

土 木 研 究 所 資 料

中国の地すべり現地調査報告書 (主に黄土地帯の地すべりについて)

平成4年1月

建設省土木研究所
砂防部地すべり研究室

Copyright © (1992) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

中国の地すべり現地調査報告書 (主に黄土地帯の地すべりについて)

地すべり研究室 室 長 吉松弘行
新潟試験所 所 長 綱木亮介
地すべり研究室 主任研究員 近藤観慈
同 部外研究員 山田琢哉*

*現 復建調査設計株式会社

要 旨

本報告は、中華人民共和国（以下中国と称す）の自然条件（地形、地質、気候）と黄土の概要を紹介するとともに、現地調査をはじめとする諸調査、現地で得た資料に基づき、中国の西北地域に分布する黄土の地すべりを中心とした地すべりの概要及び中国で実施されている対策工についてとりまとめたものである。

キーワード：地すべり，中国，中華人民共和国，黄土，移動土塊，到達範囲，対策工

ま え が き

地すべりの誘因として一般には豪雨・長雨や融雪による間隙水圧の上昇が多くを占めている。しかしながら一方で地震を誘因とする地すべりも人命や資産に多大な損失を与えてきている。この種の地すべりは急激に崩壊・滑落するケースが多く、したがって移動土塊は極めて広い範囲に拡散し易い。この特徴が地震に起因する地すべりによる被害を非常に大きくしているひとつの要因となっている。

我が国では、たとえば長野県西部地震に伴って発生した幾つかの地すべりが記憶に新しいが、世界的な視野でみると、多くの国々でこの種の地すべり災害に悩まされていることがわかる。そのため、ハードな対策のみならず、地すべりの危険箇所や危険範囲を設定して災害に備えるといったソフト対策の技術を向上させることが緊急の課題となっている。

このような背景から、砂防部地すべり研究室では地すべりの移動土塊が到達・拡散する範囲を推定するための手法についての検討を進めてきた。そして、日本国内の多くの地すべり事例について調査・解析を実施してきている。しかしながら、海外には我が国の事例と比較して驚くほどの大規模（幅・長さとも km オーダー）な地すべりの発生していることが多数報告されている。地すべりの移動土塊の到達範囲を検討する過程で、このような大規模な地すべりの事例を詳細に調査することは必要不可欠であるものと考えられた。

そこで、地震や降雨に起因して発生した数多くの地すべりが分布している中国の鉄道部と共同研究を実施した。この中では、特に、我が国の事例とは地質・土質条件のまったく異なる黄土地帯に分布する大規模な地すべりをとりあげ、それらを中心として調査を実施した。これは、黄土地帯は一般に乾燥気候であるため、非常に古い地すべりの痕跡も比較的新鮮なまま残存していることと、地質・土質条件が地すべり移動土塊の到達範囲に及ぼす影響を評価するためである。

この報告書は現地調査結果及び中国側提供資料¹⁾を中心として上記の共同研究の成果の一部をとりまとめたものである。なお、この共同研究は平成2年度科学技術庁の科学技術振興調整費を用いて実施され、現地調査は平成3年2～3月に実施されたものである。

当共同研究における中国国内の現地調査や資料の収集が非常に円滑に運んだのは、特に次に示す方々の御尽力に負うところが極めて大である。ここに記して感謝の意を表する次第である。

周 宏业：中国鉄道科学研究院副院長

丁 丕功：外事弁公室主任

黄 小銘：西北研究所所長

王 恭先：西北研究所副所長

譚 壯麗：西北研究所副所長

于 濟民：西北研究所滑坡研究室主任

徐 峻齡：西北研究所滑坡研究室副主任

廖 小平：西北研究所滑坡研究室工程師

金 波：西北研究所滑坡研究室工程師

徐 建平：西北研究所滑坡研究室工程師

楊 順煥：科学技術情報研究室通訳

さらに、筆者らが訪問する機会を与えられた中国国内の多数の機関において、現地調査や討論を通じて多くの研究者・技術者との相互交流を図ることができた。関係の方々に対して心から謝意を表すものである。

平成4年1月

地すべり研究室	室	長	吉	松	弘	行
新潟試験所	所	長	綱	木	亮	介
地すべり研究室	主任研究員		近	藤	観	慈
同	部外研究員		山	田	琢	哉

目 次

まえがき

1. 中国の自然条件の概要	1
1-1 中国の地形	1
1-2 中国の地質	1
1-3 中国の気候	4
2. 中国の地すべりの概要	6
2-1 中国の地すべり分布	6
2-2 中国の地すべりの分類と特徴	7
3. 中国の黄土地帯	9
3-1 黄土の分布	9
3-2 黄土の堆積時期	9
3-3 黄土の物質成分	10
3-4 黄土地形	10
3-5 黄土地帯の地すべりの分布と特徴	12
4. 黄土地帯の地すべりの実例	15
4-1 西吉の地すべり	15
4-2 洒勒山地すべり	25
4-3 黒方台地すべり	34
4-4 臥龍寺地すべり	37
4-5 葡萄園地すべり群1号地すべり	39
4-6 龍海鉄道K1357, K1358地すべり	43
4-7 韓城発電所地すべり	45
5. 中国の黄土地帯以外の地すべりの実例	50
5-1 獅子山地すべり	50
5-2 新灘地すべり	54
5-3 鏈子崖危険岩体	58
6. 中国における地すべり対策工	62
6-1 地すべり対策工の種類と目的	62
6-2 地すべり対策工の実例	64
7. あとがき	73
参考文献	74
参考資料集	76

1. 中国の自然条件の概要

1-1 中国の地形

中国は日本の約25倍の広大な国土(約960万km²)をもち、その7割が丘陵や、高原、山地で占められている。また、地勢は西から東に向かって階段状に下降し世界の最高峰チョモランマ(エベレスト)から海岸線までを有する変化に富んだ国土をもっている。西にある西藏(チンツァン)高原は一般に海拔高度4,000~5,000 mで面積は230万km²に達する世界最高の大高原である。

西藏高原より北方または東方に向かって、崑崙(クンルン)山-祁連(チーリエン)山-岷(ミン)山-邛崃(チュンライ)山及び横断(ホントワン)山脈沿いの3,000 mの等高線を過ぎると、一段低い地域に入る。天山(ティエンシャン)、アル泰(アルタイ)山脈等を除けば、一般に山地と高原の海拔高度はすべて3,000 m以下、多くの盆地や谷底平地の海拔高度は1,000 mにすぎず、この地域は主として広く開けた高原と大盆地によって構成されている。西藏高原以東には南から雲貴(ユンコイ)高原、四川(スーチョワン)盆地、秦嶺(チンリン)、黄土(ホワントウ)高原と内蒙古(ネイモンクー)高原がならんでおり、西藏高原以北には高大な山系につつまこまれた大盆地がある。その中には、崑崙山脈と天山山脈との間の塔里木(タリム)盆地、天山とアル泰山脈との間の准噶爾(ジュンガル)盆地が含まれる。さらに東に向かって大興安嶺(ターシンアンリン)-太行(タイハン)山-巫山(ウーシャン)-雪峰(シュエフォン)山を連ねる線をこえると、地勢の最も低い地域になる。海拔は大部分が500m以下であるが、少数の山嶺は1,000 m台に達している。広大な平野地区はすべて200 m以下である。北から南に東北平原、華北平原と長江中下流部平原がならんでいる。(現代中国地誌、古今書院²⁾による)。

表-1.1.1に、各地形の全国総面積に占める割合、海拔高度別の全国総面積に占める割合を示す。また、図-1.1.1に中国の地形図を示す。

1-2 中国の地質

中国全体の地質図としては、「中国地質図400万分の1(中国地質科学院主編, 1976)」³⁾、「中国構造体系図400万分の1(中国地質科学研究所主編, 1975)」⁴⁾がある。

中国大陸は多くの断裂帯によって、いくつかの地域ブロックに分けられ、これを「塊断構造とよぶ。断裂帯によって分けられるブロックを、断裂塊体とよび、その形成年代と変形の特徴から次の3種に分けられている。

「断塊」 震旦紀以前に形成された安定なブロックで、大陸地殻を構成し、台地の性質をもつ。

「断拗」 震旦紀以降に形成されたブロックで安定性は断塊に次ぐ。大陸地殻と過渡地殻上に発達し褶曲と変成作用は激しくない。

「断褶」 震旦紀以降に形成された変動性の強いブロックで、大洋地殻と過渡地殻の上に発達し、断層・褶曲・変成作用が激しい。

上述の3種の塊体には、先震旦紀の6断塊、震旦紀〜ヒラマヤ期の9断拗・9断褶の合わせて24個の塊体(構造区)がある。これを表-1.2.1及び図-1.2.1に示す(地球科学16・世界の地質、

表-- 1.1.1 (現代中国地誌, 古今書院²⁾による)

各地形の全国総面積に占める割合

地 形	平 原	盆 地	丘 陵	高 原	山 地
%	1 2	1 9	1 0	2 6	3 3

海拔高度別の全国総面積に占める割合

海 抜(m)	< 5 0 0	500~1,000	1,000~2,000	2,000~5,000	> 5,000
%	1 6	1 9	2 8	1 8	1 9

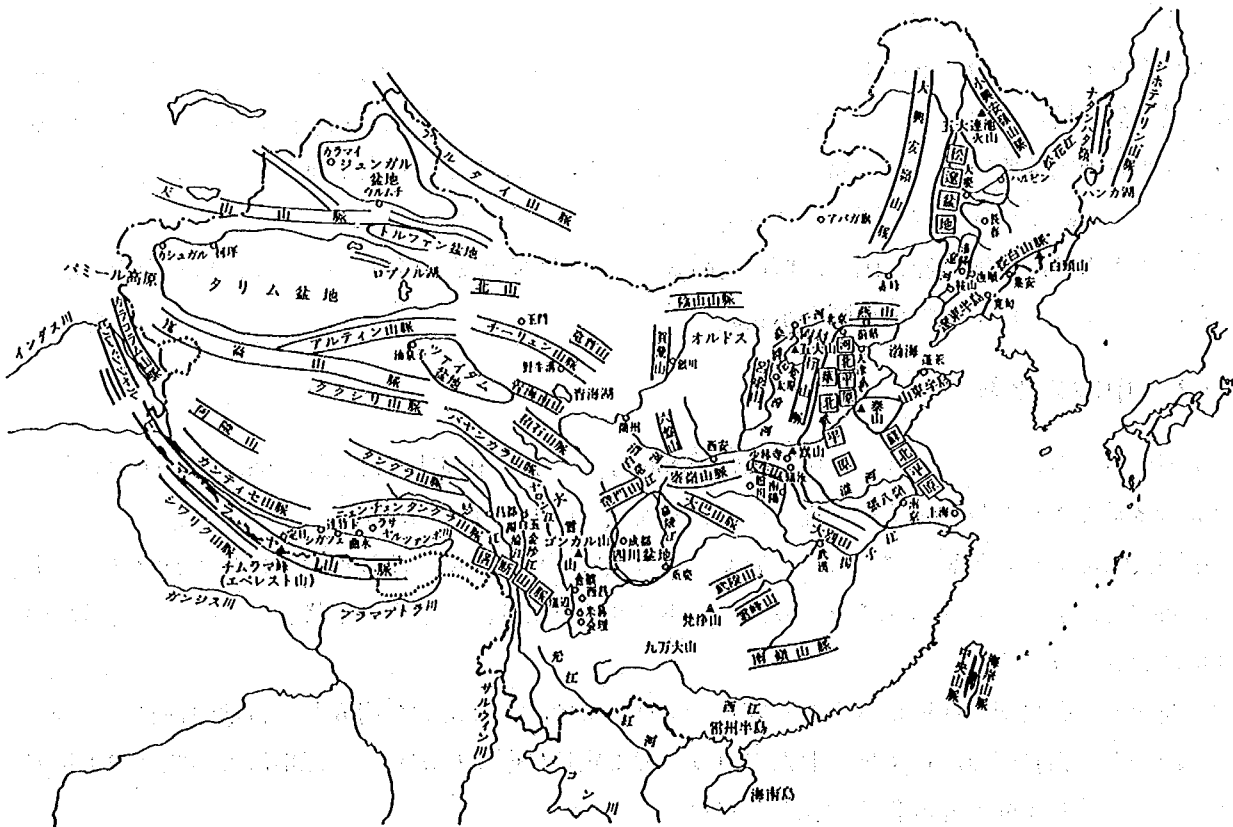


図- 1.1.1 中国の地形 (地球科学 16 - 世界の地質, 岩波書店⁵⁾による)

岩波書店⁵⁾による)。

表- 1.2.1 中国の構造期と塊体名称
(地球科学16-世界の地質, 岩波書店⁵⁾による)

地質時代	発展段階	造山期	記号	年代(億年)	塊体名称
新生代	五	新構造		0.26~現在	西域・チベット・華夏断塊区
		ヒマラヤ	H	0.26~0.65	ヒマラヤ②・台湾②断褶
中生代	四	燕山	Y	0.65~1.8	ガンガルディセ④・那丹哈達嶺④断拗
		印支	I	1.8~2.3	青康断拗④
古生代	三	パリスカン	V	2.3~4.0	アルタイ⑩・天山⑩・北山⑩・大興安嶺⑩・東泰嶺⑩断褶 吉黒⑩・羌塘⑩・閩浙⑩断拗
		カレドニア	C	4.0~5.7	西崑崙⑩・北チーリエン⑩断褶 アルティン-南チーリエン⑩・南華⑩断拗
		震旦	Z	5.7~9.5±0.5	滇西南⑦およびヒマラヤ断拗
先カンブリア時代	二	晋寧	J	9.5±0.5~13.0±0.5	揚子⑤・クリム⑥断塊
		太行	T	13.0±0.5~24	太行③・膠遼④断塊
	一	桑干	S	>24	冀魯①・オールドス②断塊

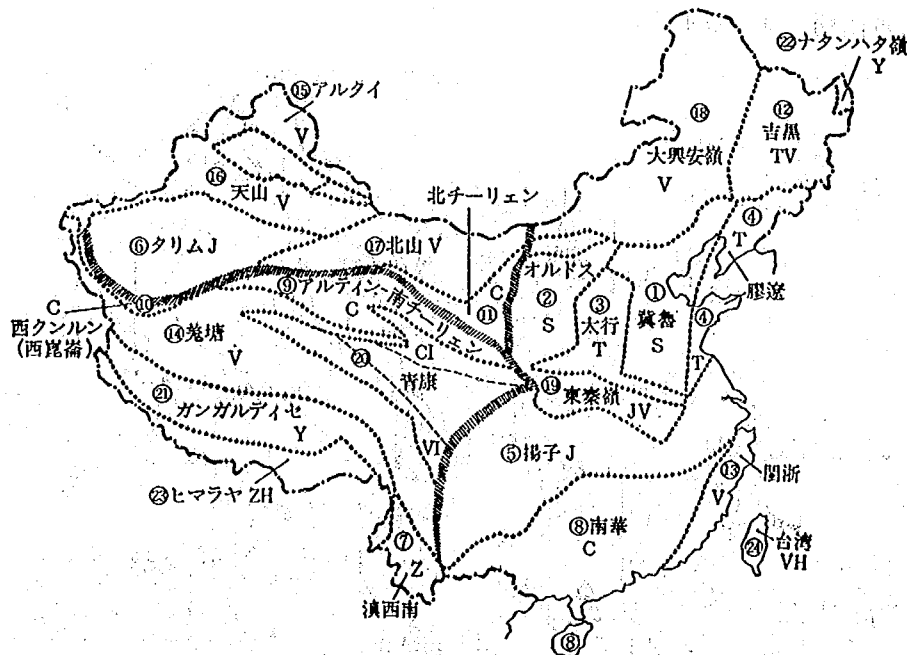


図- 1.2.1 中国の24構造区の区分
(地球科学16-世界の地質, 岩波書店⁵⁾による)

中国の国土は広大であり、先カンブリア代（24億年以上前）から現世にいたる様々な堆積岩(層)、火成岩、変成岩が分布している。今回の地すべり現地調査は主に第四紀黄土層の分布地域が対象であった。その詳細については第3章で説明する。

1-3 中国の気候

中国の気候形成の主要因には、緯度的位置、海陸の位置、地形条件、大気還流がある。中国は世界最大の大陸であるユーラシア大陸と最大の海洋である太平洋の間に位置し、インド洋にも近いいためモンスーン還流が生じ、西藏高原に遮られた西北内陸地区を除く大興安嶺－陰山－賀蘭山－バインハル山脈－ガンディセ（カイラス）山脈を連ねる線より東と南の広大な地区は、すべて夏のモンスーンの影響を受けたモンスーン気候の特徴を示している。中国の大陸性モンスーン気候の特徴を以下に示す。

- (1) 冬と夏の風向の交替が明瞭である。冬は高緯度地区から寒冷乾燥の北偏りの気流が吹く。夏は低緯度の海上から温暖湿潤の南偏の気流が吹く。
- (2) 気温の年較差が大きく、日較差も比較的大きい。冬の気温は南高北低で、夏は全体に高温で、南北の温度差は非常に小さい。
- (3) 降水量の地域的配分は非常に不均等で、年降水量は東南の沿岸部から西北の内陸部に向かって次第に減少する。東南沿岸部一帯の年降水量は 1,600 mm を越え、西北部の年降水量は一般に 200 mm 以下である。降水量の季節的配分も不均等で夏の雨量は一般に年降水量の50%以上を占める。また降水量の年次別変化も大きく、変動率は雨の多い地区で10～15%，雨の少ない地区では30%以上になる。
- (4) 高温期と多雨期とは一致する。

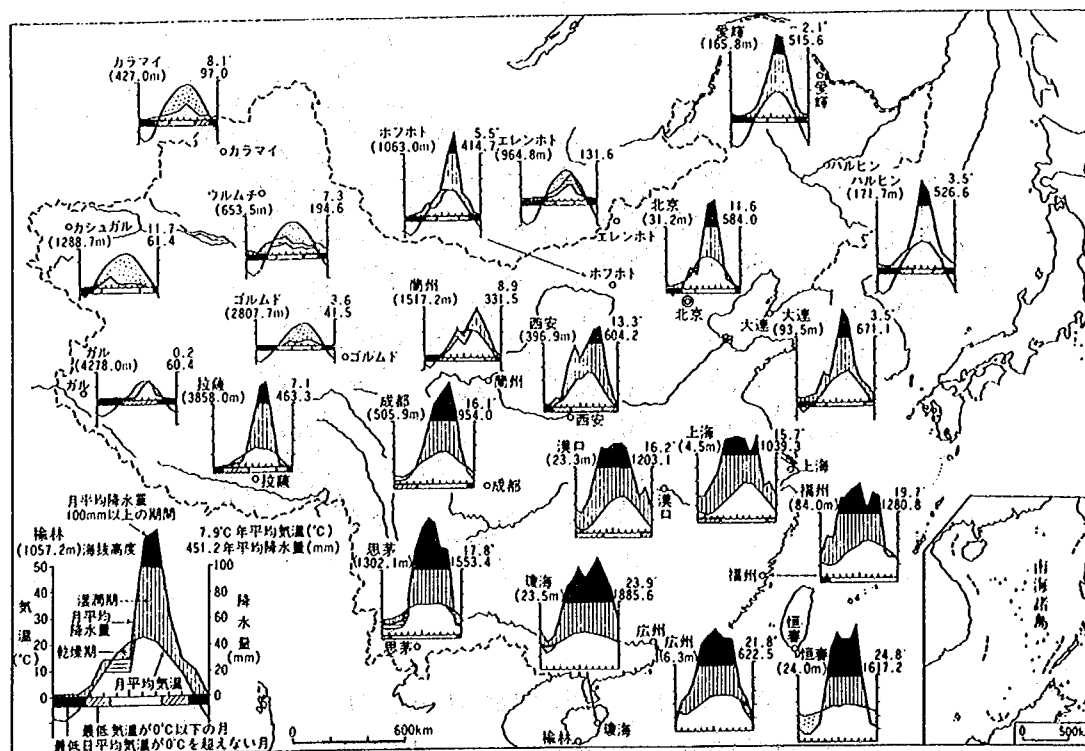


図- 1.3.1 中国の気候図（現代中国誌，古今書院による）

しかし、中国は南北の緯度差が約50度と大きく、地形も西藏高原や天山山脈、秦嶺山脈が東西方向に連なっているなど複雑であるため、気候類型は多様である。中国の気候帯は温度に応じて南から北へ、赤道帯、熱帯、亜熱帯、温暖帯、中温帯、寒温帯の六つの温度帯と西藏高原区に分られる。また、乾湿に応じた気候帯により東南から北西に向かって湿潤、半湿潤、半乾燥、乾燥の4種類の地区に分けられる(図-1.3.1)。

西藏高原は単にそれ自身が独特の高原気候を形成するだけでなく、東亜季節風の遡流に重要な作用を及ぼし、中国東部地区の干ばつや洪水、西北内陸地の乾燥等に対して非常に大きな影響を与えている。

また、地形が気流を阻む作用は、中国の気候に大きく影響を与えており、東西方向に連なる山脈は常に南北の冷氣流、暖気流の障害物となっている。中国の三列の緯線方向(東西方向)の山脈はすべて重要な気候の分界線になっており、天山山脈は中国の中温帯と暖温帯の、秦嶺山脈は暖温帯と亜熱帯の分界線になっている。また、南嶺山脈も南北の気温は同じではない。さらに、山地は暖かい湿った気流を阻むため降水量に影響を与える。天山山脈の北斜面は、大西洋からくる水蒸気をさえぎるため、年降水量は300 mm以上、一部では年降水量500 mm以上のところもあるが、天山山脈の南斜面は年降水量は大部分が100～300 mmである。秦嶺山脈以南の降水量は800 mm以上の湿潤地区であるが、以北は年降水量800 mm未満の半湿潤地区になっている。

中国の全国平均の降水量は650 mm前後で、東南沿岸より西北内陸に向かって次第に減少している(図-1.3.2)。地域間の差は大きく、台北東南の火烧寮は年平均降水量6,480 mmであるのに対し、西北内陸地のタクラマカン砂漠南縁に位置する且末(チャルチャン)は平均年降水量は18.3 mmにすぎない。また、季節間の差も大きく、全国の降水量は主として夏を挟む半年に集中し、一般に5～10月に年降水量の80%が集中している。

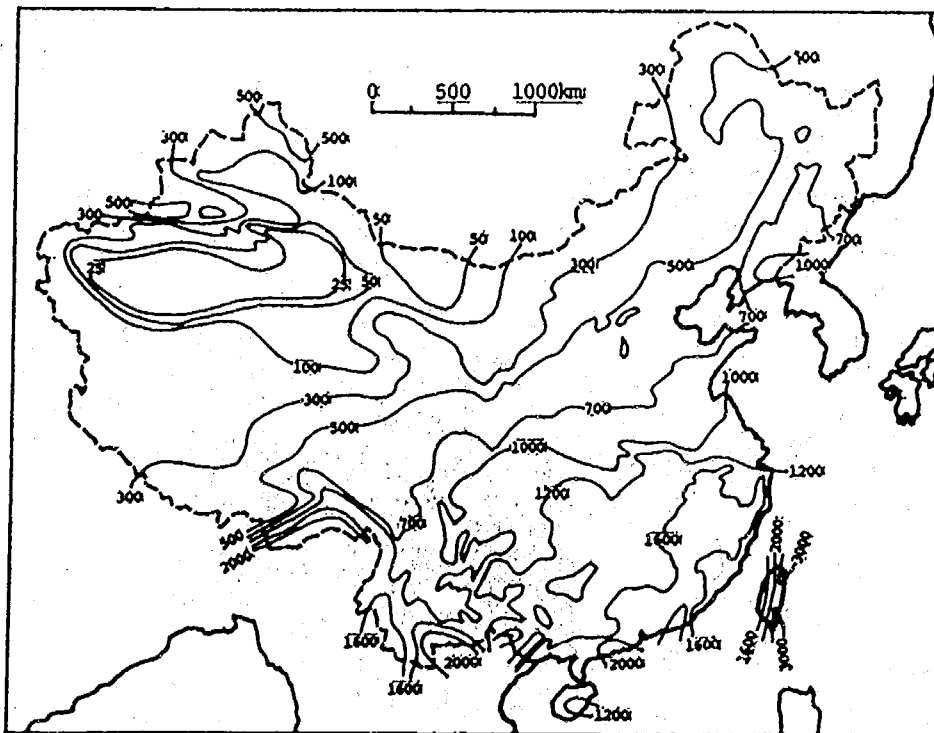


図-1.3.2 中国の年降水量図

2. 中国の地すべりの概要

2-1 中国の地すべり分布

中国の地すべり分布図は図-2.1.1に示すもののほか、科学出版社の長江三峡生態環境地図集⁶⁾に掲載されている三峡周辺の地すべり分布図と危険度予測図などが作成されている。また、地すべり分布の特徴を全国の鉄道沿線で発生した地すべりをもとに、王ら⁷⁾は以下の4つに要因を分類し考察している。

