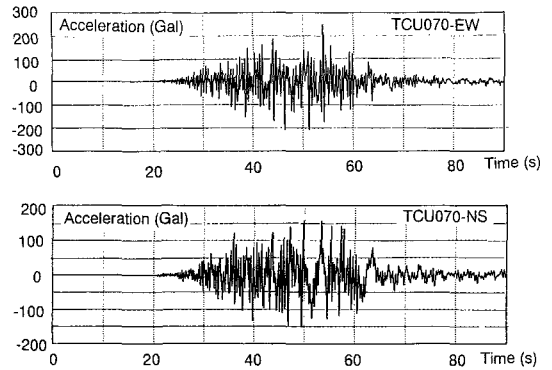


図2 龍井 (TCU070) での強震記録

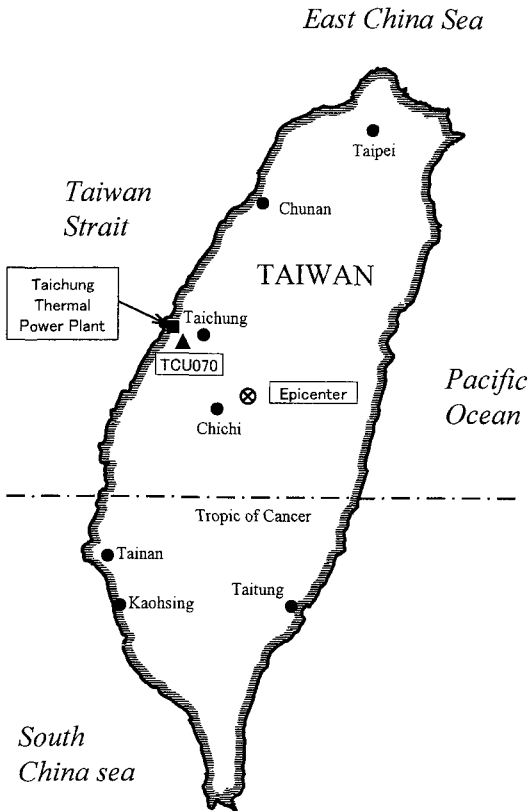


図1 台湾および震源地の近傍

ている。震央からの距離は約50km強であった。総出力470万kwのうち440万kwを8台の蒸気タービン（各出力55万kw）による石炭火力発電で供給している。総出力でいうと、日本でもこの容量の火力発電所は最大規模となる。8機の発電用ボイラーのうち、1号機から4号機はアメリカの Foster & Wheeler 社製、5号機から8号機までは同じく Babcock & Wilcox 社製であり、タービンはいずれもジェネラル・エレクトリック社 (GE社) 製であった。1号機から4号機が1991年から1993年にかけて運開された比較的新しい発電所である。写真1は発電所の全景である。近い将来、さらに9、10号機の建設を予定しているとのことである。

地震発生時の地震動の大きさは、発電所内に地震計が設置されていなかったため不明である。

図2は、発電所に最も近い龍井と言うサイト

(TCU070)での強震記録である。これを見ると、東西方向では249Galの最大値を記録しているが、他の観測点と比較するとこの記録が特異的に大きな加速度を与えていること、及び近辺の構造物や地盤の被害程度などを勘察すると、実際の最大加速度は、東西方向で約150Gal程度、南北方向で約100Gal以下と推定されている。台湾気象局の発表ではこの地域の震度は5であった。

2.2 発電用ボイラーの被害状況

本発電所において、タービン建屋や蒸気タービンに対する被害は少なくとも操業に影響のあるものは皆無であった。タービン建屋の壁面や柱などに若干の損傷（コンクリートの剥離など）が見られた程度である。

主な被害はボイラーに集中的に生じた。表1にボイラーに関する被害モードをまとめている。最も多かったのはボイラー管の引張りや曲げによる破断であった。ほとんどのボイラーで各種のボイラー管が損傷したが、特に7号機では主蒸気管の排気管や安全弁の放水管など多数の管が破断、落下した。これらの管は、多くの場合ボイラー構造物の高層部に取り付けられたものであり、高層部の地震応答がかなり大きかったことが推測される。

次に多かったのは、ダンパやハンガの破損であった。この被害は、1~4号機のFoster & Wheeler社製のボイラーに多かった。特徴的なことは、蒸気タービン室とボイラーが交差するような場所にあったダンパが多数破断しておりタービン建屋とボイラー構造の相対変位が予想以上に大きかったことが推測される。興味深いことは、ボイラー構造全体として最も被害損傷が甚大であった8号機、及び9月26日に生じた余震によって追い打ちの被害を受けた7号機ではダンパやハンガに損傷が非常に軽微であったことである。ダンパやハンガの破損が振動エネルギーの吸収・逸散に役立ち、ボイラーへのダメージの減少に役だったのかどうか検討を要する。

表1には、その他の損傷モードも記してあるが、一般的な特徴として配管やヘッダーあるいは煙突などの結合部やコーナー部へ被害が集中している

表1 ボイラーの主な被害モードと損傷件数

Failure Mode	Boiler (Number of failure)
Tensile breakage or bending of boiler tubes	#1(2), #3(2), #4(1) #5(7), #6(1), #7(28), #8(5)
Breakage of dampers or hangers	#1(4), #2(6), #3(5) #4(3), #5(1), #6(5)
Deformation of boiler support	#2(1)
Tensile breakage of pipe between tubes and header	#5(1), #8(1)
Breakage of pipe connection to boiler wall	#5(1), #8(1)
Leakage of water into lubrication oil	#5(1), #6(11), #7(1)
Opening of manhole cap which has to be closed	#5(2), #6(1), #7(1)
Breakage of connection part of exhaust stack	#7(1), #8(1)
Tensile break of tie-bar (corner-link) of boiler	#8(4)

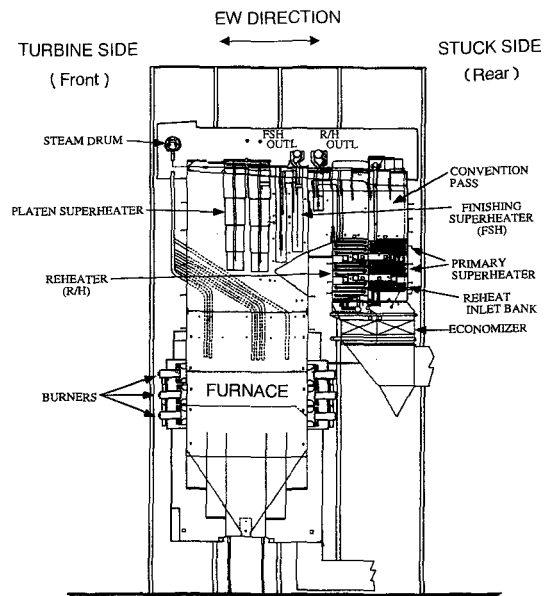


図3 ボイラー構造物の概観 (Foster & Wheeler社製)

ことが明らかであった。このことは、兵庫県南部地震でも顕著にあらわれた損傷モードであり、改めて構造物と配管や装置類、あるいはそれら相互間の結合部や連結部への耐震対策の重要性が問われているといえよう。図3は、ボイラー構造物の概要(1~4号機の型であり、5~8号機も基本的には同型)を示す。