(1) 地層（構成土塊）の特性

地すべりの分布やタイプは地質の特性と密接な関係がある。鉄道科学研究院は10種類の地すべりの発生しやすい地質をまとめた（表-2.1.1）。これらの地層分布域では、地すべりが密集あるいは比較的密集して分布しており、しかも地すべりタイプに特徴がある。例えば、漢中、安康、南陽、荊門等の粘性土分布区域には、粘土地すべりが分布しており、黄土高原区域においては、主に黄土地すべりが分布している。

(2) 地質構造

単斜構造区域では流れ盤地すべりが多く分布する。また、大断層付近には地すべりが集中しており、特に複数の断層が交差する箇所には集中している。また、褶曲軸や大断層の上層も岩盤が比較的破砕されているため、集中している。

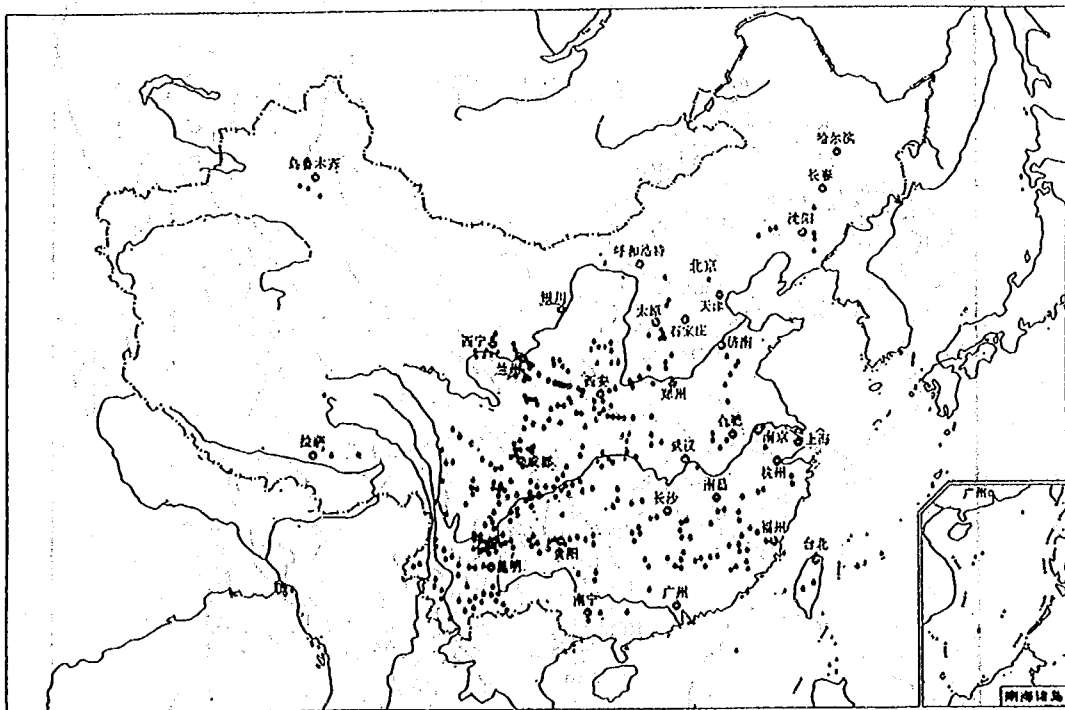


図-2.1.1 中国の地すべり分布図

(3) 地形特性

一般に、地すべりは20から45度の山腹斜面に多く発生する。また、鉄道沿線で発生した地すべりの40%以上は鉄道建設による斜面形状の改変によるもの、あるいは古い地すべりが再活動したものである。斜面形状の改変箇所や地すべり地形を呈する箇所で発生しやすいことがわかる。

(4) 気 候 帯

西北乾燥地区では黄土地すべりが多数分布し、その滑動形態は基盤あるいは水を含んだ砂礫層に沿って発生している。また、降水量の多い中南、西南、華東地区では、いろいろなタイプの地すべりが発生する。さらに、寒冷な東北地区や西藏高原では浅層のツンドラ土の融解による地すべりが発生している。

表－2.1.1 地すべりを起こし易い地層表

岩 相	岩質及び、その成因	分 布 地 区
粘 性 土 岩 相	冲積、湖成、残積粘土、 N2あるいはQ1雑色粘土	中南、西南、西北、 晋中
黄 土 岩 相	各種の成因の黄土	黄河中流、黄土高原
崩 積 土 岩 相	崩壊や地滑りによって積った、粗な堆積物	谷壁斜面
砂 礫 泥 岩 岩 相	厚い層の砂礫岩に薄い層の泥岩がはさまっている	全国各地区
砂・頁岩岩相	砂岩と頁岩の互層	全国各地区
挟炭砂・頁岩岩相	挟炭砂・頁岩層	全国各地区
炭酸塩岩岩相	石灰岩、大理石、白雲石、 泥灰岩、泥質頁岩等	西南、中南
変質岩岩相	粘板岩、千枚岩、片岩、 片麻岩	
火山岩岩相	凝灰岩、流紋岩、玄武岩等	
侵入岩岩相	花崗岩等	

2-2 中国の地すべりの分類と特徴

中国鉄道部では、地すべりの特徴、発生機構、効果的な防止工法等の概略を把握するため、地すべり土塊を構成する物質、すべり面の成因、地すべり土塊の厚さによる3つの分類を行っている（表2.2.1）。この中で構成土塊による分類について以下に紹介する。

(1) 堆積層地すべり

堆積土と堆填土の二種類に分けられる。これには残積物、洪積物、崩積物、斜面堆積物が含まれ、堆積層間や基盤面に沿って滑動しやすい。一般に河川や谷兩岸の緩傾斜地に分布する。

(2) 黄土地すべり

新しい黄土は透水性がよく、その他の黄土は透水性が悪い。したがって、すべり面は、新しい黄土と古い黄土の境界に形成されやすい。また、異なる成因及び年代の黄土の堆積層間にすべり面が形成され、地すべりが発生しやすい。黄土地すべりの多くは、黄河流域の黄土高原一帯に集中しており、とりわけ塬辺の堆積黄土の中に集中している。

(3) 粘性土地すべり

粘性土地すべりの主な形成要因は、粘土中に含有されているモンモリロナイト等の特殊な親水鉱物が膨張性に富み、加水分解等の水の影響を受け、その強度が極めて低くなることにある。このため、地すべりの発生及び規模は特殊鉱物を含有するこの粘土層の形状、分布位置、その箇所の水文地質条件に関係がある。粘性土地すべりの多くは、丘陵盆地の一部に分布し、各盆地で発生する粘性土地すべりの特性には類似点があるが、個別の特徴も備えている。

(4) 岩石地すべり

岩石地すべりには岩石全体が一体となってすべるもの（岩盤地すべり）と地すべり土塊に亀裂や断層が発達し岩石が破碎され、これが地すべりとなるもの（破碎岩地すべり）の二つに分けることができる。岩盤地すべりではその特性が岩盤の性質と密接な関係がある。また、すべり面は多くの場合、層理面沿いに形成される。一方、破碎岩地すべりは、すべり面が必ずしも単一な面とは限らず鋸歯状になることもある。

表－2.2.1 鉄道沿線の地すべり分類 (Liu, Wang, Xu)

地すべりの構成土塊による分類	主すべり面の成因による分類	地すべり土塊の厚さによる分類
粘性土地すべり 黄土地すべり 盛土地すべり 崩積土地すべり 破碎岩地すべり 岩盤地すべり	境界面地すべり 層面地すべり 構造面地すべり 均一斜面内地すべり	浅い地すべり(<6m) 中程度地すべり(6-20m) 深い地すべり(20-50m) 極深い地すべり(>50m)

3. 中国の黄土地帯

3-1 黄土の分布

中国の黄土と黄土状岩石は主に崑崙山、泰嶺、泰山と魯山を結ぶ線の北側にある乾燥ないし半乾燥地域に分布している。これは北緯 $30^{\circ}\sim 49^{\circ}$ の間に位置し、特に $34^{\circ}\sim 45^{\circ}$ の間で最も発達している。これら黄土の分布域内の年間降雨量は 500 mm未満である。

中国における黄土分布地区の北側は砂漠かゴビ（砂礫砂漠）であり、北から南に向い順にゴビ、砂漠、黄土と帯状の配列を示している。

現有の資料に基づけば、黄土は大体四つの分布区に分けることができる。すなわち、1.黄土高原区 2.華北区 3.東北区 4.西北内陸盆地地区である。この中では黄土高原地区が最も黄土が発達しており典型的である。黄土層の厚さも黄土高原地区が最も厚い。

図- 3. 1. 1 に黄土高原の黄土分布図を示す。

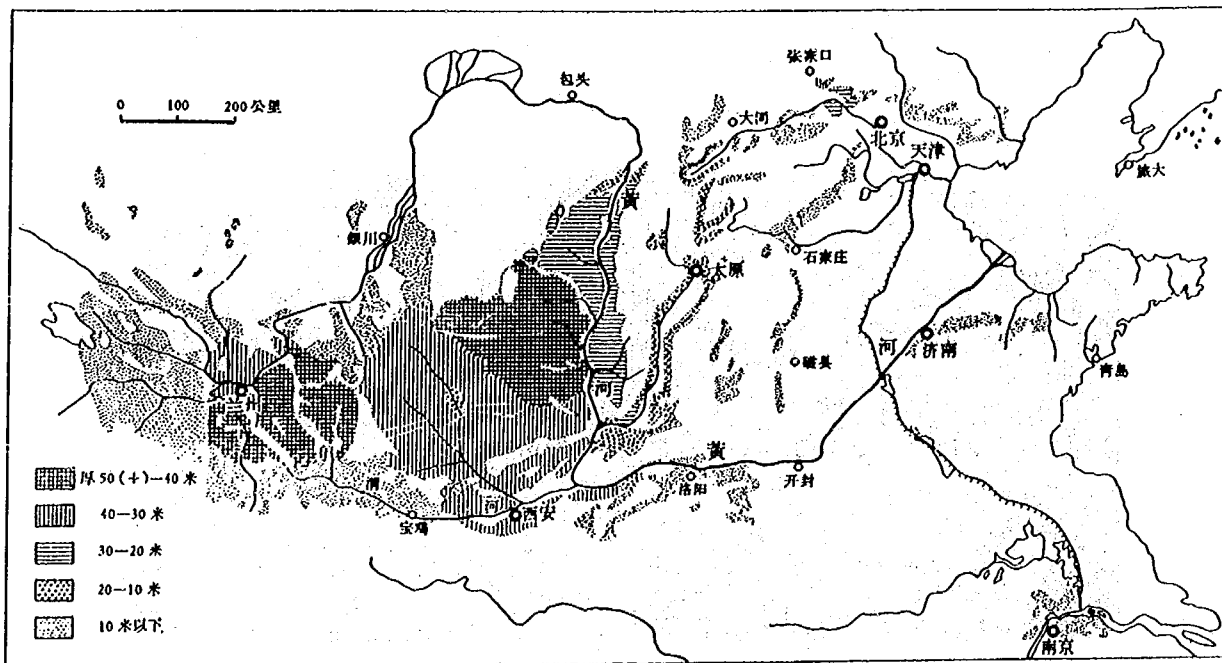


図- 3. 1. 1 中国黄土の分布図

3-2 黄土の堆積時期

黄土中に含まれる脊椎動物化石によって、中国黄土は以下のように分けられる。

完新世黄土

馬蘭黄土（晩更新世）

離石黄土（中更新世）

午城黄土（早更新世）

馬蘭黄土と離石黄土との間、離石黄土と午城黄土との間、そして離石黄土の上部と下部との間には明瞭な侵食面が認められ、黄土の堆積中にいくつかの間隙が存在したことを示している。これは乾燥から浸潤に変わる気候条件に対応している。

3-3 黄土の物質成分

中国黄土の粒子成分は主にシルトであり大体50%以上を占めている。また、中国黄土の鉱物成分は60余種類にのぼるが主に石英、長石からなっている。黄土の由来は火成岩、変成岩、堆積岩に求められるが、その鉱物成分は異なる地区、異なる時代を通じて極めて類似している。これは黄土が西北部の広大な砂漠に由来し、運搬される間に高度に混合されてきたことに関係している。

また、黄土の鉱物、化学成分等の分析によると、不安定な鉱物の含有量が高く、鉱物風化が弱く、大量の炭酸塩や石膏、モンモリロナイトを含み、PH値が高い。このことは黄土形成当時の乾燥な気候条件を示している。しかし、午城、離石、馬蘭の各黄土中には幾層かの埋没古土壌層が挟まれており、何回かの湿潤気候が存在したことを示している。（写真-3.3.1）



写真-3.3.1 埋没古土壌を挟む黄土

3-4 黄土地形

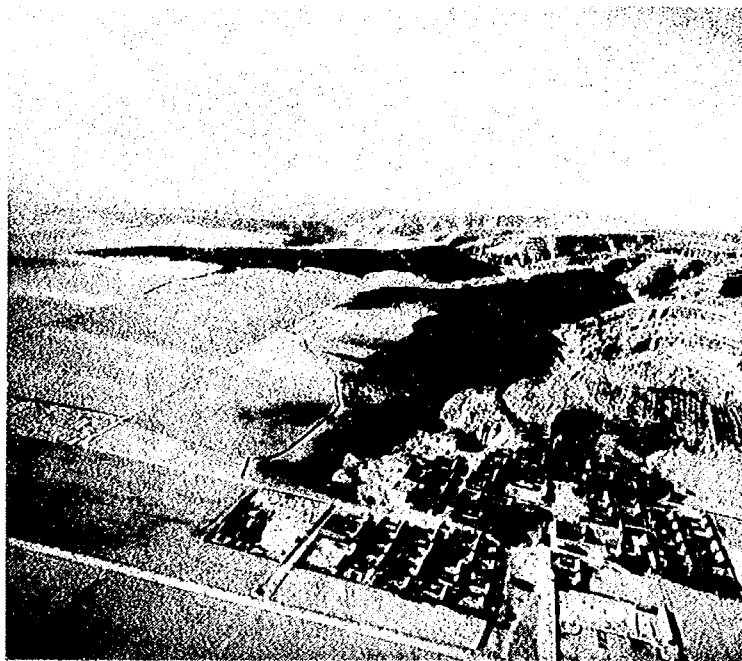
中国の黄土地形は塬（ユアン）・梁（リャオ）・峁（マオ）の三つの類型に分けられる。塬は黄土の被覆面積が比較的広い平坦な高地であり、周囲を侵食谷の谷頭に蚕食され平面図上では花びら状を呈する。梁は二本の平行した谷によって挟まれた細長い高地である。峁は饅頭のような形をした黄土の丘で、平面図上では楕円形か円形である。これらの地形は黄土堆積前の古地形に対応しており、塬の下部基底は平坦で、梁・峁の下部基底は丘陵起伏となっている。梁・峁は塬が侵食を受けたために形成されたものではなく、黄土地形発達過程を塬から梁に梁から峁に推移したものである。

ない。しかし、黄土地形の成因については中国でも議論があり、未だ明かではない。

図－3.4.1 に塬・梁・峁地形の形状を、また典型的なものを、写真－3.4.1～3.4.3 に示す。



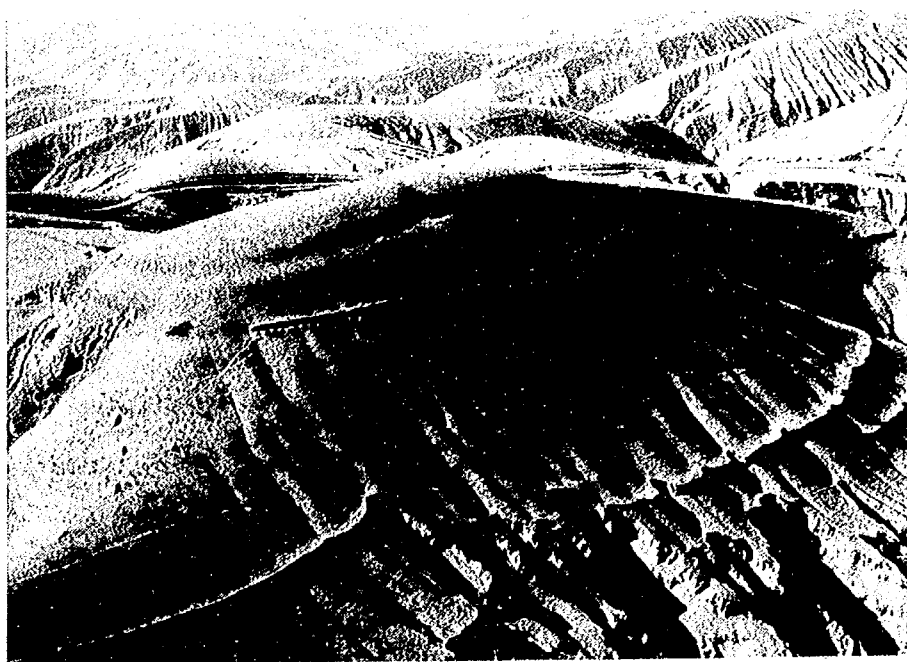
図－3.4.1 黄土高原上の塬，梁，峁地形



写真－3.4.1 塬



写真－3.4.2 梁



写真－3.4.3 崩

3－5 黄土地帯の地すべりの分布と特徴

黄土高原における地すべりの分布は時間的にも空間的にも一様ではない。その基本的な分布の特徴は以下のとおりである。また、図－3.5.1に黄土高原の地すべり分布図^{8) 9)}を示す。

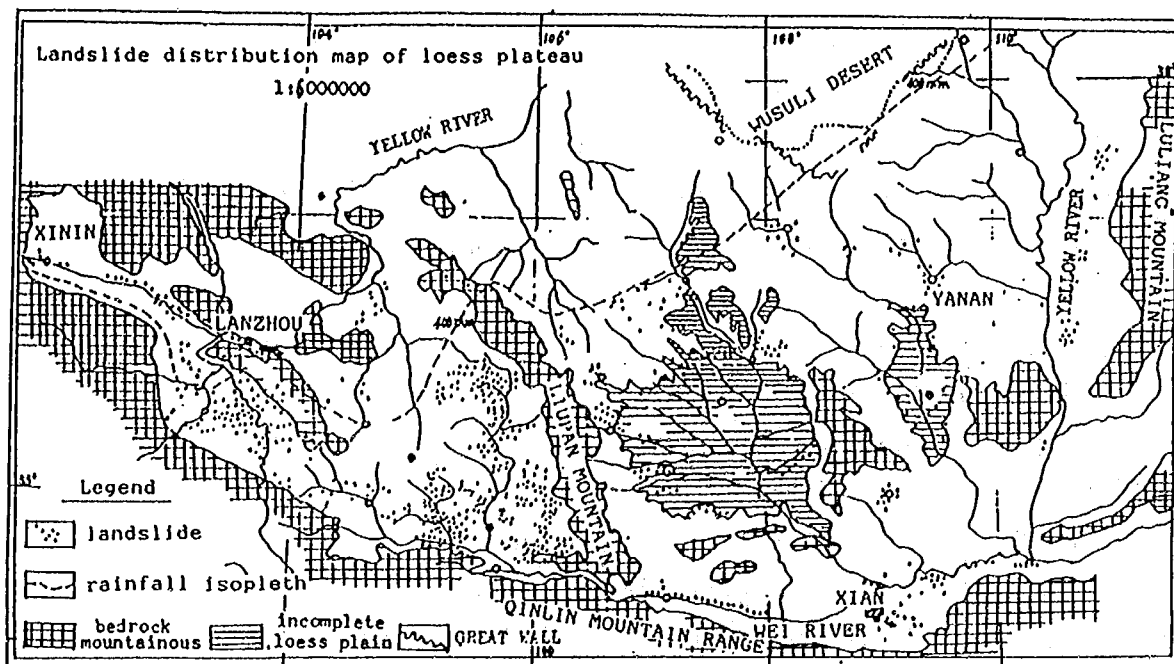


図-3.5.1 黄土高原の地すべり分布図 (Jin, 1987)

1) 地すべりの緯度的分布

黄土高原の地すべり分布は、南西から北東に抜ける 400 mm の等降水量線によって北部地帯と南部地帯の 2 つに分けられる。南部は地すべり密集地帯である。とりわけ、その南縁部 (幅 20~60 km) は秦嶺山脈前面の断層帯が走っていることもあって重力侵食率 (地すべり地面積の総面積に占める割合) は 20~30% と大きい。この地帯には様々なタイプの地すべりが分布する。たとえば有名な洒勒山の大規模地すべり、葡萄園基岩地すべりのほか、降雨による浅層地すべり、人工灌漑による地すべりなどが分布する。北部は地すべりの散在地帯であり、その数は少ない。また、一般に規模も小さく谷頭部や侵食作用の活発な地域で発生している。

2) 地すべりの群体分布

地すべりは黄土高原のいくつかの地域に群体となって分布している。そして以下の 4 種類の群体が存在する。

- A) 中生代や新生代の地層の盆状構造の中に地すべり群が分布するもの。盆状構造の中心から離れるほど地すべりの分布は少なくなる。たとえば、天水 (Tianshui) や臨夏 (Lingxia) など。
- B) 小さな流域に地すべり群が分布するもの。この種の地すべり群体は甘粛省の秦安 (Qinan) や通渭 (Tongwei)、寧夏回族自治区の西吉 (Xiji) などに多い。
- C) 強地震帯に集中している地すべり群体。たとえば海原 (Haiyuan) や通渭の中心部など。
- D) 六盤山の西側の Tao 川流域には東西方向の並行河川、Guangtong 川や巴謝 (Baxi) 川があり、これらの川の北岸には直線状の分布を示す地すべり群がある。とりわけ、Chengjiaji から Ganpin までの 37 km もの長い斜面には 52 の地すべりが分布している。同様なことが六盤山北部の Jing 川流域の Jin 川、Xiaolu 川、Dalu 川にも存在している。

3) 地すべりと土石流の共存

地すべりと土石流がひとつの谷に共存するという現象はしばしば見られる。一般に地すべりは谷頭部や谷兩岸で発生し、土石流に土砂を供給する。たとえば、1984年7月にShigou谷の源頭部で発生した地すべりは泥流となって流れ出た。Liによる甘粛省の122の土石流谷の調査によると土石流中の土砂の65%は地すべりから供給されているとしている。このようなことから、土石流を防止するためには、まず地すべりの防止から始めなければならないという結論に至っている。

4) 地質時代の中での地すべり発生時期

地すべり災害は黄土高原においてしばしば発生している。多くの調査によると地すべりの発生時期は更新世以降の3つの時期に分けられる。

A) 前期更新世の太古地すべり (Palaeo-landslide)

太古地すべりは第4段丘に位置し、地すべりの先端は現河床から160~200mの高さに位置する。また、その冠頭部の弧の形状はぼんやりしている。地すべり土塊は前期更新世の黄土と第三紀層からなり、太古地すべりの滑落崖と移動土塊は馬蘭黄土によって覆われている。地すべり土塊は平坦地となって居住区として利用されている。平坦地の先端には谷が形成され、いくつかの太古地すべりの前面には第2段丘の堆積物が堆積している。