2. 3 被害状況の詳細

(1) ボイラー本体の損傷

ボイラー本体の損傷は比較的軽微であったが、8号機においては、火炉の上層部がかなり大きな被害を受け、復旧に多大の時間を要した。具体的には地上約70m付近にあるバックスティという指示構造材（H型やロ型鋼材）が炉壁と共に外側に大きく湾曲して変形した。これにともない、バックスティのコーナー部にあるリンク型の金具が破断したり変形した。この種の損傷は8号機のみにあらわれており、地震動の直接作用によって生じたのではないとみられている。すなわち、ボイラーの燃焼がトリップした後に、炉内の圧力が減少し、その後急激な再着火が生じたり、あるいは管の損傷による水の漏洩が一種の水蒸気爆発を起こすなど、火炉圧の急上昇によるものと推定されている。い

ずれにしてもボイラー等の高温高圧構造物に特殊な被害モードとして今後研究されるべき課題であろう。写真2および写真3は、損傷したバックスティなどの鉄骨部材である。曾根・藤田の報告によると、8号機のみで14本の鉛直方向のバックスティと5本の水平方向バックスティが補修または交換されたという。写真4は変形・張り出しを生じたコーナーリンクである。

写真5は、炉内蒸気管の損傷を示す。管を束ねる溶接部が破断し、さらに軸方向に配管自体に割れが生じている。台中発電所側の説明によると、この損傷も直接地震動による作用で生じたのではなく、地震により配管内部に蓄積されていたスケール（酸化物）が剥離して落下したため、管内の圧力が急上昇して破損が生じたという。そのような現象が実際に生じるのかバックスタディが必要と思われる。



写真2 損傷部を溶接修復したバックスティ

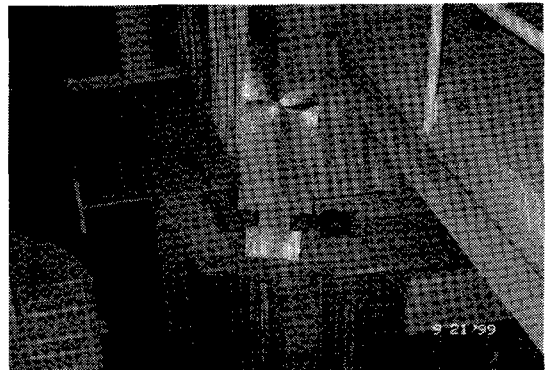


写真4 コーナーリンクの張り出し



写真3 変形・損傷したバックスティなどの支持部材（切断したもの）

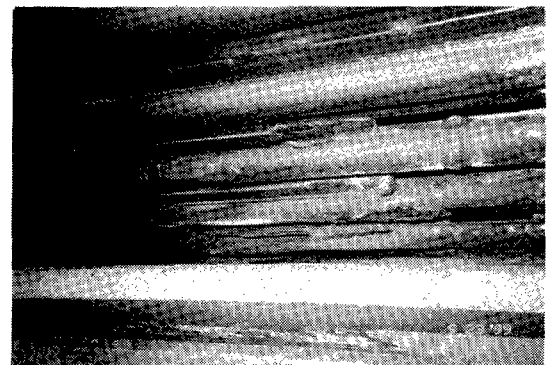


写真5 炉内蒸気管の亀裂発生

(2) 揺れ止め装置、ダンパ、ハンガーの損傷

図3をみてわかるように、ボイラーは吊り構造となっており、風や地震によって生じた水平力をボイラーに巻き付けてある支持鉄骨（バックステイ）から、揺れ止め装置（サイスマックタイなどとも言う）を介して鉄骨支持構造物に伝達する構造となっている。

日本の発電用ボイラーでは、近年、揺れ止め装置にエネルギー吸収能を持たせた制振型のものが多く採用されているが台湾ではまだ従来からのストッパ型のもが使われている。図4がその機構を示している。鉄骨より出た片持梁形式のH型钢のストッパCとDがそれぞれボイラーの左右、前後の過大な振動を拘束している。台中火力発電所では、2号機においてストッパが大きく変形した。

例えば、図4のCに相当するH形ストッパはウェブやフランジが20mmから40mm局部座屈による変形を生じた。これが設計通りの挙動であったか否かは別として、8機の中で、最も揺れ止め装置が損傷していた2号機には他の被害が少なく、このボイラーのみが即日に復旧したことは注目すべきことである。