現在、多くの太古地すべりが再活動している。太古地すべりの再活動には2つの型がある。すなわち、洒勒山型(急速にそのままの形で再活動する型)と葡萄園型(ゆっくりと複合した形で再活動する型)である。太古地すべりの再活動の条件としては、前面に障害物がないこと、斜面下部に変化が起きること、太古地すべりに荷重が加わること、地下水が集まりやすいことなどがあげられる。太古地すべりの再活動は一般に3つの段階を経て発生するとされている。すなわち、準備期間・低速期間・高速期間である。

B) 前期完新世の古地すべり (Old-landslide)

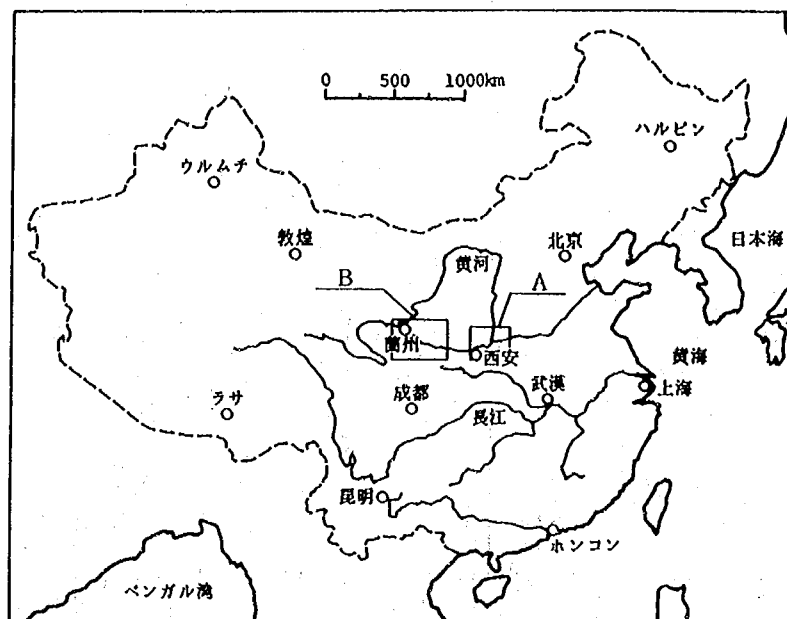
古地すべりは巴謝(Baxie)川、静寧(Jingning)、Bojixia、海原(Haiyuan)などに分布する。一般に現在の河床から80~120mの高さに位置し、その冠頭部の弧の形状ははっきりしている。古地すべりは中期及び前期更新世の黄土からなり、それらはガリー谷によって切られている。古地すべりの前面は多くの場合人工的に改変されている。再活動の過程、条件、特徴は太古地すべりと同様である。

C) 後期完新世の新地すべり (New-landslide)

新地すべりは主に現代のもので黄土高原に広く分布している。地すべりの外形は非常に明瞭で、それらの大部分は第1段丘を覆い、あるいは斜面の下部まで堆積している。後期完新世の新地すべりは主に河川やガリー谷に沿って分布し、人間活動と密接に関連している。建設工事が拡大するにつれて、都市の周辺の斜面は大きな被害を受けている。たとえば蘭州(Lanzhou)や陝西省のTongchuan、Yananなどの都市では地すべりや土石流がしばしば発生している。

4. 黄土地帯の地すべりの実例

以下に今回調査を行った黄土地帯地すべりを紹介する。図－4.0.1に調査位置図を示す。



図－4.0.1 調査位置図

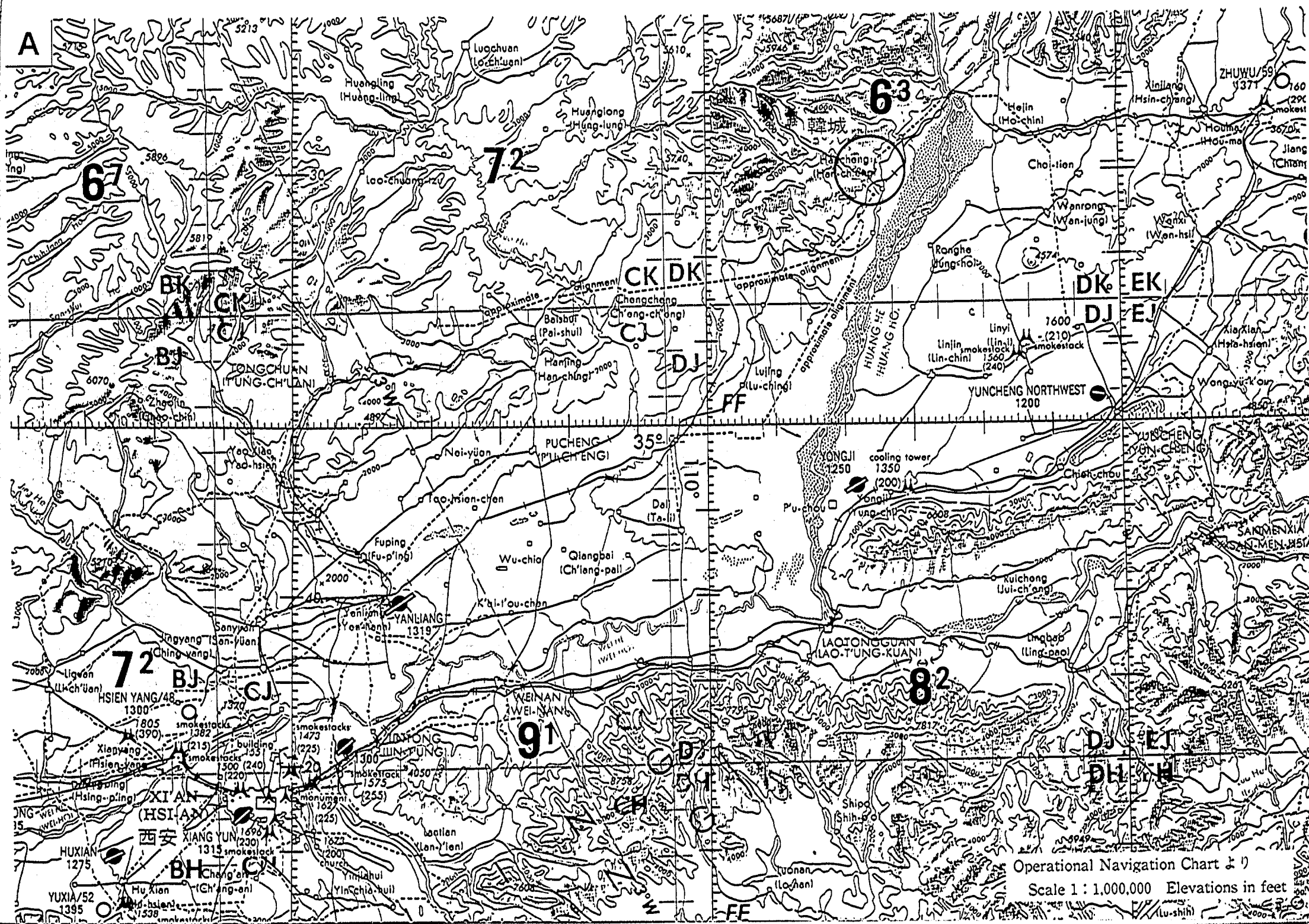
4－1 西吉の地すべり (Landslides in Xiji Area)

1) 概 況

黄土高原西部は中国の地震多発地域の1つである。1920年12月16日に発生したM=8.5の海原大地震¹⁰⁾によって、西吉地区では大規模な崩落や地すべり(約650箇所)が発生して、40以上の天然ダムを形成し、その内27個は現在も残存している。またこの地震による死者数は240,000人で、そのうちの半数の120,000人が地すべりによるものとされている。その形状や地質的背景によって地震による地すべりは4つのタイプに分けられ、各々のタイプは特有の分布を示している。

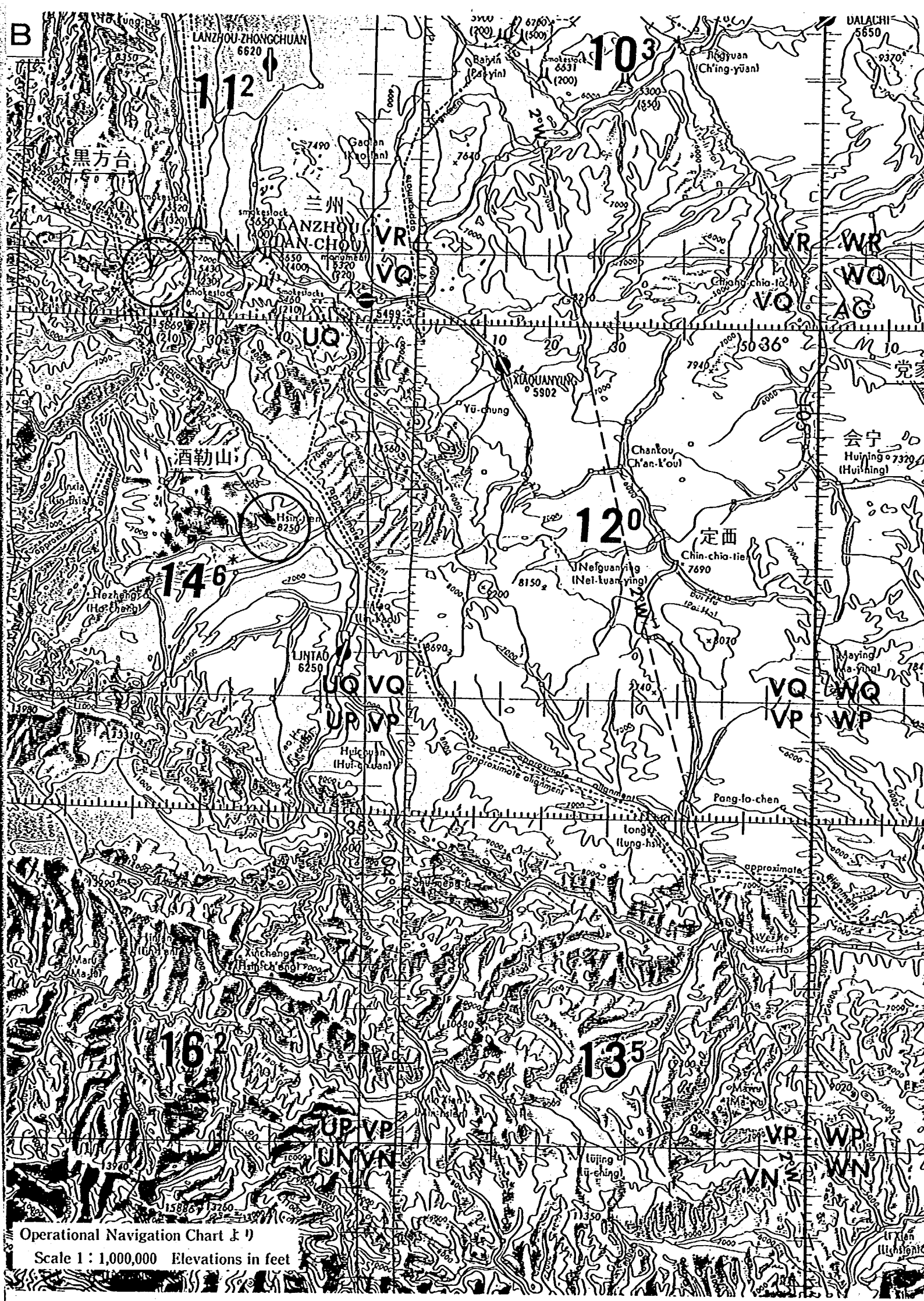
2) 地質条件

六盤山の東部地域の大部分は厚い黄土層で覆われている。すなわちこれらは午城黄土(Q1)、離石黄土(Q2)、馬蘭黄土(Q3)である。離石黄土中には広範囲にわたって古土壌層が挟まれており、各々の土壌層(とりわけ第1層～第5層)には残留堆積層が発達している。残留堆積層は黄土に比べて炭酸カルシウム分が少なく粘土粒子分($\phi < 0.005 \text{ mm}$)が多い。地質断面上では多くの埋没古土壌層(一般には10層以上)があり、それらは黄土層中で固結質、粘着質であり安定で侵食されにくい性質を示す。いろいろな地質断面図中の古土壌層の分布により残留堆積層の数は北西から南東に向かって増加することが明かとなった。その変化は黄土の粒度組成のゾー



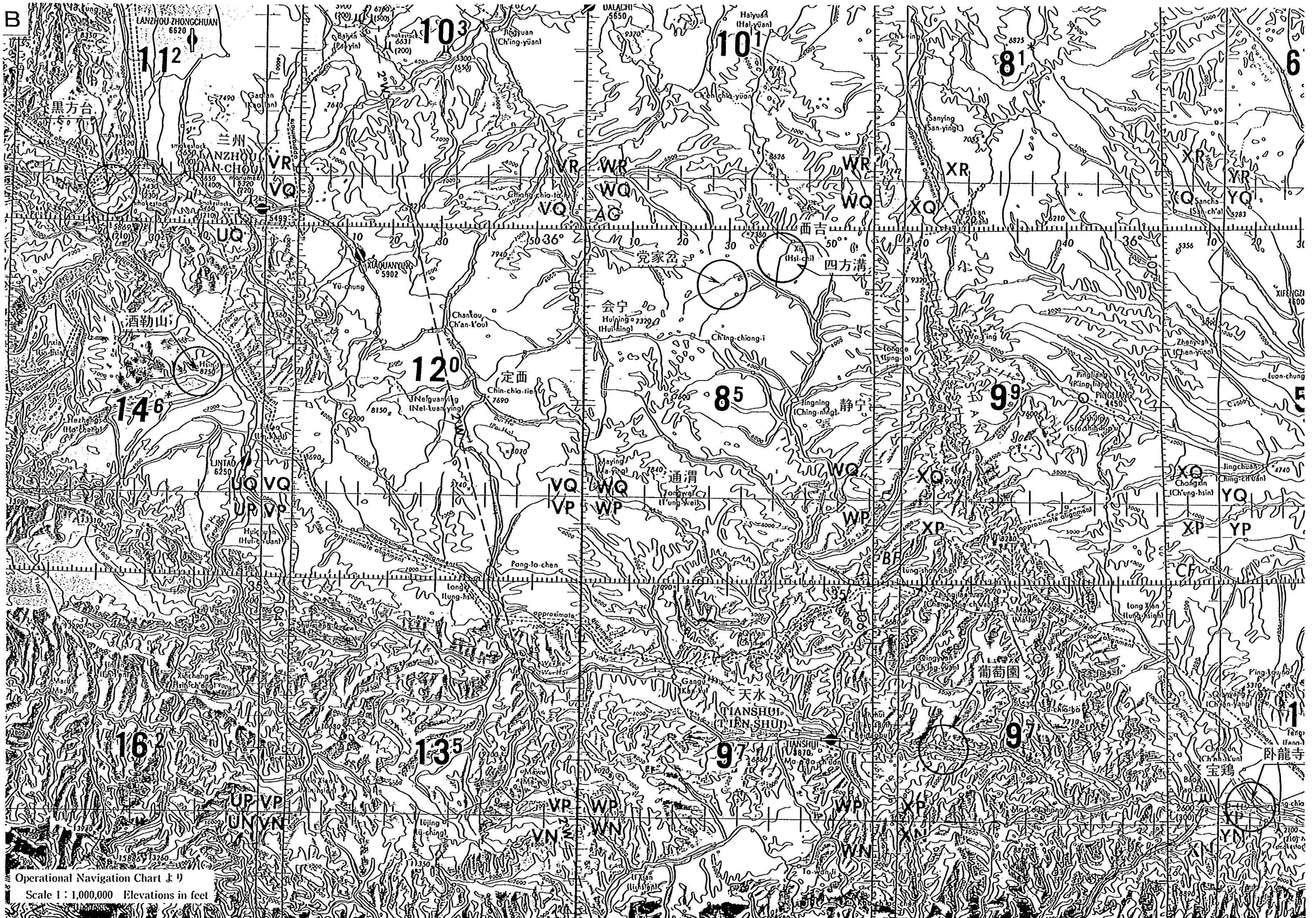
Operational Navigation Chart 7
Scale 1 : 1,000,000 Elevations in feet

B



Operational Navigation Chart より

Scale 1 : 1,000,000 Elevations in feet



Operational Navigation Chart
Scale 1:1,000,000 Elevations in feet

ニングとも一致する。すなわち黄土は広い地域のなかで砂質黄土－黄土－粘土質黄土と北西から南東に向かって変化する。しかし、六盤山西部の黄土の性質は東部のそれに比べてルーズである。それは主に馬蘭黄土でありこの中にはほとんど古土壌層が発達していなく、この黄土層は簡単に崩壊する性質を持っている。この地域の黄土層の性質の変化にともない、地震による地すべりの規模も北から南に向かって小さくなる。

歴史上の記録によると、 $M = 8$ 級の大地震が山西省と陝西省ではいくつか発生している（1556年 Huaxian 地震，1303年 Zhaocheng 地震，1695年 Linfin 地震）。しかし、これら3つの地震の痕跡は現在見ることはできない。その理由の1つは地震が発生してからかなりの時間が経過しているため、当初地震によって破壊された痕跡は風化によって消失してしまっていることである。もう1つの理由は黄土層の性質が比較的衝撃に対して強いことである。この点で六盤山の東側とは著しく異なっている。

1920年に海原県において $M = 8.5$ の地震が発生した。西吉地区は震央の南70 kmにあったが大規模な沈降が起こった。沈降帯の長さは60 km以上、幅は30～40 kmである。これは地質構造条件と密接に関係している。海原地震を起こした断層の東端は甘粛省固原県の硝口で、北西端は景泰県の興泉堡である。断層は約220 kmにわたって伸びており、SE－NW～NWWの走向を持ち弧状であり、南西側へ傾斜している。この地震災害の被害は、盆地より台地で大きかった。また西吉－静寧は断層の上盤側にあたり、その破壊状況は下盤側よりひどく、上盤側では多くの崩落や地すべりが発生した。

現在、黄土高原で得られるデータによると、地すべりを引き起こす最も弱い地震は $M = 5$ であるが、過去に崩壊し地形が険しくなっている地域では $M = 5$ 以下の地震でも地すべりが発生する。

3) 調 査

地震によって引き起こされる地すべりは重力によって起こるものに比べて明かに複雑であり、様々なタイプの地すべりが様々な地質条件下で発生する。空中写真判読と野外調査により、地震による地すべり分布図（図－4.1.1）¹¹⁾が作成された。この地区の地すべりは以下のようにいくつかのタイプに分類される（図4.1.2）¹¹⁾。

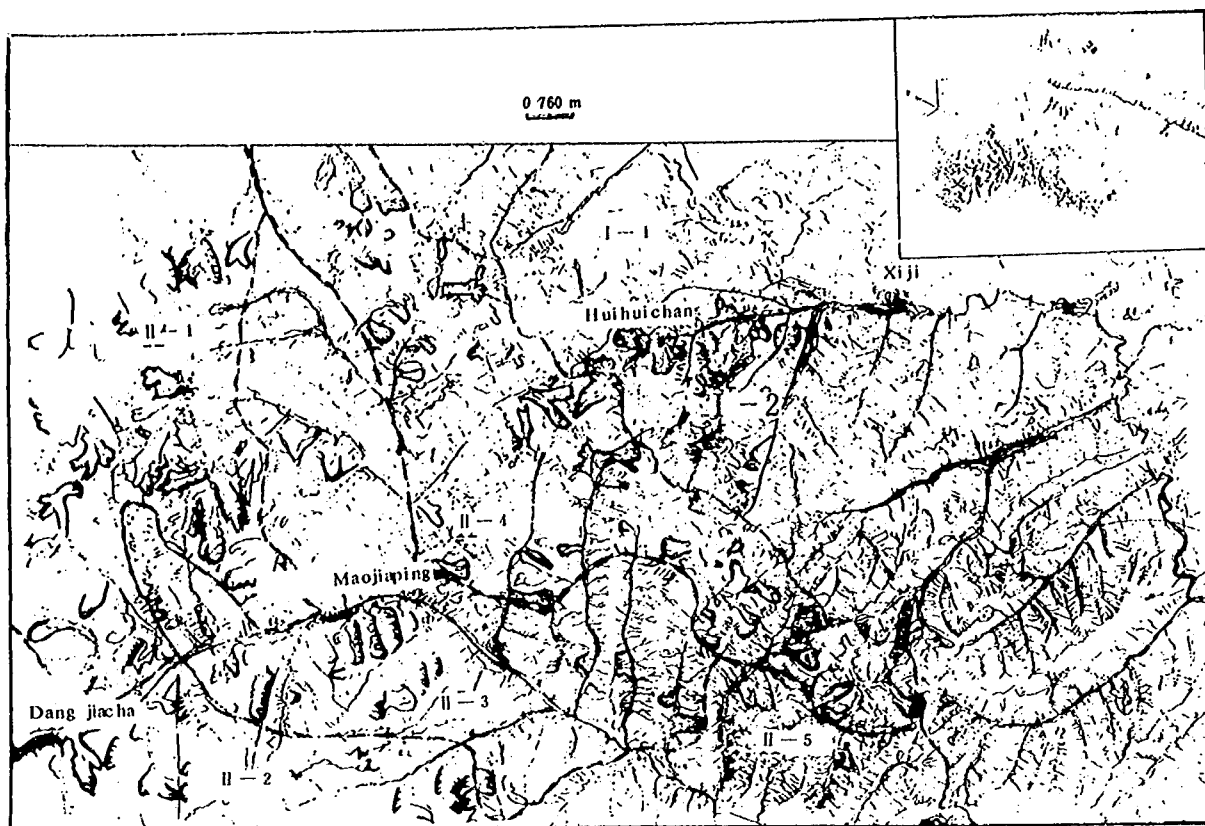
I) 高速～超高速の崩落，地すべり

地形と分布の特徴により以下のタイプに分けられる。

- ① 「花びら」ないし「蝶」型の崩落，地すべり
- ② 「眉」型の崩落，地すべり
- ③ 「肋骨」型の崩落，地すべり
- ④ 様々な形状の単体地すべり
- ⑤ ガリー谷壁の鋸歯状地すべり

II) 凝集型地すべり

III) 沈降型地すべり



I-1. A large area where destroyed lightly I-2. Falls-slides seriously only a part II-1. Earthquake destroyed seriously (Multi-Petal or Butterfly falls-slides) II-2. Earthquake destroyed seriously (Two "eyebrow" falls-slides II-3. Earthquake destroyed seriously ("Rib" falls-slides) II-4. Disrupted falls-slides, coherent flow area ("Spoon" falls-slides) II-5. Earthquake falls-slides only in part area ("Sawtooth falls)