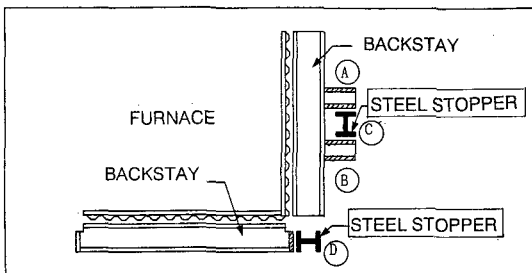


図4 揺れ止め装置（ストッパ型）



写真6 揺れ止め装置（ストッパ型）の座屈変形

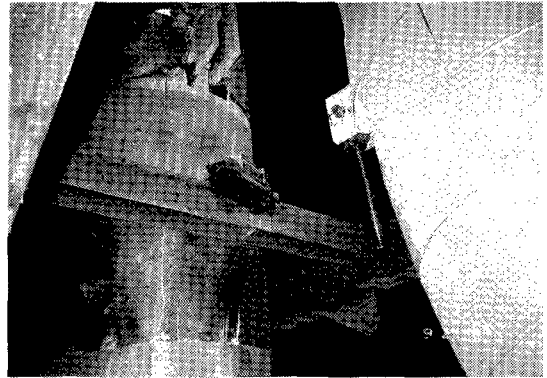


写真7 破断した配管用ダンパ

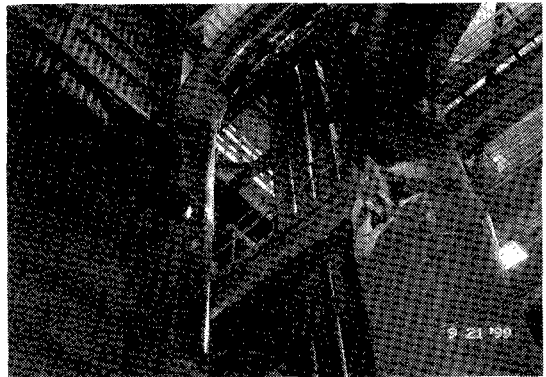


写真8 炉外蒸気管ハンガの損傷

ダンパとハンガーの損傷についても、同様のことはいえるが、すでに述べたので省略する。写真6～写真8に揺れ止め装置、ダンパ及びハンガーの被害状況を示す。

(3) 復旧の状況について

台湾の大型発電施設としては、未曾有の大被害であったにもかかわらず、発電所側のエネルギーギッシュで迅速な行動により、被災後、比較的短時間で復旧工事が進められ、発電も再開された。表2に各号機が復旧に要した時間をまとめている。

1号機から5号機の復旧工事は、主として9月21日の本震によるボイラー管の破損復旧が中心であり、ほぼ1週間以内で修復している。一方、6号機と7号機は、本震での被害が復旧した後に、9月26日に生じた余震により、再びボイラー管の破損、安全弁や、ハンガーの損傷が生じ、特に7号機では、

表2 ボイラーの発電停止期間と復旧所要時間

Unit	Duration	Total Hours
No.1	Sept.21~Sept.29	190 hrs
No.3	Sept.21~Sept.27	148 hrs
No.4	Sept.21~Sept.28	168 hrs
No.5	Sept.21~Sept.26	126 hrs
No.6	Sept.21~Sept.24 Sept.26~Sept.28	66 hrs 45 hrs
No.7	Sept.21~Sept.21 Sept.26~Oct.4	2 hrs 195 hrs
No.8	Sept.21~Oct.9	440 hrs

8日間も復旧に要した。恐らくは、本震では決定的でなかった軽微な損傷が余震により拡大し、被害を深刻にしたものと考えられ、余震対策も今後十分注意すべきであるとの教訓を新たにした。