図-4.1.1 西吉地区地すべり分布図 (Zhu, 1989)¹¹⁾

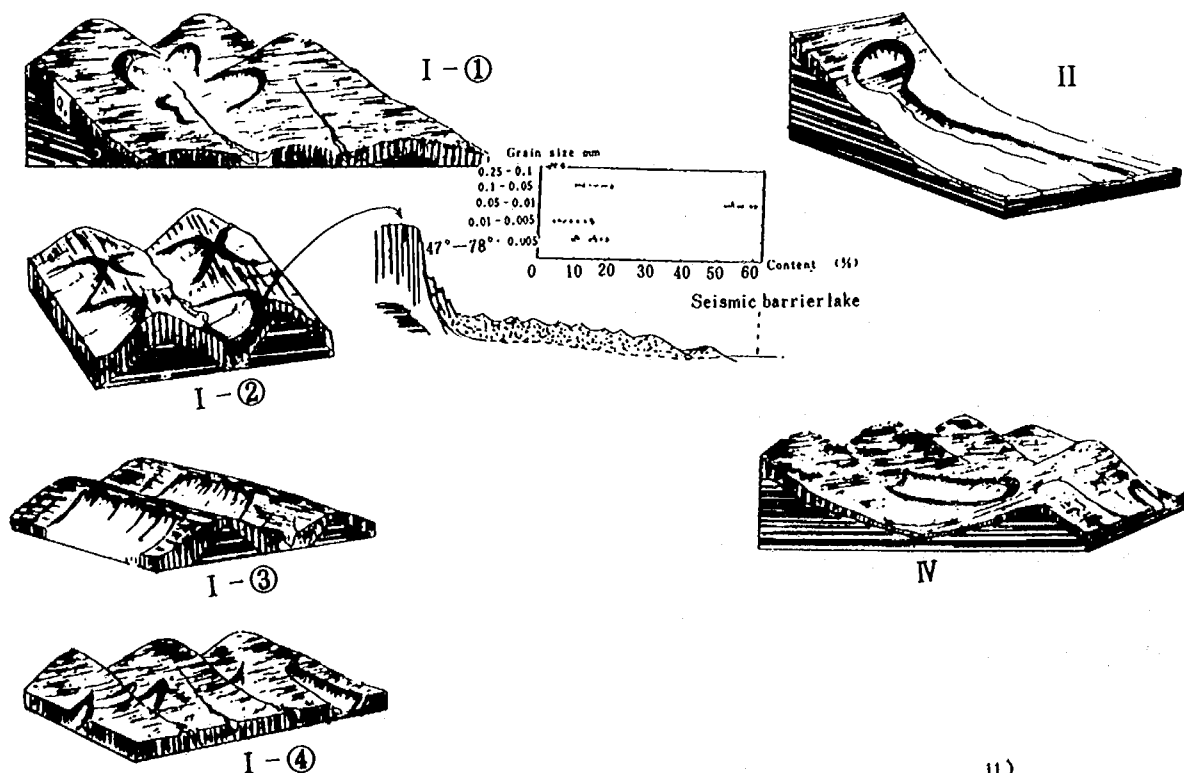


図-4.1.2 黄土地帯の地震による地すべりのタイプ (Zhu, 1989)¹¹⁾

今回、西吉地区での調査は以下の3つの地すべりを中心に行った。

- 党家岔1号地すべり
- 四方溝地すべり
- 夏家大路地すべり群

A) 党家岔1号地すべり (Dangjiacha No.1 Landslide)

党家岔地すべりは西吉の中心から西南西へ約40 kmに位置する。この地すべりによって前面にあった河川はせき止められ、この地震により発生した天然湖のうち最大のものを形成した(写真-4.1.1)。この天然ダムの河川方向の延長は約1.5 km, 幅約0.5 km, 湖の面積は186.6万 m^2 , 容積1,600万 m^3 に及び、1987年からこの湖を利用して網箱による魚の人工養殖が実施されている。この地すべりは頭部で2つの地すべりに分かれ、その規模は延長約2.5 km, 最大幅約1.0 kmに及んでいる。党家岔湖の下流河川にも多くの天然ダムが数珠状に形成されており、地震発生時の地すべり活動の激しさを物語るとともに、異常豪雨により天然ダムの決壊による土石流や洪水の発生が懸念される(写真-4.1.2~4)。

B) 四方溝地すべり (写真-4.1.5)

C) 夏家大路地すべり群

この地すべりは西吉の中心近くに位置する。この地域では河川を挟んで両側に花びらや蝶が羽を広げたような形で地すべりが密集して分布し、いわゆる花びら型~蝶型の地すべりにあたる。また、党家岔の地すべりと同様、天然ダムが多数形成されている。(写真-4.1.6~4.1.8)



写真-4.1.1 党家岔地すべり周辺の地すべり^{10) 24)}

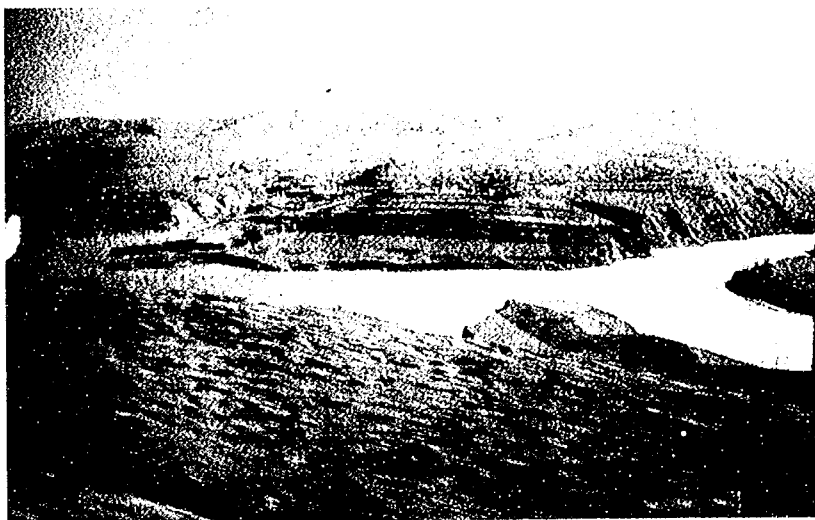


写真- 4. 1. 2 党家谷地すべり下流の天然ダムの状況

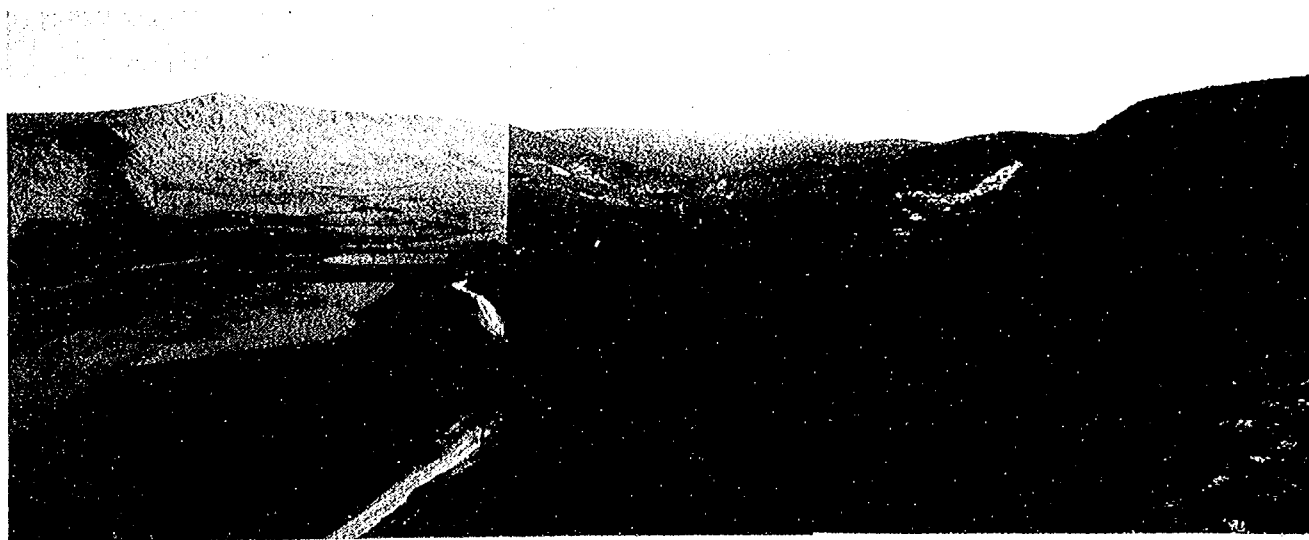


写真- 4. 1. 3 党家谷1号地すべり冠頭部



写真- 4. 1. 4 党家谷地すべりによってできたせき止め湖



写真- 4.1.5 四方溝地すべり地内を通る道路より下方の状況



写真- 4.1.6 夏家大路地すべり群全景



写真- 4.1.7 夏家大路地すべりの天然ダム



写真- 4.1.8 夏家大路地すべりの天然ダム

4-2 洒勒山地すべり (Saleshan Landslide)

1) 概 況

洒勒山地すべりは甘肅省蘭州市から南へ60m余りの東郷族自治県果因に位置する(図-4.2.1)。地すべりは1983年3月7日午後5時46分に発生した。この地すべりは1分以内(地震計のデータによると55秒)に3つの村を破壊し、237人もの命を奪ったほか、牛馬400頭、ダム2つに被害が発生した。元の地形は完全に変化し一瞬の内に「土の海」となり、巴謝(Baxie)川がせき止められJuir貯水池が埋まった。地すべりの規模は東西幅700~1,000m、南北長さ1,100~1,400m、厚さ5~75m、面積1.3km²、総土量31,000,000m³で、地すべりの冠頭部は長さ700m、高さ220m、平均勾配45°である(図-4.2.2)。洒勒山地すべりは、突然発生したこと、規模が大きかったこと、高速であったこと、長い距離を移動したこと、甚大な被害があったことなどから有名な地すべりとなり、中国国内はもとより海外の多くの専門家や学者の興味を引いている。日本でも森脇(1984)¹²⁾、Wang et al (1985)¹³⁾により紹介されている。

2) 地質条件

洒勒山は中国西北部黄土高原の南西端の巴謝川北岸に位置し、その標高は2,283mである。一方、巴謝川河床の標高は1,962mである。山地前面は3段階の斜面からなる。全比高差は321mで平均勾配は20°、上部は45°以上である。巴謝川の谷幅は750~900mで、主に汜濫源と第1、第2段丘からなり、これらはなめらかで広がっている。洒勒山地すべりは黄土と紅層の不均質な多層からなる。主に第三紀臨夏層群第3層の泥岩(NL32)、第4層の泥岩(NL42)からなる。一方、中央~下部斜面ではそれらを旧地すべりの崩積土が覆っている。2つの系統の構造的な亀裂が新第三紀の泥岩中に見られる。1つは走向83~108°で、洒勒山の斜面とおおよそ平行である。その傾斜は73~86°で南に傾いている。したがって、この構造的な亀裂は斜面の安定性を減ずる作用をし、地すべりの活動を促進させたと思われる。

3) 調査と分析

調査によると、洒勒山地すべりの微候は明瞭であった。この地域の年間平均降雨量は446mmであるが、1978~1979年にかけて650mmの降雨があり、1979年の9~10月にかけてクラックが発見された。クラックは3~4年間にわたって発達した。クラックははじめ斜面頂部に発生し、その後、広く、深く、長くなった。一方変形や音などの他の前兆も明かとなった。全般にみて、洒勒山地すべりの発生原因は旧地すべりの再活動によるといった内的要因だけではなく、何か別の外的要因、たとえば地下水の変動や灌漑などの影響が関係しているものと考えられる。また、一般的な考えとしてこれらの外的要因の変化により斜面の重量が増し、すべり面の強度が減少して、その後斜面の部分的なクリープ変形が起きたものとされている。発生前の調査においては、地すべりの前面には典型的な微候が見られなかったため、以下のように推測されている。中央部と後部で起きた部分的なクリープ現象は前面の土塊によって阻まれ減少し、反対に滑動力が増大した。土塊は伝達された力により圧縮され極限状態に向い、その結果前面の抵抗部となっている土塊を破壊した。いわゆる「水門効果」である。地すべりは高速で滑動し土塊は、互いに圧

迫されながら滑動した。この時エアークッションが作用したことも考えられる。これが、大規模で突然に発生し高速で移動距離の長い酒勒山地すべりの発生メカニズムであると中国では考えられている。断面図を図-4.2.3に示す。また、現地の状況を写真-4.2.1～4.2.3に示す。

次に、現地調査及び測量結果を基に、移動土塊の挙動をシミュレートした。その結果を次に示す。

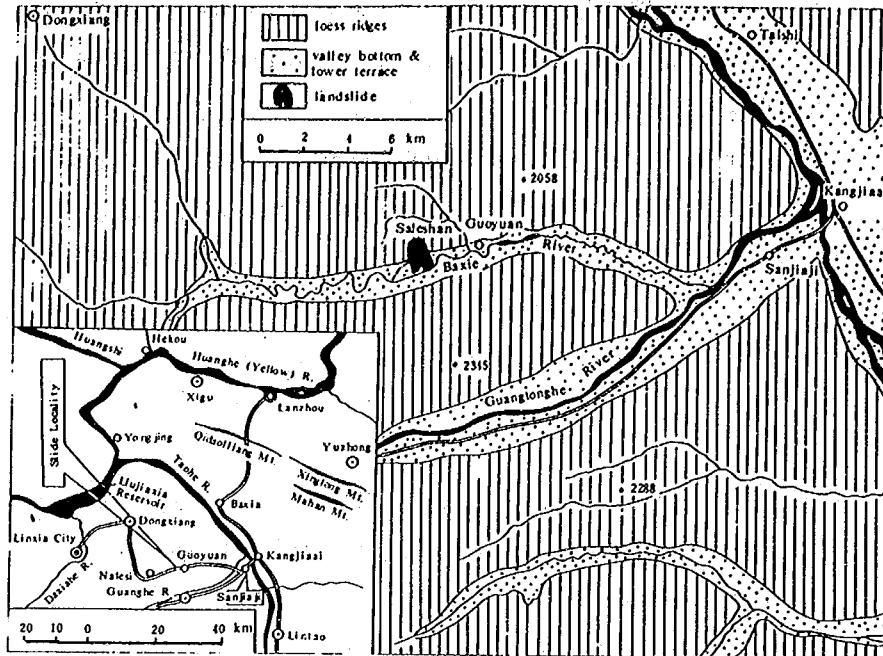


図-4.2.1 酒勒山地すべり位置図²⁵⁾

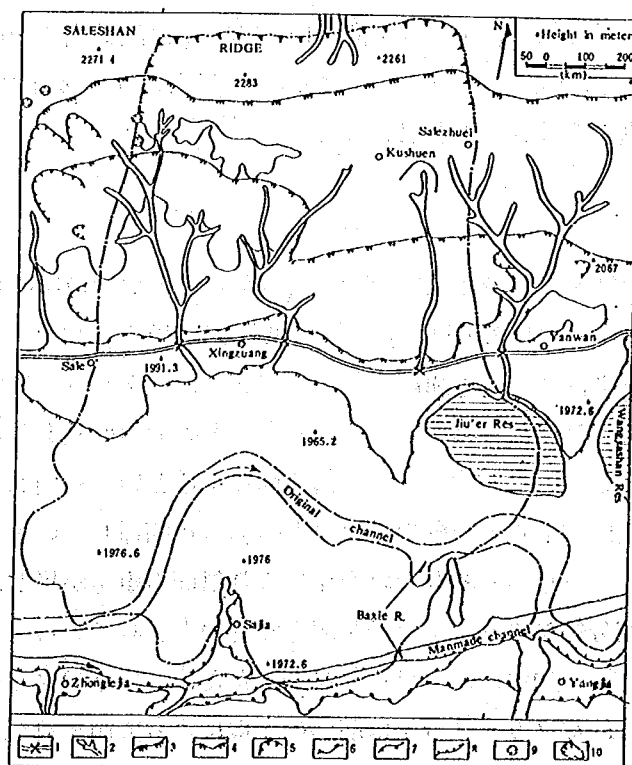


図4.2.2 (1) 酒勒山地すべり平面図スケッチ²⁵⁾

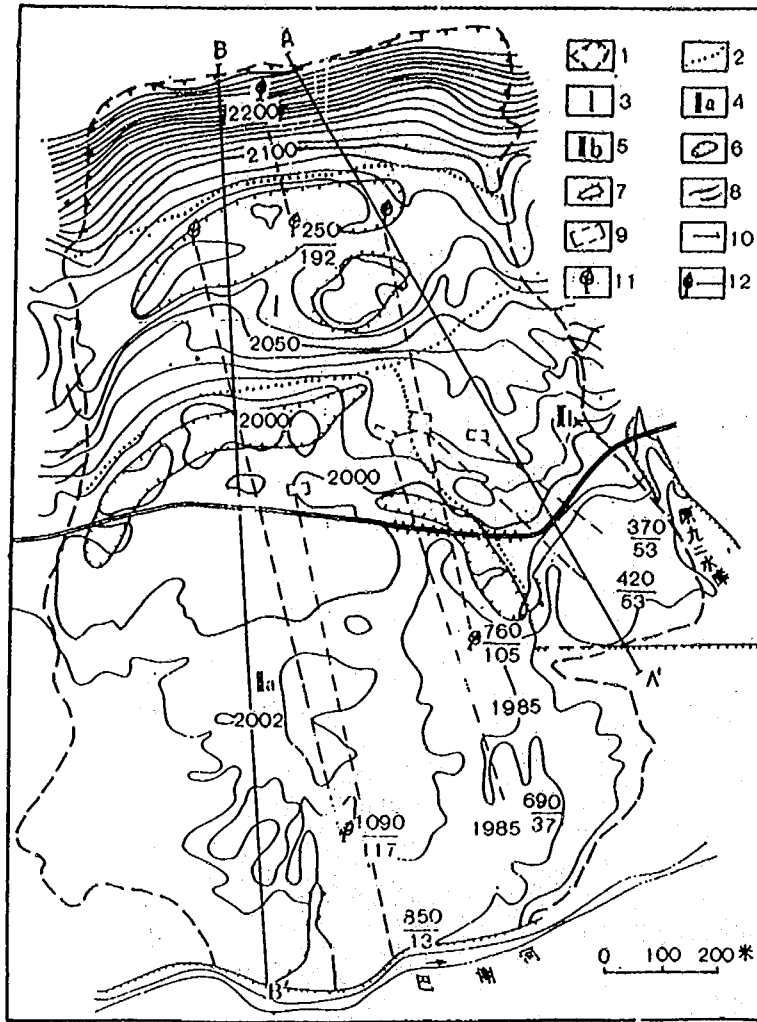


図-4.2.2 (2) 洒勒山地すべり平面図

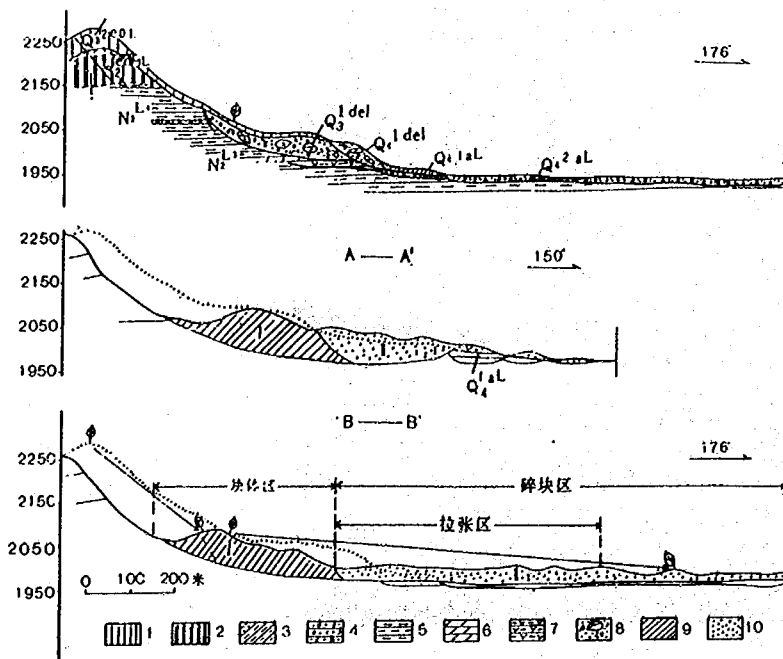


図-4.2.3 (1) 洒勒山地すべり断面図

- 1 : 地すべり範囲
- 2 : 陥没帯
- 3 : 隆起帯
- 4 : クラック
- 5 : 家 屋
- 6 : 家屋の移動方向・距離
- 7 : 立 木
- 8 : 立木の移動方向・距離

- 1 : 馬蘭黄土
- 2 : 離石黄土
- 3 : 粘 土
- 4 : 砂礫岩
- 5 : 泥 岩
- 6 : 泥炭岩
- 7 : 含石膏泥岩

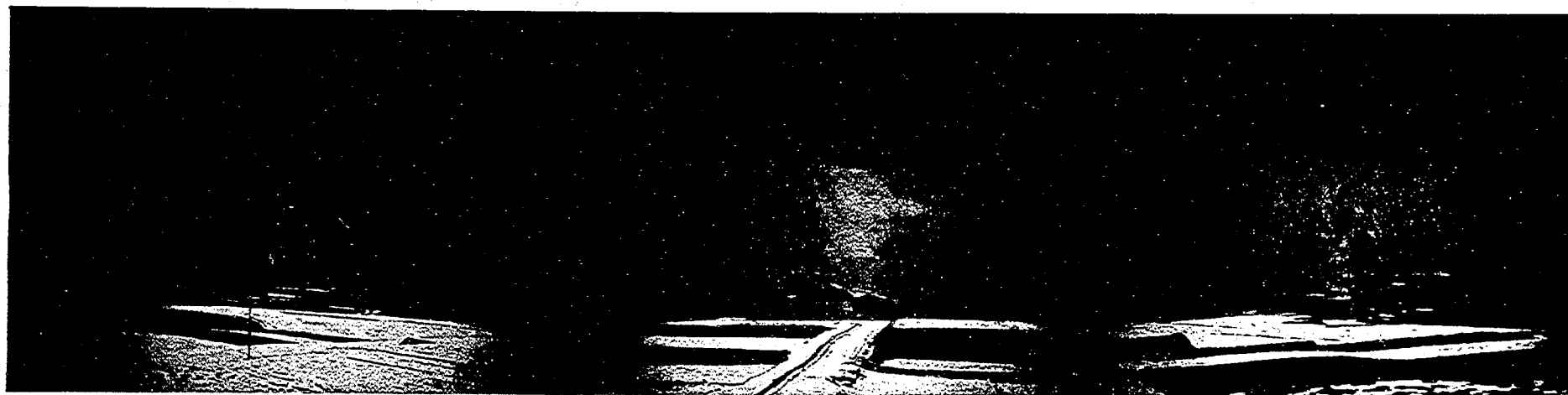
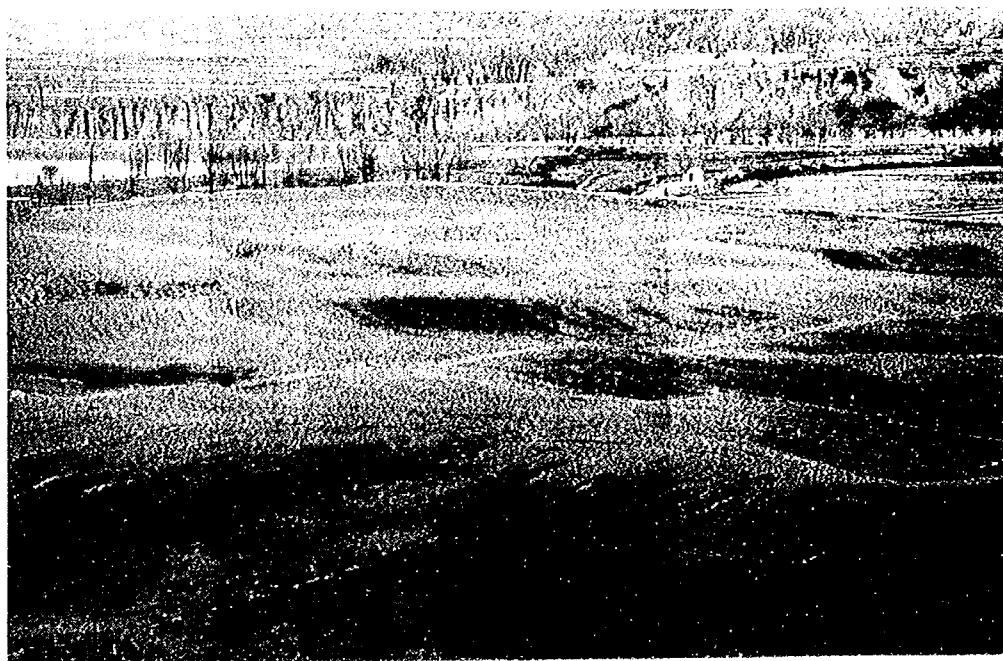