8号機の補修が最も時間を要したのは、先に述べたバックステイの交換と補修の工事に手間取ったためである。吊り下げ構造という特殊な構造様式を有し、配管や各種の機器が複合して構成されているボイラー構造物が完成した後に、特定の構造部のみを補修したり、交換工事をするのは予想以上に難しい作業であり、原子力発電所、化学プラント等の大型施設の震災後復旧技術の重要性を示唆しているともいえよう。

3. 変電施設・送電鉄塔の被害

3. 1 中寮変電施設の被害

南投県中寮郷にある中寮変電施設は、震源地集集の北方約7kmの地にあり、大きな被害にあった。この施設は台湾北部の産業発展に極めて重要な役割を果たしており、約400万kwの電力を、台中北部の新竹等の工業地域に供給している。

変電施設のある地域は、2段の切土からなっていたが全体的に地盤が南側に移動したようであり、亀裂や沈下が認められたという。変電機器の被害も多かった。台湾電力会社が10月8日に発表した被害報告によると、油漏れやブッシング破損等による変圧器の被害が34器、避雷器の被害が41器、ガ

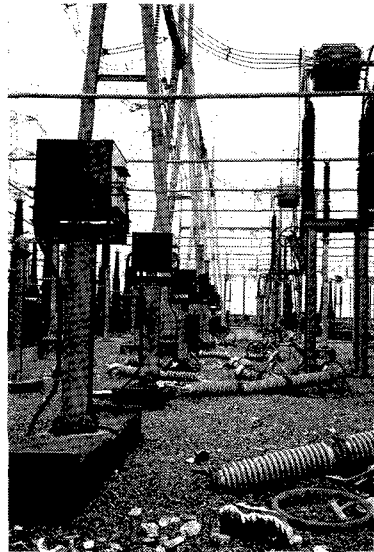


写真9 遮断機の碍子の折損と落下 (岩橋教授提供)

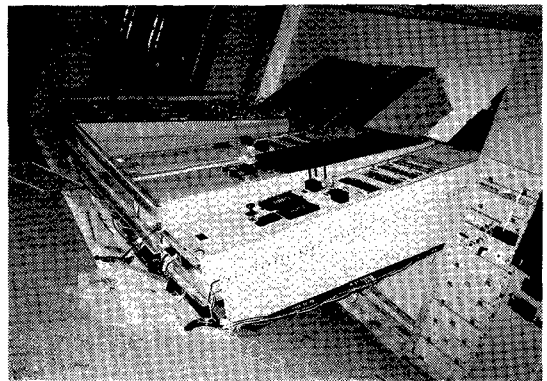


写真10 制御盤の転倒 (岩橋教授提供)

ス遮断器やスイッチングヤードの遮断機碍子の被害はかなり多数みられたとのことであった。写真9は、遮断機の碍子の破損を、写真10は制御盤の転倒を示している。台湾では、変電所の機器に関しては基礎は0.15~0.3gの震度法による耐震設計はなされているが、機器類に対する耐震設計基準は確立されていないという報告がある。日本においては、変電機器に対して地表面で0.3gの共振正弦波、基礎に対しても0.3gの共振正弦波3波による応答倍率を想定した耐震基準が義務づけられている。さらに、ブッシングに対しては、0.5gの共振正弦波5波による厳しい動設計が課されている。

兵庫県南部地震では、上記の厳しい設計基準にも

かわらず変電機器に多数の被害が生じた。これらの機器に対する耐震・制振技術のさらなる発展が望まれる。さらに地震による機器の転倒防止や油漏れ対策は特に重要と考えられる。

3. 2 送電鉄塔の被害

台湾では北部に工業生産地域を抱えていることもあり、2系統の高圧送電幹線が南北を縦断している。これらの系統は共に震源となった断層と平行して走っていたので、震源近傍の多くの被害が生じた。地滑りが原因と考えられる鉄塔の倒壊が10基以上あったのを始め、鉄塔の傾斜や変形、鉄塔基礎の損傷が非常に多かった。表3は、10月8日現在の台湾電力会社が発表した高圧送電鉄塔の被害状況である。