写真-4.2.1 洒勒山地すべり全景



写真－4.2.2 酒勒山地すべり末端に見られる第三紀紅層と黄土層の境界



写真－4.2.3 酒勒山地すべり東翼の波打った堆積層

4) 移動土塊運動シミュレーション

A) 三次元シミュレーションモデルの概要¹⁴⁾

土塊の運動シミュレーションは土木研究所が開発した手法により実施する。この手法は、地すべり移動土塊を非圧縮性のニュートン粘性流体と仮定し、運動の支配方程式にナビエ・ストークスの方程式を用いている。基本式を以下に示す（図-4.2.4）。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + u \frac{\partial M}{\partial x} + v \frac{\partial M}{\partial y} = -g_z h \left(\frac{\partial H}{\partial x} - \alpha \right) + g_x h + \nu \nabla M - \frac{\tau_{xz}}{\rho} \quad \nabla = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + u \frac{\partial N}{\partial x} + v \frac{\partial N}{\partial y} = -g_z h \left(\frac{\partial H}{\partial y} - \alpha \right) + g_y h + \nu \nabla N - \frac{\tau_{yz}}{\rho}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = - \left(\frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} \right) \quad M = \int^h u dz \quad N = \int^h v dz$$

$$\tau_{xz} = \rho g_z + \left(\frac{c}{\rho g_z} + h \tan \phi \right) \frac{u}{\sqrt{(u^2 + v^2 + w^2)}}$$

$$\tau_{yz} = \rho g_z + \left(\frac{c}{\rho g_z} + h \tan \phi \right) \frac{v}{\sqrt{(u^2 + v^2 + w^2)}}$$

ここに $V = (u + v + w)$: 流速ベクトル, ρ : 密度, ν : 動粘性係数, H : 地表面高, h : 土塊厚 g_x, g_y, g_z : 地震加速度, c : すべる面粘着力, ϕ : すべり面摩擦角, α : 土塊内単位抵抗である。

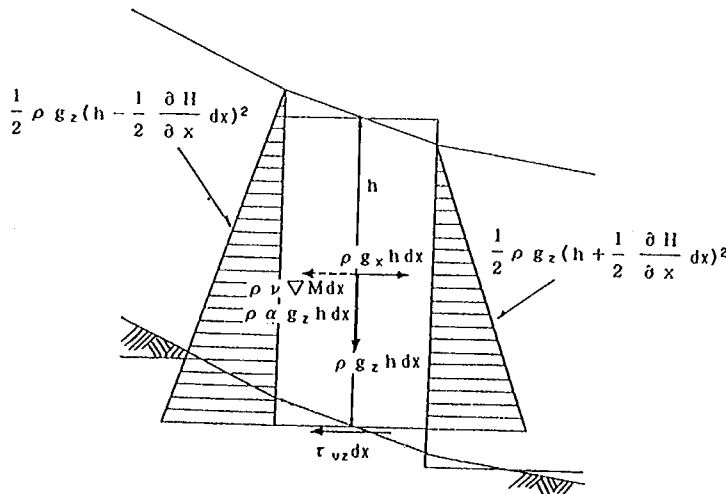


図-4.2.4 X方向に作用する力

三次元的な土塊の挙動を再現するために三次元モデルを考えているが、厳密な三次元では、入力データの作成、計算時間の点から実用性が損なわれるため、地すべり土塊の分布と厚さを考慮した平面流動問題として準三次元的に扱っている。また、地震力を慮することができ、すべり面の抵抗則にはクローン型のほかに、ニュートン型の粘性抵抗則とマニング型の抵抗則を用いることができるが、今回はクローン型の抵抗則を用い検討を実施した。

B) 酒勒山地すべりの運動及び土塊拡散シミュレーション結果

(1) 解析条件

シミュレーション計算は、地すべり地及び土塊の拡散区域におけるメッシュ分割上の交点の地表面やすべり面の三次元的な位置などの幾何条件、及び地すべり土塊の単位体積重量、動粘性係数、内部摩擦角、粘着力、すべり面の内部摩擦角、粘着力等の物性値条件をシステムに与え実施した。また、地すべり土塊、及びすべり面での物性値は実際の土塊拡散範囲や拡散形態を最もよく再現できるように粘着力をゼロに固定して、土塊とすべり面の内部摩擦角を試行的に設定した。解析に用いた諸条件を表-4.2.1に示す。

表-4.2.1 解析に用いた物性値等

地すべり名	格子点数	格子幅	単位体積重量	すべり面摩擦角	内部摩擦角
酒粕山地すべり	38 × 21	25 m	1.9 t f / m ³	8 度	10 度

(2) 地すべり移動土塊の拡散形態

シミュレーション計算による移動土塊の拡散状況を図-4.2.5に示す。ここで、実線は計算、破線は実際の到達範囲を示す。この図から計算と実際の到達範囲が類似したものであることが分かる。また、土塊移動後の地すべり断面での土塊状況は図-4.2.6に示すように計算と実際の比較が合致したものとなっている。実際の滑動前後と計算による滑動後の鳥瞰図を図-4.2.7～4.2.9に示す。計算による滑動後の鳥瞰図は実際の滑動後のものに比べ地すべり地の局部地形が滑らかになっているが、全体的に同様な地形になっていることが分かる。

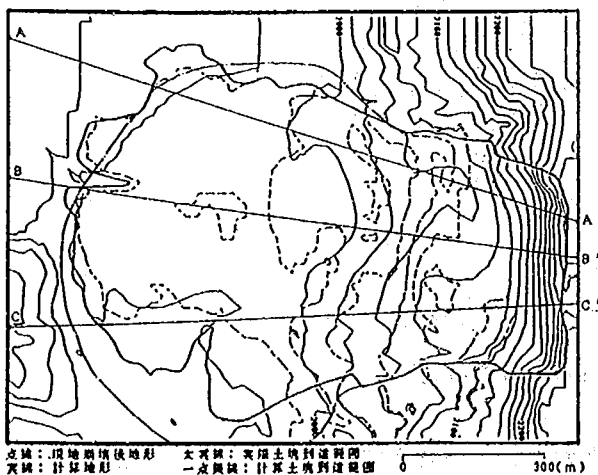


図-4.2.5 平面図

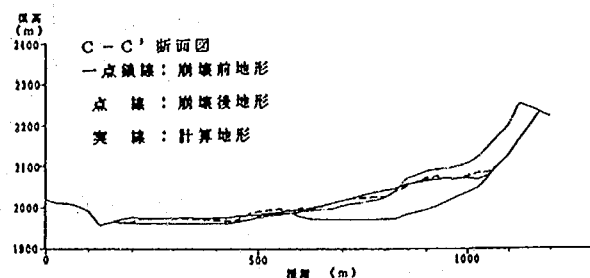
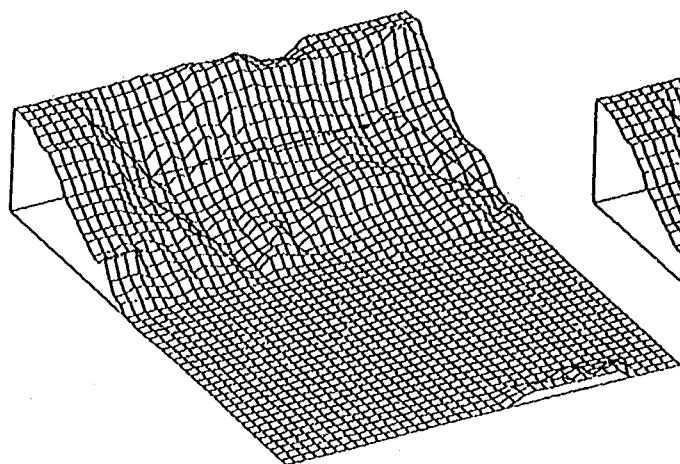
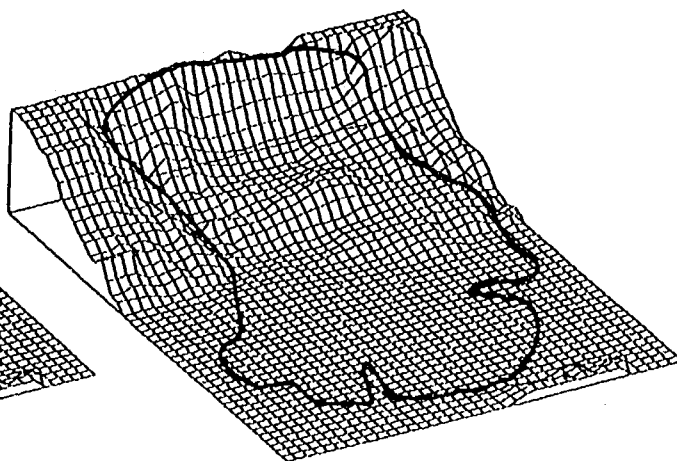


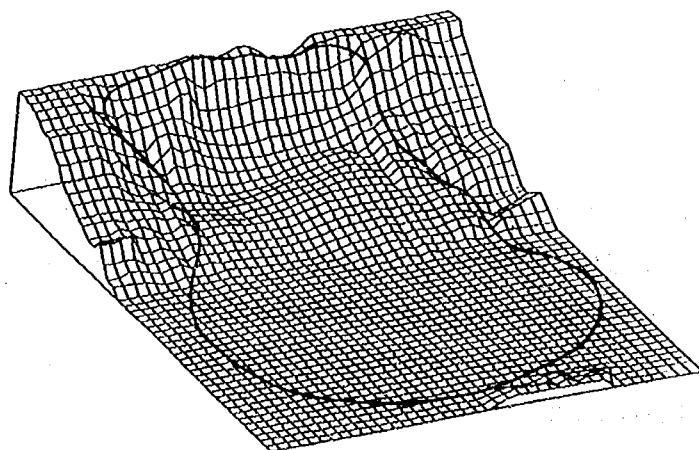
図-4.2.6 断面図



図－ 4. 2. 7 滑動前地形



図－ 4. 2. 8 滑動後地形



図－ 4. 2. 9 滑動後計算地形

(3) 地すべり移動土塊の滑動時間と滑動速度

酒靱山地すべり発生時の滑動による振動が近くの地震観測所で捉えられていた。この観測記録の分析によると、滑動時間は55秒であると推定されている。また、地すべり主滑動土塊上の住家の移動距離と上記地震観測所の推定滑動時間から計算された主滑動土塊の平均移動速度は13～14 m/secと推定されている。さらに、中国鉄道部科学研究院西北研究所の計算では移動土塊の最大速度は28 m/secと推定されている。これらの推定値と数値解析の結果を比較するため土塊全体の平均移動速度と中央測線の移動土塊末端の移動速度の経時的变化を図－ 4. 2. 10に示す。解析による滑動速度は地すべり発生後45～55秒でほぼ移動速度がなくなり、65秒後に完全に停止している。この値は地震観測所の推定滑動時間に近い値になっている。また、解析による平均速度は発生12～20秒後に14 m/secを示している。さらに、移動土塊末端の移動速度は発生12秒後に29 m/secの最高値を示し、西北研究所の計算により求めた値に近いものとなっている。

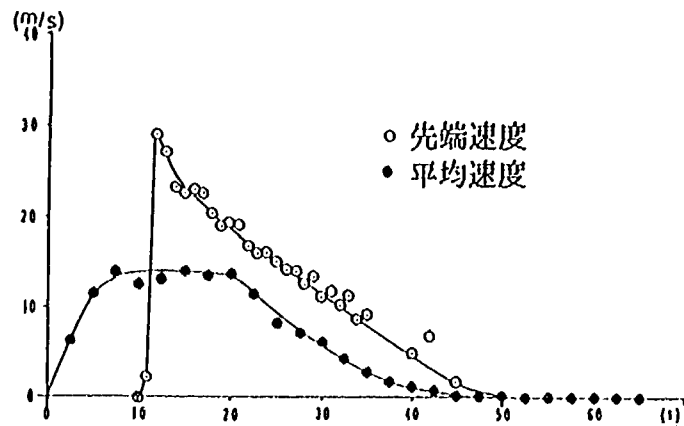


図- 4. 2.10 土塊移動速度

4-3 黒方台地すべり

1) 概 況

蘭州市西方の黄河流域は塩鍋峡と呼ばれ水力発電用の3基のダムが建設されている。この地区の左岸に黒方台とよばれる地域があり多数の地すべりが分布している。この地域の基岩は白亜紀の砂岩・泥岩で、それを覆って第4段丘を形成する礫層(6~7m)、黄土(50m)が分布している(写真-4.3.1~4.3.2)。1989年3月に発生した地すべりについて現地調査と簡単な測量により移動土塊の到達範囲の予測を実施した。



写真- 4. 3. 1 黒方台地すべり全景



写真－4.3.2 黒方台地すべり頭部

2) 移動土塊運動シミュレーション

A) 解析条件

シミュレーション計算は、洒勒山地すべりと同様な方法で実施した。この地すべりは発生による土塊の移動距離が比較的に短いため、今後再滑動した場合の土塊の到達範囲を予測した。また、この地すべりはすべり面位置が明確でないため、この推定に動的計画法による臨界すべり面解析法を用い決定した。臨界すべり面解析とは、与えられた地形、地質、土質条件等に関して最小の安全率を与えるすべり面を安定解析手法（今回は Janbu 法）を用いて探索する方法で、この解析を DP（動的計画法）理論を用いて実施している¹⁵⁾。解析に用いた地形、地質、土質条件は現地調査、測量等により推定した。臨界すべり面解析の結果を図－4.3.1に示す。また、移動土塊の運動シミュレーションに用いた物性値は臨界すべり面解析に用いた値を採用した（表－4.3.1）。

表－4.3.1 解析に用いた物性値等

地すべり名	格子点数	格子幅	単位体積重量	摩擦力	粘着力
黒方台	16 * 13	20 m	1.9 tf/m ³	10°	3 tf/m ²

B) 地すべり移動土塊の拡散形態及び滑動時間と滑動速度

シミュレーション計算による移動土塊の拡散状況を図－4.3.2に示す。ここで実線は滑落後、破線は滑落前の到達範囲を示す。この図から土塊の拡散範囲がさらに50m広がっていることが分かる。移動土塊は平均速度 2.2 m/sec で、発生後23秒後に停止している。また、発生前及び

解析後の鳥瞰図及び断面図を図4.3.3～4.3.5に示す。末端部すべり面形状が厚さ7～8mの礫層に規制され水平になっているため、土塊の拡散範囲が比較的狭くなっている。しかし、この結果は、臨界すべり面解析に用いた静的物性値が土塊の再滑動時に作用するとの仮定で解析しているため、拡散範囲はさらに広くなることが予想される。今後この点について検討する必要がある。

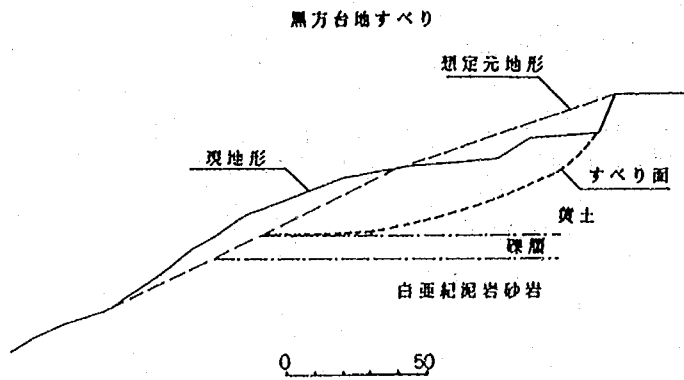


図-4.3.1 DP法により求めたすべり面

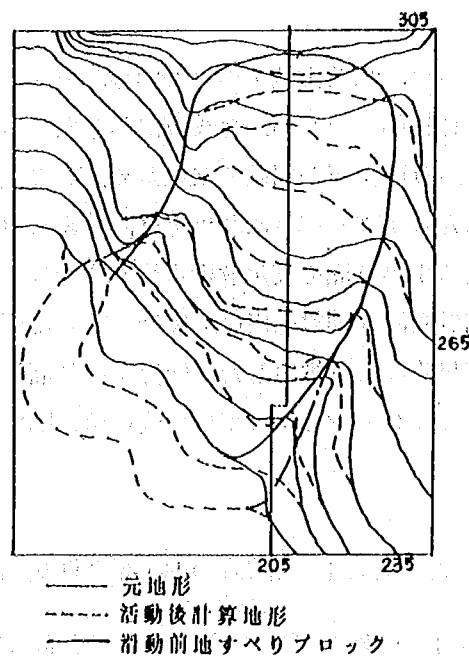


図-4.3.2 平面図

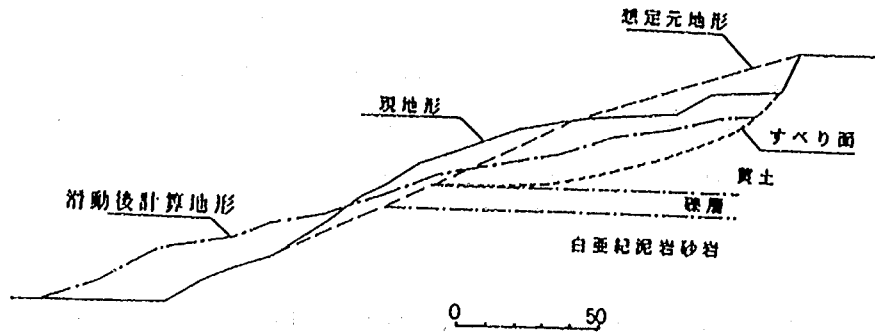


図-4.3.3 断面図(滑動後地形)

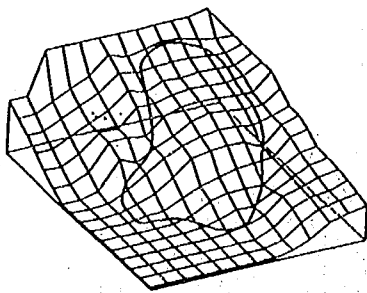


図-4.3.4 滑動前地形

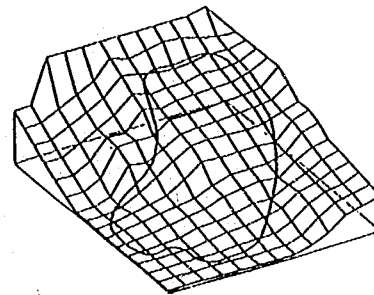


図-4.3.5 滑動後地形

4-4 臥龍寺地すべり (Wolongsi Landslide)

1) 概 況

臥龍寺地すべりは宝鶏の中心から東に10 km 余りの渭河と左支川の清河の合流する西側に位置し、地すべり地の後縁部は渭河の第4段丘に、前縁部は氾濫原にあたり、西を刘家台地すべり、東を南坡君地すべりに挟まれている。地すべり発生の30年程前にクラックが発生するなどの徴候が見られていたが、長雨の後の1955年8月18日8:00~8:30に龍海線の距離程で1,238 k+182~1,238 k+798の616 mの区間で大規模地すべりの発生に至った。この地すべりによって、地すべり下端に斜面に平行(東西)に走る龍海鉄道は、南に約110 m押し出されたほか、多数の家屋に被害が発生した。地すべり規模は長さ645 m、幅650 m、最大地すべり層厚88.6 m、面積約33万 m^2 、土塊量約2,000万 m^3 で規模が大きいことから、鉄道線は被災前の位置での復旧をあきらめ、押し出された位置に敷設され現在に至っている(図-4.4.1、写真-4.4.1)。その後1977年にも小規模な地すべりが発生し、2名の使者と農家被害が発生した。

2) 地質条件

地質は前記の西吉や洒勒山などと違い、黄土の二次堆積物(黄土質土)が主である。図-4.4.2に示すように、地すべり上部は更新世に形成された97 mの厚さの黄土質土(黄土類黄土)からなり、下部は54 mの厚さの砂混じり礫層と粘土層からなる。この下には新第三紀の赤色粘土層が

あり砂混じり礫層を挟んでいる。1955年からさかのぼって約100年前に古い地すべりが発生しているが、今回の新しい地すべりを発生させた原因は、第一にこの三角地域に大量の地下水の供給があったこと、第二に旧地すべりのすべり面や破砕面のせん断強度が低下しており、すべりやすくなっていたこと、第三に旧地すべりの前面が河川の侵食作用が甚だしく前面の抑止力が失われたこと、第四に降雨の影響があったことなどが挙げられる。

3) 対 策

地表水排除及び地下水面を低下させることは、臥龍寺地すべりの安定性を増すために最も効果的な対策工であると考えられた。地すべり土塊から排水ボーリングにより地下水を抜くことは中国においては大変難しいため、地すべり背後の排水工と地下水面低下のためのトンネル工が採用された。

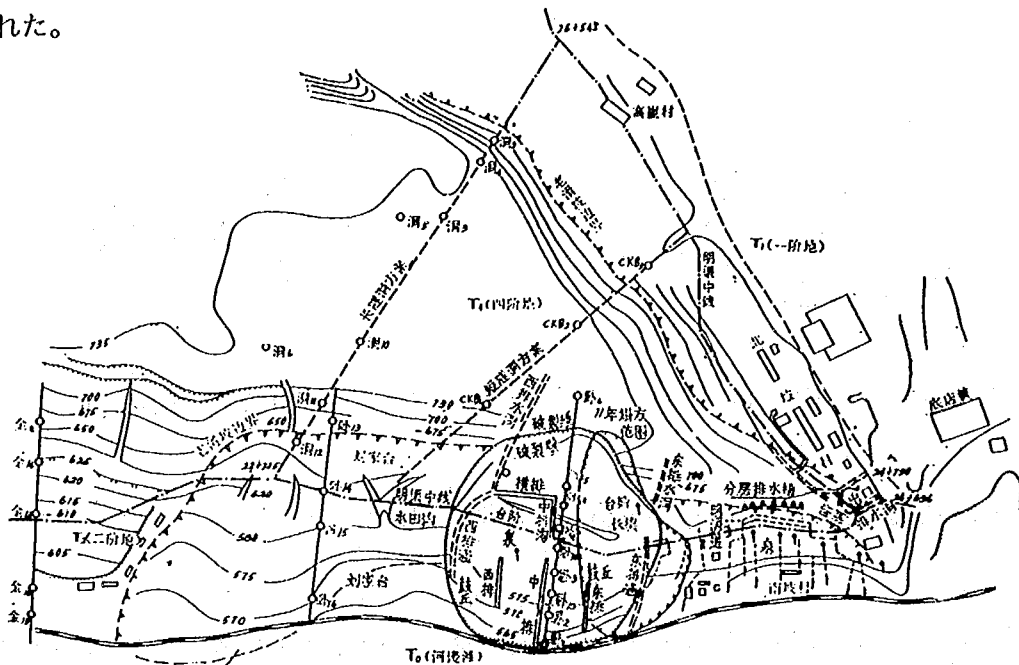


図-4.4.1 臥龍寺地すべり平面図

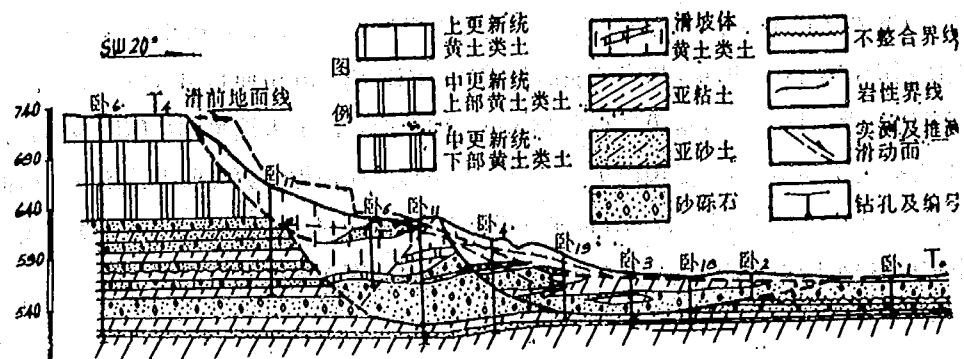


図-4.4.2 臥龍寺地すべり断面図

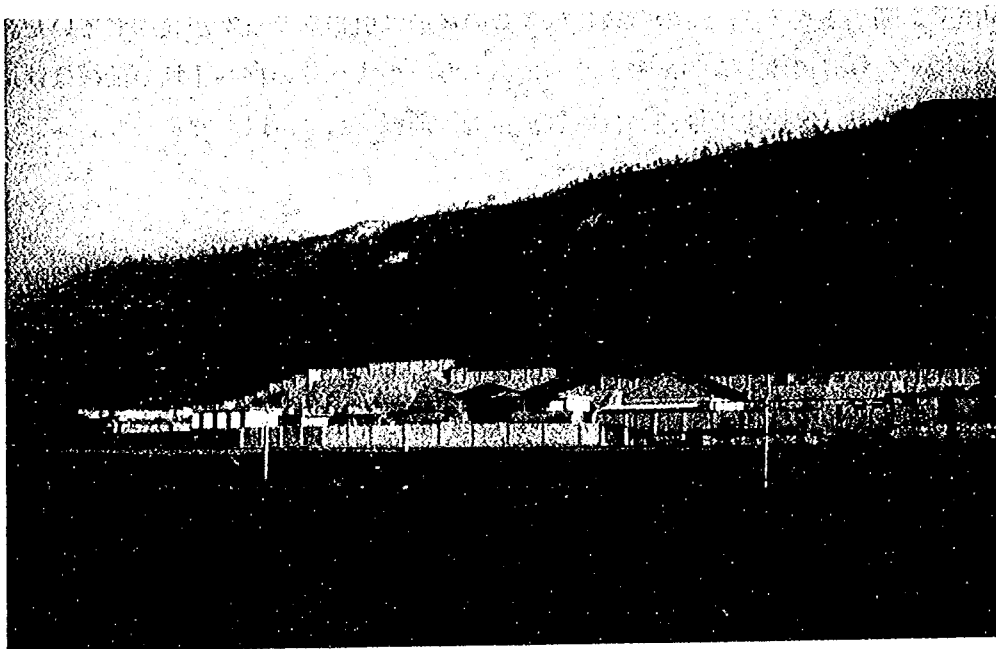


写真-4.4.1 臥龍寺地すべり全景

4-5 葡萄園地すべり群1号地すべり

(No.1 Landslide of Putaoyuan Landslide Group)

1) 概 況

葡萄園地すべり群は中国龍海線の宝鸡と天水の間の距離程でK 1,362+500 m～K1,363+800 mに位置している(図-4.5.1)。これらは断層や崩落土塊から発達した旧地すべり群で、1947年に宝鸡から天水への鉄道が建設されて以来、地すべり活動が毎年のように発生し、運休を余儀なくされた。

この地すべり群は渭河左岸に位置する7つの地すべりからなり、鉄道沿いに長さ1.3 kmの範囲にわたって連続的に分布している。この中で1号地すべりは、葡萄園地すべり群の東端に位置する旧地すべりで1985年9月17日0時35分に突然高速で発生した。斜面下部にあった高い盛土は70mの長さにはわたって破壊され、上部盛土と鉄道の上部構造物は約100 m離れた所まで投げ出された。しかし、元の鉄道の位置には元の地面から深さ12mの所に低い高まりが残った。また、鉄道の両端に約40mの長さの変形が生じた。幸い乗客をのせた列車は地すべり現場からわずか300 m離れた所で止まり難をのがれたが、この地すべりにより通行は66時間に渡って運休した。地すべりの痕跡から、この地すべりの活動初期において、盛土の一部は受働状態にあったことが分かる。地すべりは山体の地すべり土塊と押し出された土塊の2つの部分に分けられる。山体の地すべり土塊の東側では元のガリー谷が完全に埋められただけでなくガリー谷の出口には舌状の堆積物が形成され東側へつき出した。盛土の斜面では西側に2, 3の羽状の引張～せん断クラックが、東側には圧縮が見られ、それらの高さは同じであった。

上記のことに基づき、盛土のせん断部(すなわち地すべりの出口)は基礎地盤から17.5m上であると判断された。地すべり地(山体の地すべり、押し出された盛土、第一段丘を覆った地すべり堆積域を含む)は長さ約350 m、幅約100 m、すべり土塊の総土量は約300,000 m³、滑落崖の

高さ10mで(図-4.5.2), その背後には多数の後退性引張クラックが発達していた。最も離れたものは地すべり冠頂部から60mのところにあった。地すべりの移動土塊の前縁は鉄道線から130m河側にあり、段丘上の堆積層は厚さ数mで、前縁でも3m以上であった。

2) 地質状況

発生前は後部の冠頭部はあまり明瞭ではなかったが旧地すべりの外形は比較的明瞭で、西側では約1mの高さの冠頭部が、東側にはガリー谷がほぼ南北方向に走っていた。1984年の雨期に約100mの長さの弧状クラックが地表面に何度か見られ、馬蹄形の境界が形成された。また、東斜面下端には多くの箇所にて1年中湧水がみられた。そこで1984年に調査ボーリングが実施され、3つの新しいすべり面が確認された。このとき鉄道には、側溝に2、3のクラックが発見されたが、他に兆候は見られなかった。

1号地すべりの層序を図-4.5.3に示す。葡萄園も臥龍寺地すべりと同様、黄土の二次堆積物(黄土質土)からなっている。早期洪積黄土層の上面がこの地すべりのすべり面であることは明かである。地すべりの誘因は降雨である。この地域の年平均降雨量は567.6mmであるが、1984年には738.7mmに達した。これはこの地域では中華人民共和国設立以来最大の年間降雨量であった。地すべり発生前の9月17日には、すでに1985年の累積降雨量は522.6mmに達した。これらの雨が地すべりを高速度で滑らせた。また土塊の水理地質的な性質すなわち、低い透水性と高い含水比が地すべりに影響を与えたと考えられている。

3) 調査

調査によると、この地すべりには2つの典型的な特徴がある。

- (1) 盛土がせん断され100m離れた所まで投げ出された。
- (2) 地すべりが発生した後、元の鉄道線があった位置に12mの深さの弧状の高まりが形成された。

これらの現象から中国では以下のように分析している¹⁶⁾。山体のすべり面の強度は浸透水や降雨によって比較的低い状態にまで弱められた。これによる滑動力は前面の盛土による滑動抵抗力

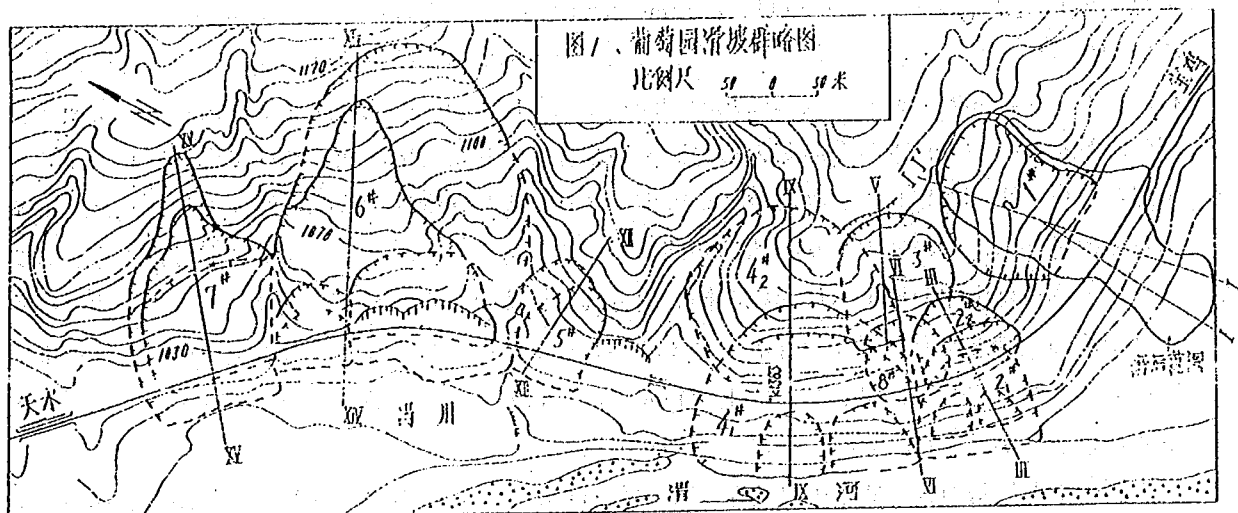
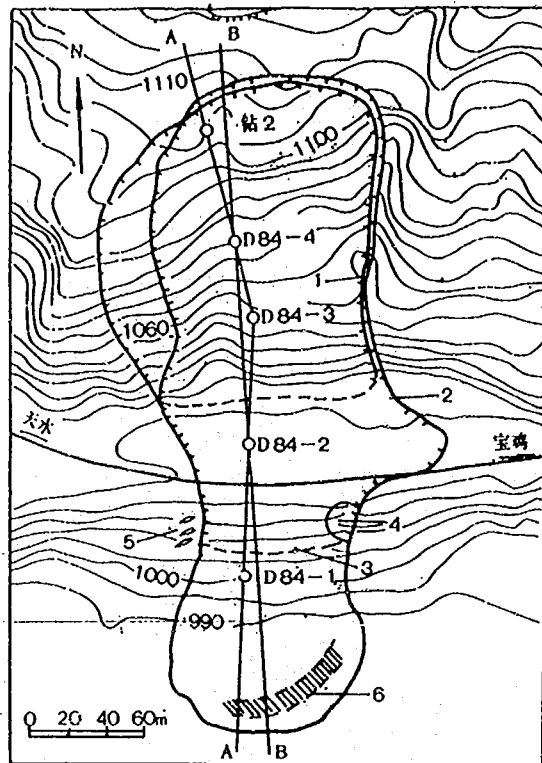


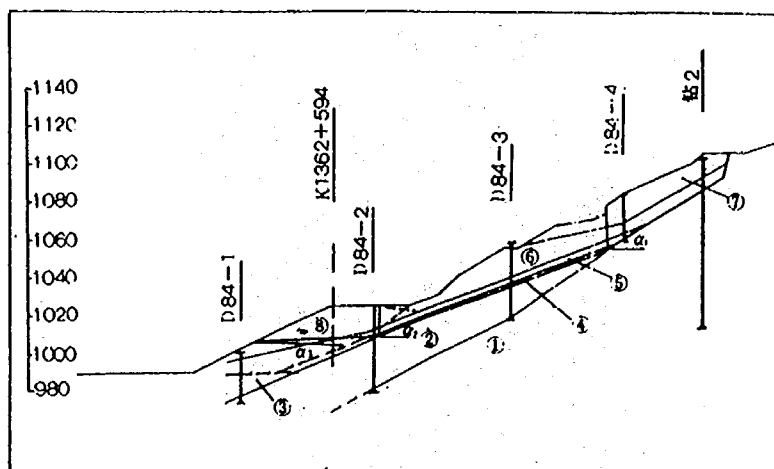
図-4.5.1 葡萄園地すべり群平面図

と平衡を保つことができず、突然地すべりが発生した。さらには、盛土上部に、その中にある弱面の摩擦抵抗力を超えるある種の「衝撃」が働き、ある初速度を獲得し速く離れた所まで土塊を移動させた。

現地の状況を写真－4.5.1，4.5.2に示す。



図－4.5.2 葡萄園1号地すべり平面図



図－4.5.3 葡萄園1号地すべり断面図

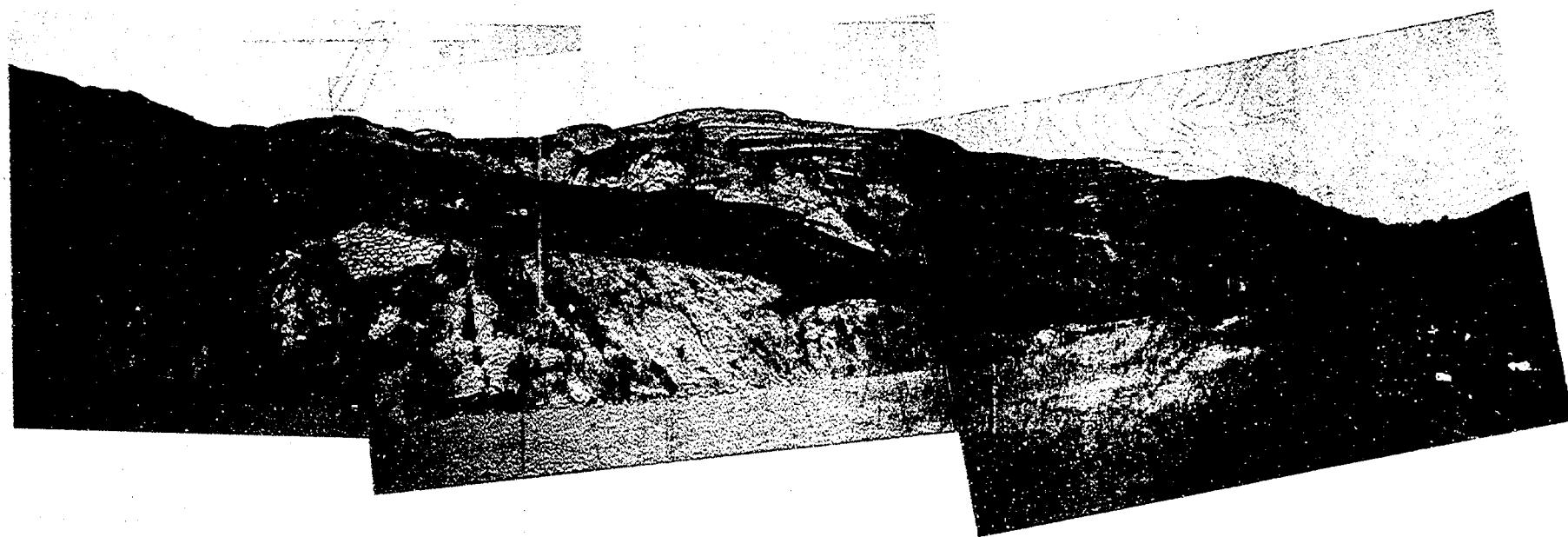
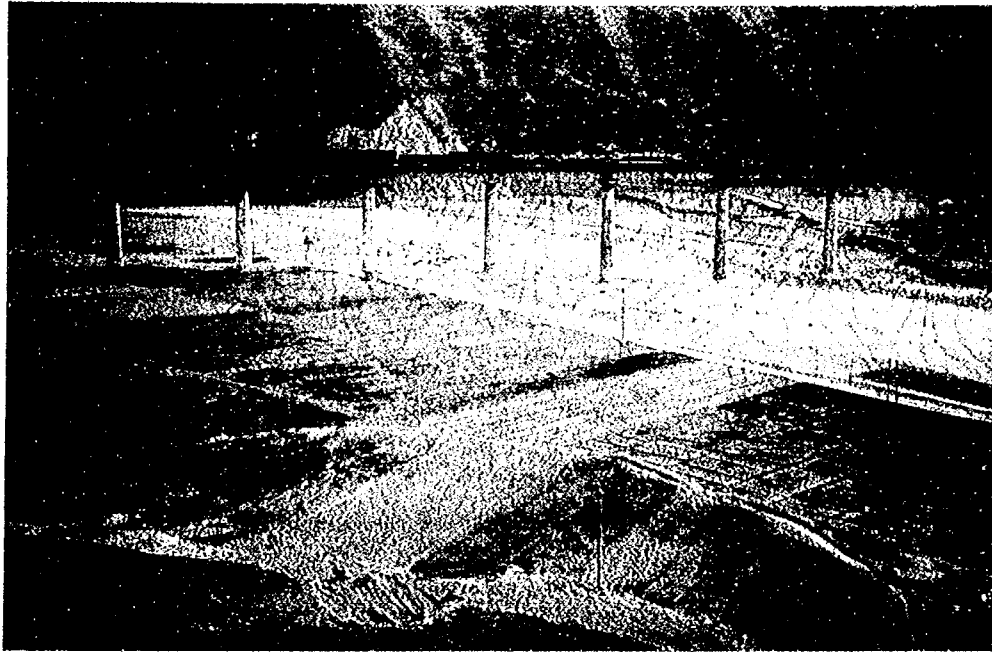


写真- 4.5.1 葡萄園1号地すべり全景（平坦部は軌道跡）



写真－4.5.2 葡萄園1号地すべりの拡散した移動土塊と新設された高架橋

4－6 龍海鉄道K 1357，K 1358 地すべり

(Longhai Railway Line K1357, K1358 Landslide)

この2つの地すべりは、葡萄園地すべり郡から東へ5～6 kmの渭河左岸に位置する(図－4.6.1)。

1) K 1358 地すべり

この地すべりは、1963年9月17日午後5時0分に発生した崩壊性の黄土の地すべりである。地すべりの総土量は400,000 m³である。この地すべりで鉄道線が400 mにわたり破壊され黄竜村の農民11人が死亡したほか、応急工事の間に1人の兵士が死亡した。鉄道輸送は合計169時間にわたって中断された(写真－4.6.1)

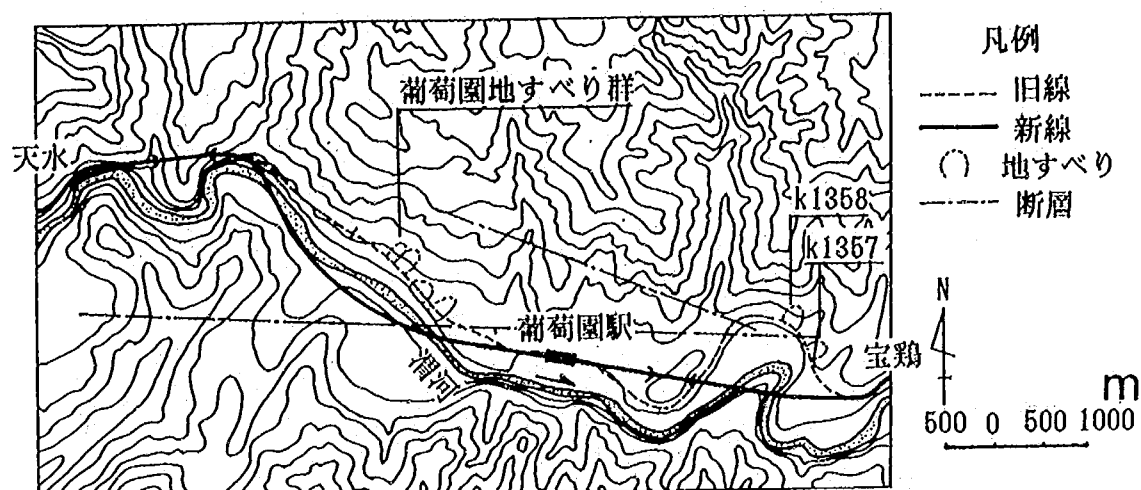
2) K 1357 地すべり

この地すべりは、K 1358と同じ崩壊性の黄土の地すべりで、1981年11月29日午後3時46分に発生した。地すべり土量は600,000 m³である。地すべりは、渭河を短時間ではあるが閉塞し、明りトンネルを全長100 m(全壊73.7 m)以上、鉄道線を200 m以上破壊した。そのため、鉄道輸送は314時間14分にわたって中断され、とりわけWulumuchi から Zhenghou への乗客を運んでいた列車がこの災害に直面したが、300 m手前で停止した。

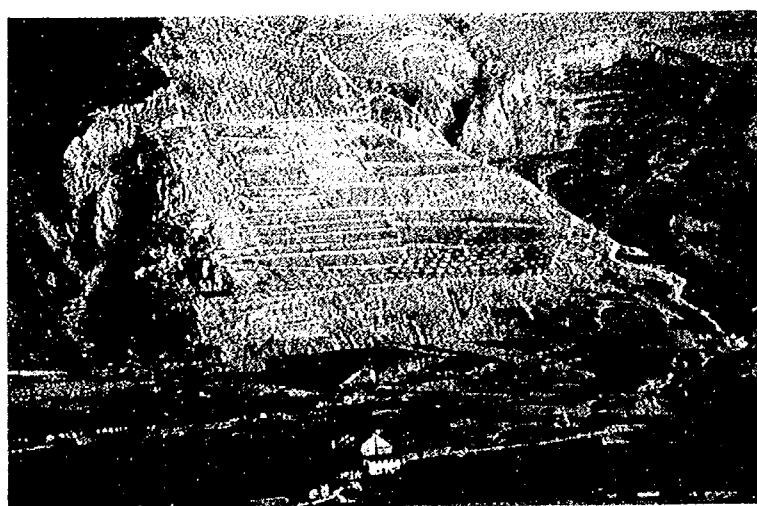
10月17日にはすでに長さ18 m、幅10～20 mmのクラックが発見されており11月28日には幅140 mmに達していた(写真－4.6.2)。

この2つの地すべりと葡萄園地すべり群を回避するため、この地域の鉄道線は1984年に高架

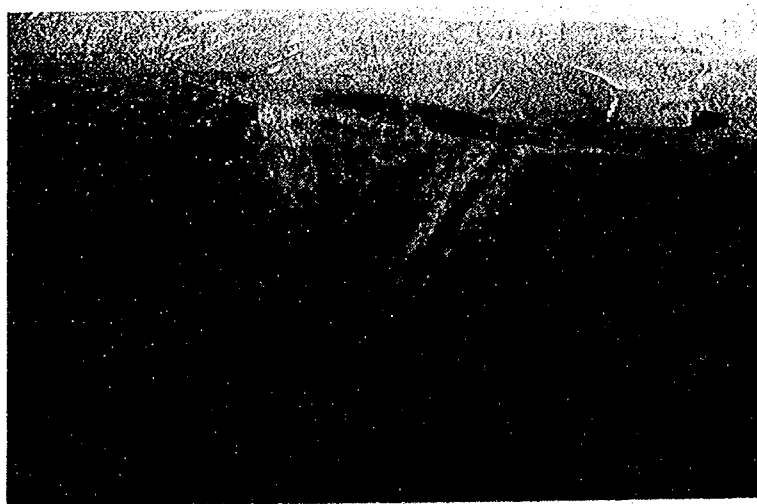
橋及びトンネルにより路線変更が行われた。その状況を図－4.6.1に示す（写真－4.6.3）。



図－4.6.1 龍海鉄道葡萄園駅付近の平面図



写真－4.6.1 K1358 地すべり全景



写真－4.6.2 K1357 地すべり全景



写真－4.6.3 K 1357, K 1358 地すべりと新設された高架橋

4－7 韓城発電所地すべり（Hancheng Landslide）

1) 概 要

韓城地すべりは中国でも規模が大きく有名な地すべりの1つである。この地すべりは陝西省韓城市の韓城電力プラントに位置し、電力プラントと隣接する横山の東側斜面からなる。変状を受けた地域は約0.6 km²で、地表面のクラックや建築物の変形から分析し、電力プラント横山の地域は大きな地すべりによって移動されたことがわかった。北の境界は大きなガリー谷であり南の境界は鉄道の距離程でDK3+700の小さなガリー谷である。また、西の境界はメイン工場西側の制御室付近である。地すべりは長さ約300 mの横山と滌水河の段丘を含んでいる。（標高は445 m～425 m）。この発電所は坑口発電を行っており、東斜面（横山）の地下の石炭にエネルギー源を求めている。ボーリング調査、孔内傾斜計観測、音声発生装置（AE）の観測により、現在最も深いすべり面は斜面部分で深さ約80 m、プラントで約20 mであることが分かった。地すべり規模は長さ約400 m、幅約300 m、地すべり深度約80 m、土塊量約500 万m³である（図－4.7.1, 4.7.2, 写真－4.7.1）。

2) 地質状況

横山の基岩は石炭紀～二疊紀の砂岩、砂質頁岩及び2, 3層の石炭層からなる。基岩頂部は第4段丘で覆われこの深さは約60 mである。このうち上部は圧密された黄土であり下部は厚さ4 mの礫層である。基岩の走向は斜面の走向と平行でN20°Wであり、東から西へ12～4°で川側へ傾斜している。丘陵前部の段丘では基岩はほぼ水平であり、この中の地下水は豊富ではない。斜面は石炭層が採掘されるまでは基本的には安定していたことから、今回の深い地すべりは地下の石炭採掘によって発生した新しい地すべりであることが推測される。今回の地すべりの移動距離は極めて短く、悲劇的な結果には至らなかった。斜面には地形的に多数の旧崩積土すべりや浅い岩盤すべりが見られた。紅旗運河と鉄道の建設により、旧地すべりの末端の支持が弱められ、その後の石炭の採掘によって、これらの地すべりが再活動したものと考えられる。