送電鉄塔の設計・建設に当たっては、日本以上に台湾では台風による風荷重に対する耐力を最も重視している。従来、鉄塔の各部構造の強度はほとんど風荷重で決定され、地震荷重に対しては十分余裕があるとされている。

今回の被害状況について詳しい情報を得て、今後、送電鉄塔の耐震設計法に新たな検討を行うべきかどうかの判断をすべきであろう。

表3 高圧送電鉄塔の損害状況

Collapse	inclination	deformation of structure	failure of foundation	slide of foundation	total number of failed tower
13	29	67	488	25	622

4. おわりに

1999年9月21日に生じた台湾・集集地震による発電施設及び関連設備の被害状況を概説し、今後の教訓などについて述べてみた。

1995年1月に生じた兵庫県南部地震においても、関西電力の火力発電所及び変電機器などが大きな損害を受けた。このことについてはすでに詳細な報告書等が発表されている。しかしながら、被害調査によって明らかにされた地震防災対策の重要性は、経済的状況の悪化もあり、必ずしもその後十分に実現されている訳ではない。今回の集集地震の被害状況からの教訓を含めて、さらに研究・検討を進める必要があると思われる。何故なら、電力やガス、さらには水道等のライフライン系の耐震性確保は都市防災技術の根幹にかかわる極めて重要な課題であるのだから。

謝 辞

終わりに、本調査の共同作業をして下さった東京電機大学の藤田 聡、京都工芸繊維大学の曾根 彰の両教授、視察の際に最大限の協力を頂いた台中火力発電所の許金和所長をはじめとする台湾電力会社の関係スタッフに厚くお礼申し上げます。また、本学の岩楯敏広教授には写真等の提供を頂き、感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 曾根 彰・藤田 聡「1999年台湾集集地震による電力施設・工場の被害調査報告」、『日本機械学会誌』 Vol. 103, No.977, p.246-249, 2000.
- 松田 泰治・上島 照幸・豊田 幸宏「6.ライフラインの被害」、『台湾921集集地震調査速報会報告書』p.6. 1-6.3, 1999.
- 財団法人電設備技術検査協会『電力施設地震対策調査に関する調査報告書』p.9-27, 2000.
- 日本機械学会『阪神・淡路大震災調査報告・機械編・機械設備の被害』p.191-206, 1996.
- Japan Society of Civil Engineers, *The 1999 Ji-Ji Earthquake, Taiwan - Investigation into Damage to Civil Structures*-, p.7.1-7.28, 1999.

Key Words (キー・ワード)

Taiwan Chi-Chi Earthquake (台湾集集地震), Thermal Power Station (火力発電所), Boiler Structure (ボイラー構造物), Earthquake Damage (地震被害)

Report on Damage and Failure of Power Supply Facilities due to the 1999 Chi-Chi Earthquake in Taiwan

Kohei Suzuki*

*Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan University
Comprehensive Urban Studies, No.72, 2000, pp.135- 142

As a member of Seismic Damage Examination Group from the Japan Society of Mechanical Engineers, the author visited Taiwan during 9 through 12, October 1999. Chi-Chi Earthquake which occurred on 21 September attacked various kinds of structures including those related to industrial facilities. Particularly, Taichung Power Station located in western coast of Taichung city got severe damages due to this earthquake.

In the boiler plant at this power station, several supporting structures and devices such as hangers and dampers have broken or severely failed. Also, some kinds of pipings in the boiler furnace got tensile breakage not because of direct seismic force but because of excess pressure increase induced by earthquake motion.

Significant damages were also observed on transformers and power cable towers located near the epicentral area.

Finally, the author picked up typical examples of damaged structures and equipments and provided some technical comments for the future seismic design and technology related to those structures.