写真- 4. 7. 1 韓城発電所地すべり全景

電力プラントの近くの石炭層が採掘された後、斜面やプラント、建築物への徴候が明かとなった。採掘は東から西へと行われ、斜面の変形も年々東から西に向かって悪化した。第3号石炭層は鉄道の東側にあったが、1985年4月中旬には掘り尽くされた。プラントと鉄道を守るため鉄道西側の石炭層の採掘は中止された。1984年9月から10月に鉄道の擁壁及びプラントにクラックや膨らみが発生した(写真-4.7.2)。1985年3月から4月には、斜面や擁壁、プラントの変形はさらに悪化した。特に、石炭乾燥庫と煙突の東側の道路、メイン建築物下のケーブル溝に発生した亀裂や隆起はさらに進んだ。地すべりの出口や隆起の方向は南北である。プラント内の多くの工場は変形やクラックが発生し、大変危険な状態になった。このため、1985年5月、多くの著名な地すべり専門家が調査と対策のために集まり、以下のような地すべり機構の分析と対策方法の提案がなされた。

- (1) 石炭採掘による空隙の崩壊が溜水川層の上の岩塊を緩めた。そして岩塊は東から西へ押し出され、構造的な亀裂面や小さな層面断層に沿って土塊が移動した。プラントや斜面の変形は許容できる限界に達しており、もし有効な対策工法がただちに実施されなければ、プラントのいくつかは破壊され、電力供給は停止する可能性が高い。
- (2) 第一に、プラントのメイン工場に作用している水平推力を弱める対策をとる必要がある。すなわち、建物につながるベルトコンベアー用通廊を取り除くことである。これによって建物に

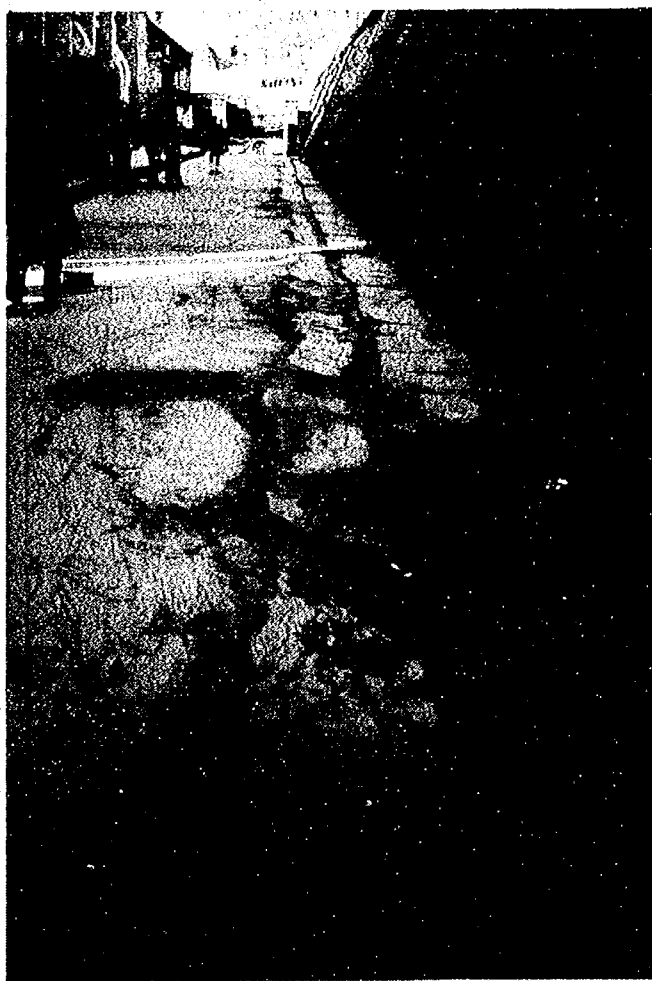


写真-4.7.2 韓城発電所内に発生したクラック

働いている力を弱め通廊を正常な状態に戻すことができる。第2に地すべり頭部の土塊を雨期前にある程度排土する必要がある。これにより滑動速度と地すべりの推力を低下させることができる。

- (3) 応急及び永久対策工の設計や危険状態の予告に必要な情報を得るため地すべりの調査試験を実施し、監視・警告施設を設置して、空間的な観測網を整備する必要がある。
- (4) 雨期の工事となるため、鉄道沿いに警報システムを設置する必要がある。

3) 対 策

専門家による上記の提案に基づき、関係機関が研究を行い1985年5月下旬、この提案の実行が決定された。建物に伝達されている推力を軽減するため、地すべり頭部の排土(100万 m^3)が実施され、同時に調査観測¹⁷⁾が行われた。幸いにも1985年には雨期が遅れたため電力プラントの危機状態は回避された。プラント内の建物にとって基礎地盤の変形には許容限界があるため、地すべり抑止杭(応急対策として41本、永久対策として、さらに32本実施された)が地すべり末端に施工され、推力は軽減された。また、局部的に抑止壁工も実施された。杭工の形状は断面が3.5×5.5 m、長さ37mと非常に大きく施工は支保工を用いて人力で実施されている。融雪期にプラントの変形が増大したものの、現在では大部分の工事が完成し、地すべりは基本的には安定に至った。今回のこの対策は、37日間のプラント停止はあったものの基本的には電力プラントを稼働させながら実施された。この地すべり地には、施工後の杭の挙動を捉えるため写真-4.7.3に示すように杭頭部に移動杭を設置し、水平及び垂直方向の変位の観測を実施している。なお、排土面には後に林檎の木が植栽され緑化工が施された。

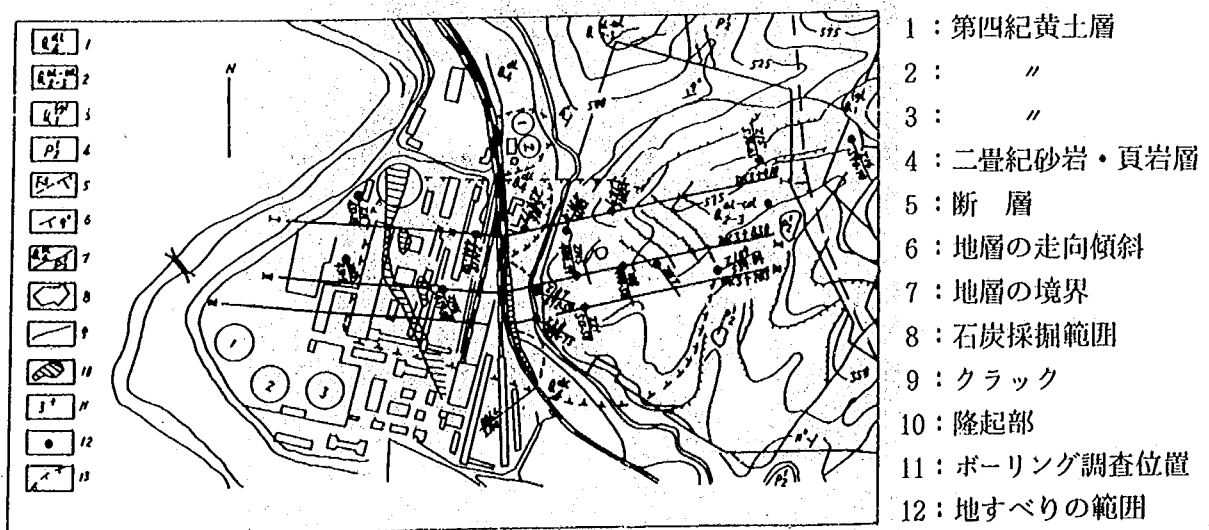
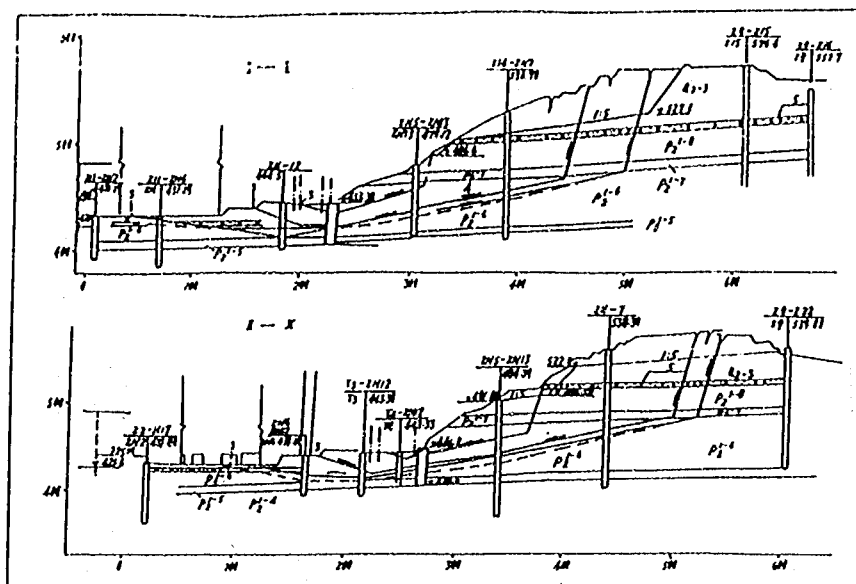
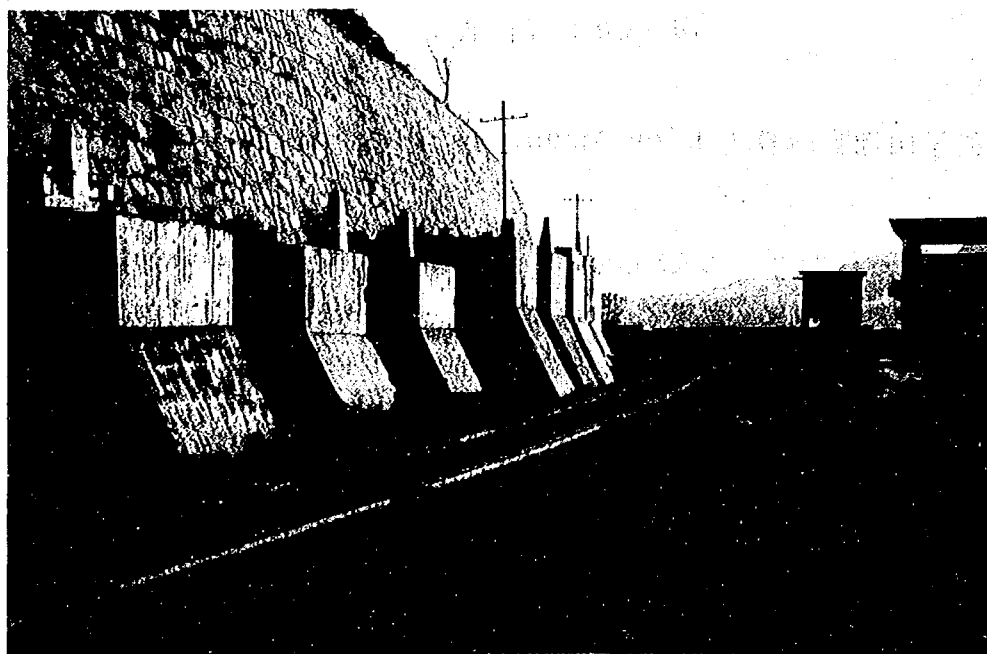


図-4.7.1 韓城発電所地すべり平面図



図－4.7.2 韓城発電所地すべり断面図



写真－4.7.3 韓城発電所地すべりの抑止杭頭部の移動杭

5. 中国の黄土地帯以外の地すべりの事例

黄土地帯以外の地すべり地についても今回調査を行った。その概要を以下に紹介する。また、調査位置図を図-5.0.1に示す。

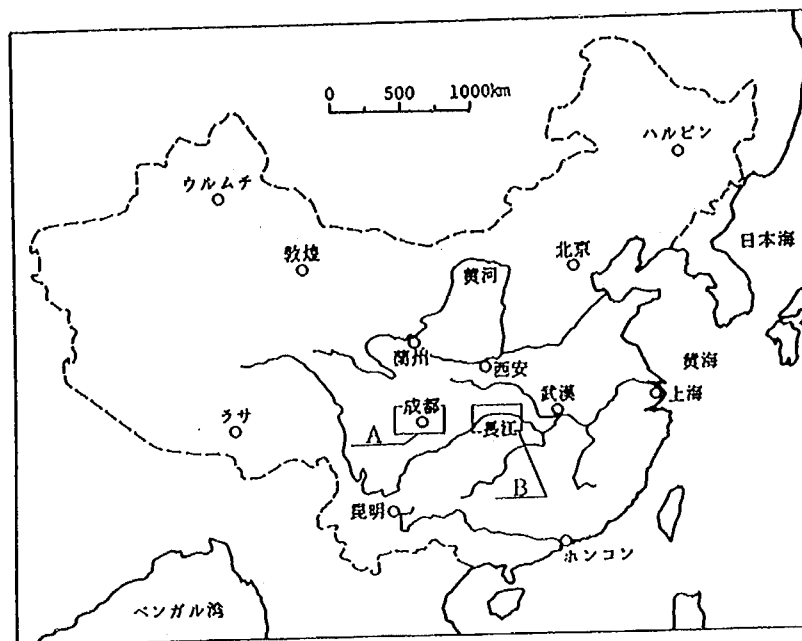


図-5.0.1 調査位置図

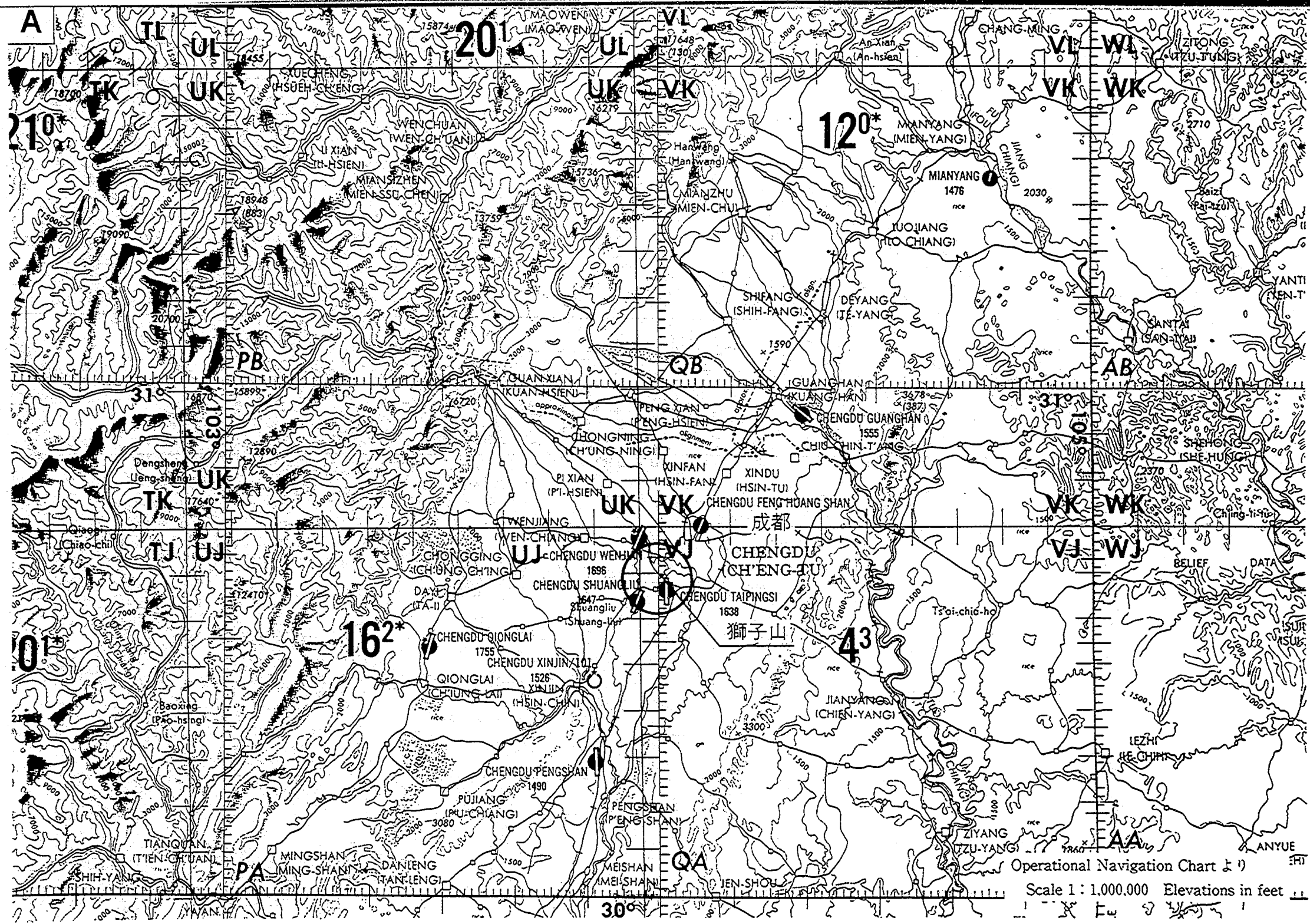
5-1 獅子山地すべり (Lion Mountain Landslide)

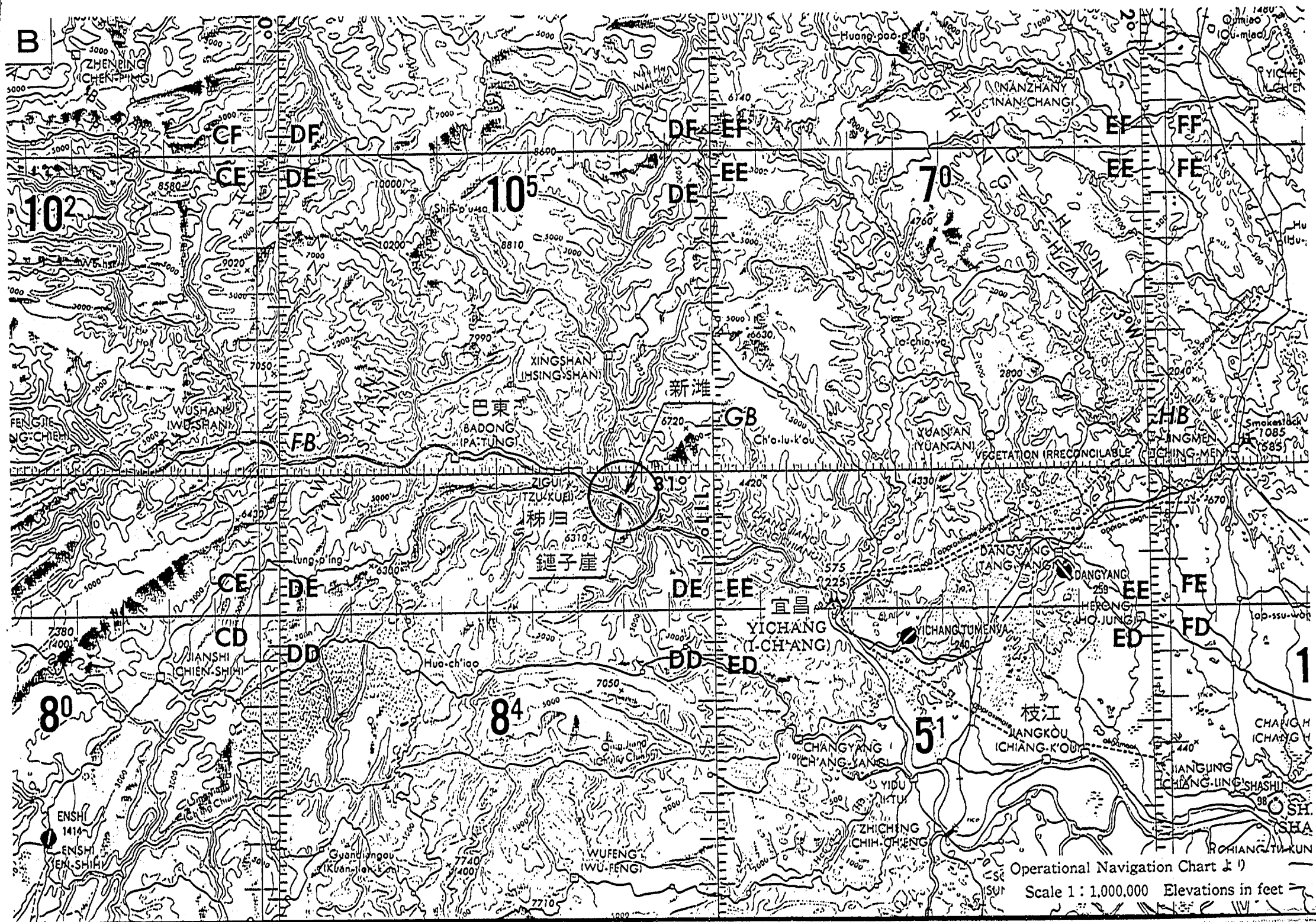
1) 概況

獅子山地すべりは四川省の成都市の近郊で、成昆鉄道のK18+468.74からK19+941.74の1,473 mの区間に位置する。この鉄道区間は1958年7月に建設が始まり、この時斜面は急な勾配(1:0.2~1:0.5)に施工されたため、崩壊が発生した。1959年3月に軌道は完成したが、建設中に多くの崩壊が発生したため斜面勾配を1:1~1:1.5として1959年6月に工事は完了した。しかし、その年の7月の大雨の後、地すべりが多数発生するに至った。そのうち、大きな地すべりは10箇所以上発生し、その土量は320,000 m³に達した。被害の大きかった1号と4号地すべりでは頁岩層のすべりで、鉄道が隆起し、軌道は傾き転倒した。成都粘土層は泥となって斜面を流れ出し、また切土部に排水状態の悪化から、池が形成された。そのため鉄道は2カ月以上にわたって運休した。この切土によって1959年から1962年にかけての4年間に様々な規模のすべりが60回以上にわたって発生した。^{(18), (19)}

2) 地質条件

獅子山地すべりの上部は成都粘土層(5~8 m厚)、下部は雅安礫層(6~10 m厚)、さらに





その下部は白亜紀の粘土質頁岩から形成されている。白亜紀の粘土質頁岩中には 1.0~1.5 m 間隔の節理がよく発達している。

3) 対 策

簞子山地すべりは19年間にわたって対策が行われた。主な対策工事は以下に示すとおりである。これらの対策工については第7章において紹介する。

地表水排除工	5,690 m	
縦断石積み排水工	1,300 m	
横断石積み排水工	5,440 m, 199 区画	
抑 止 壁 工	5,400 m	
抑 止 杭 工	212.3 m, 18 本	
被 覆 工	81.32 m	
アンカー隔壁工	135 m	
排 土 工	676,700 m ³	
練石積み工	47,300 m ³	
空石積み工	45,700 m ³	
鉄筋コンクリート工	827 m ³	
コンクリート工	331 m ³	総工事費 800 万中国元

図-5.1.1 に簞子山地すべり類型と分布図を示す。また、現地の状況を写真-5.1.1 に示す。



写真-5.1.1 簞子山地すべり付近の成昆線の状況

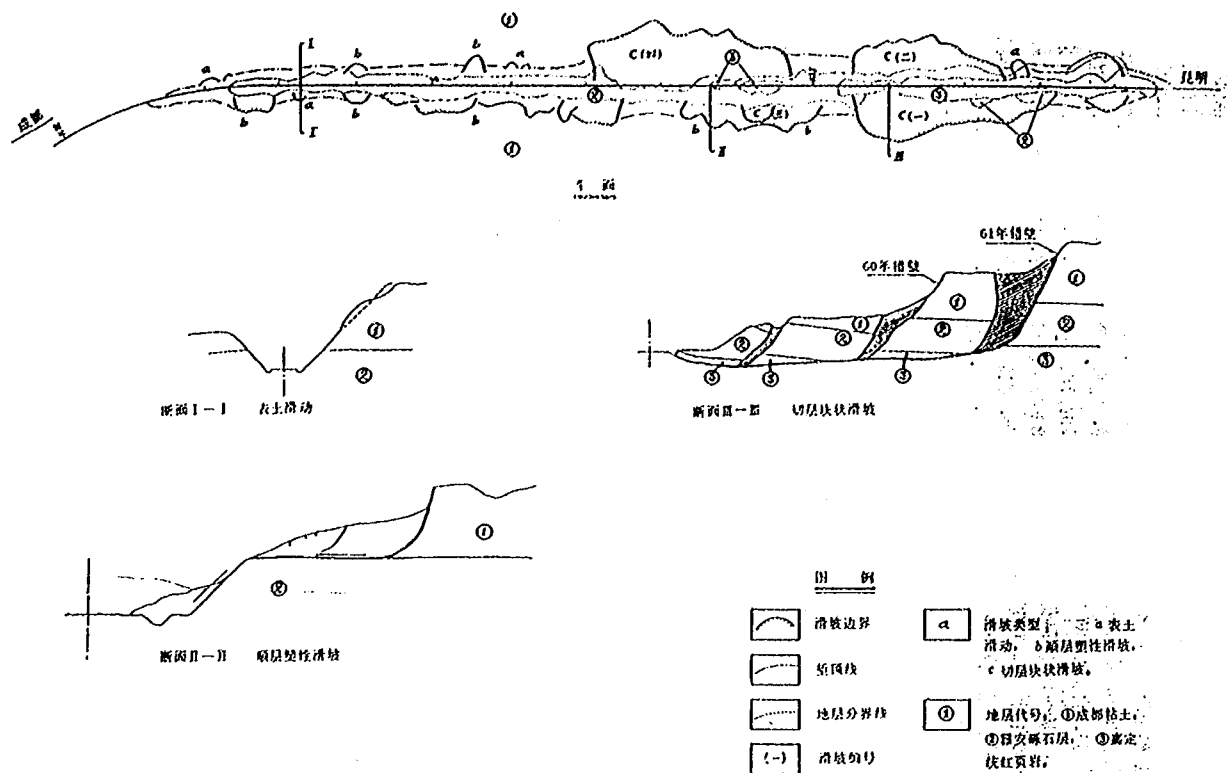


図- 5. 1. 1 獅子山地すべり各類型地すべりの分布図

5 - 2 新灘地すべり (Xintan Landslide)

1) 概 況

新灘地すべりは1985年6月12日午前3時45分に発生した。この地すべりは中国長江三峡の湖北省秭帰県新灘町に位置する。高速なすべり土塊が標高910mの高さから長江(水位標高62.5m)に落ち込み新灘町は全滅した。流出した300万 m^3 の土砂は長江の川幅の3分の1をせき止め(長さ250m, 幅93m), 高さ54mの段波を発生させた。また、この波は上流側15.5kmの資原市から下流側26.6kmの山斗坪までの広い範囲に達し、長江航路は12日間にわたって航行不能の状態になった。地すべり規模は、長さ1,900m, 幅は下部で約700m, 上部で約400m, 厚さ約40~45m, 面積0.75 km^2 , 地すべり総土量30,000,000 m^3 に及んでいる。湖北省岩崩滑坡研究所は観測データの分析により発生の予告をし、これをもとに迅速な避難(1,300人)を実施したため、その11時間後に地すべりは発生したものの、新灘町では負傷者は出ず、また運航中の船舶も避難し被害は発生しなかった。

2) 地質状況

この地すべりは旧地すべりが再活動したものである。すべり層は頁岩の崩積土からなるが、西側のシルル紀頁岩、デボン紀砂岩、二疊紀石灰岩の崖に対して谷方向に傾斜する複雑なくさび状の構造を示す。ボーリング調査によって、発生前の蔣家坡丘陵の斜面は岩片や土石を伴う旧地すべりの石灰岩岩片などからなっていることがわかった。これらが上部斜面に地表層を構成する崩積土である。この地区は2本の活断層の間に位置しており、また石炭層が採掘によって空洞になっているため、石灰岩の切りたった壁は、しばしば、岩崩落を起こし、頁岩の溝と緩い斜面の上に堆積した。非常に厚いこの山崩れの堆積物は頁岩の風化層に沿って滑動を生じた。ここでは歴史的に、何回も崩壊と地すべりが発生し、長江の航路を分断している²⁰⁾。

この地すべりは大まかに上部と下部の2つに分けることができる。上部の末端は、標高480～500 mの高さにあり、下部は東、中、西の3つのブロックに分けることができる。東のブロックは一体となった地すべりである。西のブロックはほとんど土石流となっており、中間のブロックは比較的規模が小さい。滑動のプロセスは、上部で山崩れによって負荷が加わり、まず滑動が始まり2年間の時間を経てすべり落ちた後、下部を長河に向かって押し動かした²⁰⁾。

調査²¹⁾によって、1960年代までに、斜面の変形や亀裂の状況はしだいに明らかとなった。斜面は下方に滑り出そうとし、一連の斜め方向の平行したクラックが発生した。このクラックは深いトラフ構造を反映している。上部斜面は蔣家坡の近くで止められ放射状の引張クラックを伴う縦長のふくらんだ高まりを形成した。調査中、長さ270 mの亀裂が蔣家坡の東前面で95 cm沈降していることが明らかとなった。1982年5月までのYVPO(長江峽計画局)の長期観測データによると観測点A3とB3の累積変位は1981年までの3年間で2,119 cm、1982年11月までの4年間で2,625 cmに達したとされている。蔣家坡下部斜面では明かな変位は認められなかった。

地すべりの前兆を以下にあげる。観測データからも、現地調査からもこれらは明瞭であった。

- (1) 蔣家坡の急斜面は1985年5月中旬(地すべり発生の1ヶ月前)に激しく膨らんだ。そして上部斜面の東側と西側の引張クラックはメートル単位で拡大した。
- (2) 斜面の東側及び西側の膨らんだゾーンでの湿りが地すべり発生の3日前の1985年6月9日に顕著になった。
- (3) 蔣家坡の西側部分の沈降クラックは1985年6月9日11時30分に98 cm、次の日の6時0分に118 cm、7時に158 cmに達した。
- (4) 最初の地すべりは西側の谷に沿って起こった。そして突然西側の蔣家坡の膨らんだゾーンに広がった。6月10日4時0分に地すべりは、土石と流水をともなって700,000 m³の規模に広がった。

観測データや現地調査によって、斜面上部の大量の地すべり土塊が上部斜面と下部斜面に連なる重要な場所である蔣家坡西側の膨らんだゾーンを破壊させたことが分かった。発生後、すべり土塊は一連の弧状のクラックによって分裂した。その位置は狭いすべり土塊の滑動通路と深いトラフの幾何学的な形状と関係している。また現場ではすべり土塊が曲がった形で突き出したためにできた高まりが見られた。また、下部地すべりは小山によって東側と西側に分けられた。

3) 調 査

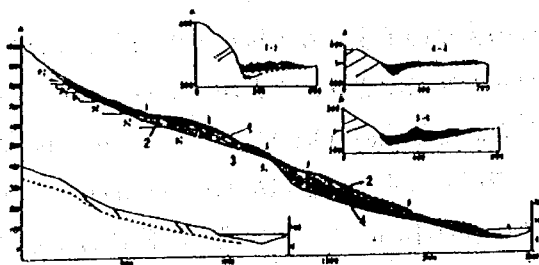
新灘地すべりの調査は1967年に始まり、地質調査、探査、長期間の観測などが順次進められた。1970年までに多くの会議が調査・解析の専門家によって開催され、現地で議論された。そして、地すべりの発生予測目的として長期の観測システムが地すべり地に設置された。一方、多くの専門家や学者はこの地すべりの土塊の移動メカニズムについて分析を始めた。

図- 5. 2. 1 ～ 5. 2. 4 に平面及び断面図を示す。また、現地状況を写真- 5. 2. 1 に示す。



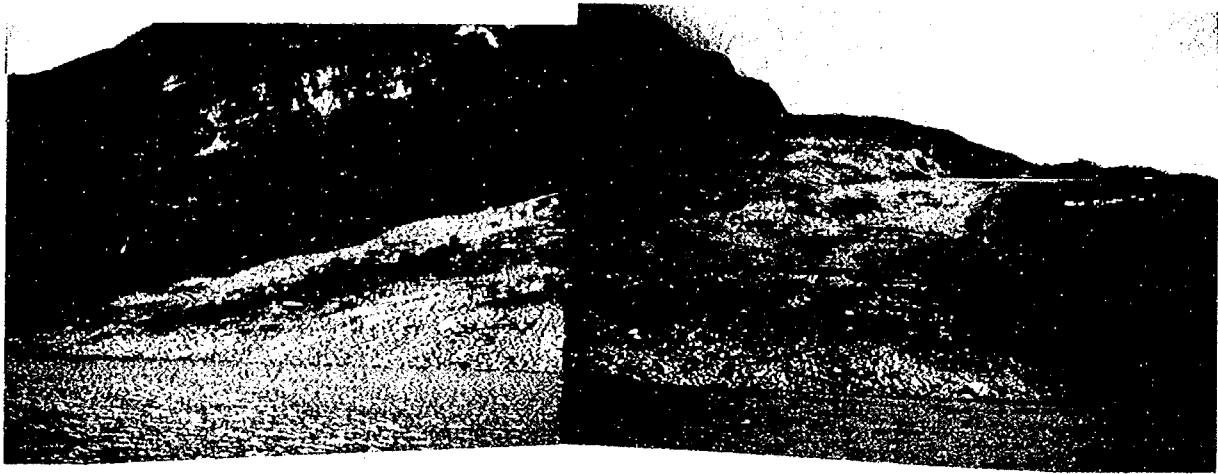
- 1 : 地すべりの境界
- 2 : 旧地すべりの境界
- 3 : 崖
- 4 : クラック
- 5 : 引張クラック
- 6 : せん断クラック
- 7 : 小山
- 8 : 盛土
- 9 : 平坦地
- 10 : 崩積土
- 11 : 土石流跡
- 12 : 泥流堆積物
- 13 : 岩石の境界
- 14 : トラフの中心線
- 15 : VLF 探査測点
- 16 : 泉
- ① : 黄家崖の崩壊
- ② : 石灰岩岩片
- ③ : 石灰岩土石
- ④ : 旧地すべり
- ⑤ : 小規模土石と大規模岩片の混在地域、蔣家坡地域
- ⑥ : 石灰岩・砂岩土石の地域
- ⑦ : 砂岩・頁岩土石の地域
- ⑧ : 小規模土石の地域
- ⑨ : 砂岩土石の地域
- ⑩ : 長江

図- 5. 2. 1 新灘地すべりの変形と崩壊

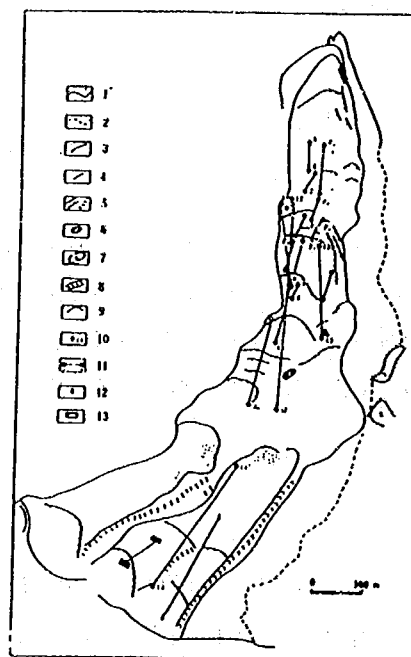


- 1 : 地表面
- 2 : 旧地すべり面
- 3 : 基岩
- 4 : すべり面
- 5 : ボーリング孔と番号

図- 5. 2. 2 新灘地すべり断面図

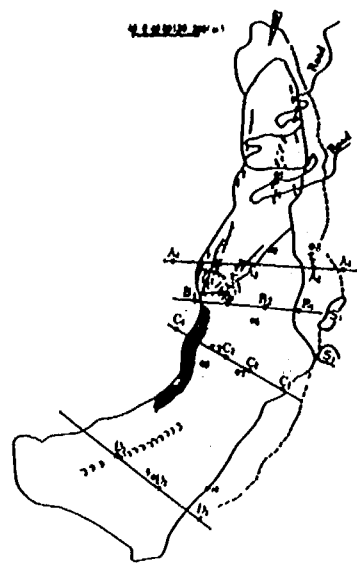


写真－5.2.1 新灘地すべり全景



- 1：地すべりの境界
- 2：旧地すべりの境界
- 3：クラック
- 4：観測点
- 5：地すべりの最初の滑動部
- 6：丘

図－5.2.3 滑動前の新灘地すべりの変形と崩壊



- 1 : 地すべりの境界
- 2 : 旧地すべりの境界
- 3 : 引張クラック
- 4 : クラック
- 5 : 小山
- 6 : 頁岩露頭
- 7 : 二疊紀頁岩
- 8 : 盛土
- 9 : 土石流跡
- 10 : ブロックと番号
- 11 : 移動方向
- 12 : 樹木
- 13 : 家屋

図-5.2.4 各ブロックの移動方向

5-3 鏈子崖危険岩体 (Dangerous Rock Mass of Lianzi Cliff)

1) 概 要

鏈子崖の危険岩体は長江を挟んで前記新灘地すべりの対岸(南岸, 右岸)の湖北省秭帰県新灘町に位置する岩盤崩壊の危険性を持った崖である。危険岩体の標高は180 m~150 mで南から北に岩体は移動しトップリング的な崩壊形態を示している(図-5.3.1, 5.3.2)。ここは歴史的にも長江三峡西陵峡の岩石崩落地域として有名であり、地震や大雨を誘因にして崩落やすべりがしばしば発生している。

2) 地質状況

この危険岩体は石灰岩の層状岩体と弱層からなる。上部は二疊紀の厚さ100 m以上の石灰岩、下部は石炭紀の石灰岩からなり、この2つの層の境界に石炭層がある。なお、この石炭層は採掘による空洞部があり、上部には薄い数10層の弱い炭質頁岩を挟む。引張応力は斜面の頂部に集中し、クラックが見られる。圧縮応力は斜面の中部に集中しているが隆起のための引張クラックが見られる。空洞になった石炭層の天盤はそれを覆う岩体の重力で全体に沈下している。斜面には50本以上もの長くて、広く、また急傾斜で、深いクラックが崖全体の構造的な亀裂に沿って発達しており、断面図上では3つの危険岩体に分けられる。すべり総土量は3,400,000 m³である(写真-5.3.1)。

- (1) 南側のT0~T6クラック(1号危険区)
- (2) 中央のT7クラック(2号危険区)
- (3) 北側のT8~T12クラック(3号危険区)

クラックの発達深度はその規模に対応している。何本かのクラックは石炭紀の地層を切っており、最大深度は 105 m に達する (T12) (写真-5.3.2)。地表での亀裂の幅は一般に 0.1~1.5 m で、最大幅は 5 m (T2)，また亀裂の最大長は 170 m である。この崖は南北長さ 700 m で東西幅 50~180 m，面積 0.54 km²，東側及び北側は 100 m 以上の断崖であり，南東側では高い山体，北西側では低い山体をなし，長江に向かって南から北に伸びている。

3) 調 査

1960年代から鏈子崖の危険岩体に関する調査が実施され，現在までに20年分以上のデータが得られ，専門家からの幅広い意見を得ている。この危険岩体が崩壊に至れば長江の通航のみならず，上下流に甚大な被害が発生することは容易に想定できるため，専門家は一貫して危険岩体の変位の観測システムを強化し，また対策工の研究・実施をできるだけ早く行うことを強調している。現在，岩体の挙動把握のため，主に写真-5.3.3に示すように伸縮計によりクラック幅の動きが観測されている。

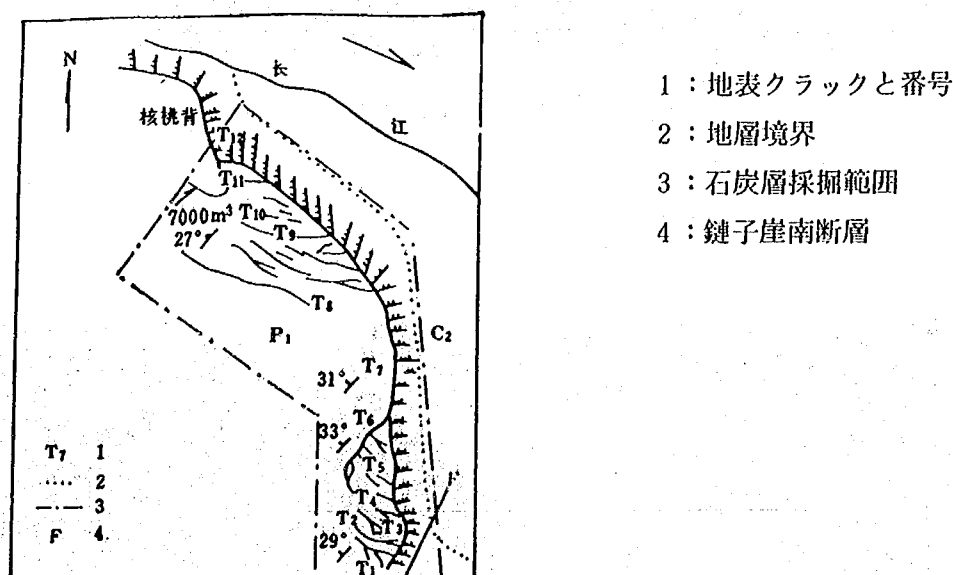


図-5.3.1 鏈子崖クラック分布図

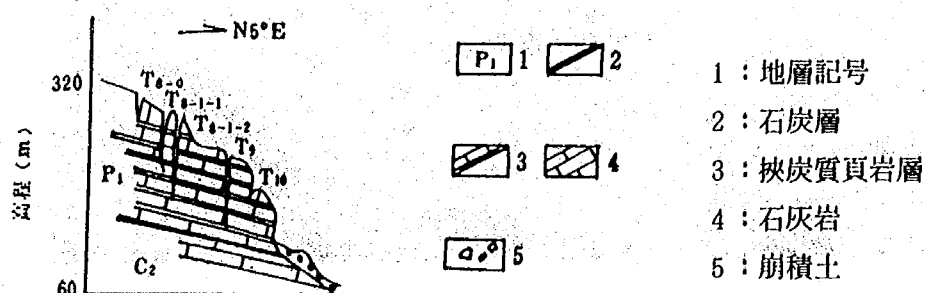


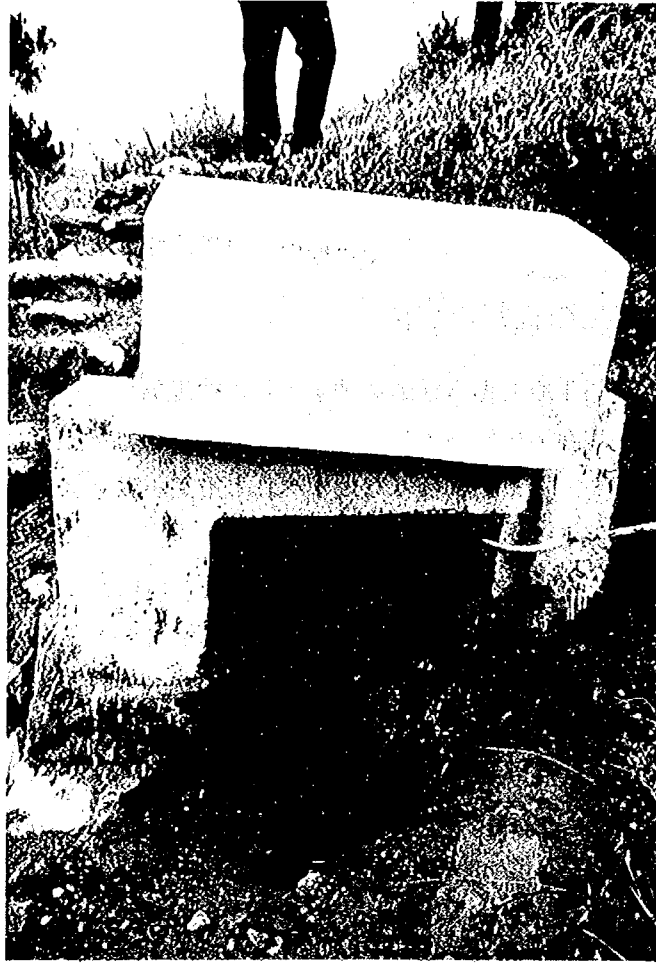
図-5.3.2 鏈子崖北端部断面図



写真－5.3.1 鏈子崖全景



写真－5.3.2 12号クラックの状況(対岸に新灘地すべりの末端部が見える)



写真－5.3.3 クラックの観測状況

6. 中国における地すべり対策工

中国における地すべり対策工については、中国鉄道出版社発行の「滑坡防治（鉄道科学院西北研究所主編，1977）²²⁾」や「特殊条件下路基（鉄道部第一設計部主編，1978）第11章滑坡地段路基」²³⁾が詳しい。また、国際シンポジウム等の資料⁷⁾にも概要が紹介されている。

ここでは、その種類や目的と現地で見られた事例について紹介する。

6-1 地すべり対策工の種類と目的

中国では重要な輸送交通手段である鉄道を地すべりの被害から守ることを中心に地すべり対策工が実施されてきている。現在では鉄道のほか、重要な道路、電力プラント、工場、鉱山施設などのインフラストラクチャーを守るために様々な地すべり対策工が実施されている。

対策工の発達の経緯は以下のようなものである。

1950年代は地すべりについての知識が充分でなかったためいくつかの鉄道、プラント、工場が旧地すべり地の上に建設され不適当な切土工事等が行われたため、多くの地すべりが再活動した。この時は石積み工や排水工、抑止壁工などの対策を行い地すべりの安定化を図った。1960～1970年代には以前の経験に基づいて鉄道やプラントの設置にあたってはできるかぎり地すべりを回避し、避けられなかったいくつかの地すべりについては建設前に対策を行った。この時は効果的ないくつかの対策工法が採用された。1962年までは主に抑止壁工が用いられ、1965年頃から抑止杭工が使われるようになり近年は多用されるにいたった。さらに1980年頃から抑止アンカー工も採用されるようになった。

中国の地すべり対策における原則として以下の項目があげられている。

- (1) 鉄道、プラント、鉱山、貯蔵施設などの位置選定に当たっては大規模地すべりや地すべり密集地域はできるだけ回避する。
- (2) 避けられない地すべりについては、その地質条件、活動範囲、履歴、安定性などを詳細に調査した上で、安定工法を採用する。
- (3) 地すべりが起きそうな地域では、十分な調査を行い行為の制限や対策工事を行う。
- (4) 現在分かっている中～小規模の地すべりについては早急に調査を行い、永久的な対策工を講じる。大規模な地すべりについては、応急対策をまず行った後、観測を行いながら、継続的に対策工事を行う。
- (5) 地すべりが急速に発生し、対策工を用いることができない場合は、観測に重点を置き必要に応じて警報を出す。
- (6) 対策工事は乾期に行う。
- (7) 対策が完了した地すべりについては対策工の効果を確認するため継続観測を行い、また維持管理に努める。

中国の地すべり対策工の種類と目的を表－ 6. 1. 1 に示す。

表－ 6. 1. 1 中国の地すべり対策工（Wang 1985）

目 的	工 法 あ る い は 方 法
地表水の遮断や排水	遮断排水溝 枝状排水溝 自然排水溝の整地
地下水の遮断や排水	排水溝 排水トンネル 抑止排水溝 斜面排水溝 垂直排水ボーリング群 水平排水ボーリング 排水井戸
滑動力の低減	地すべり頭部の排土
抵抗力の増大	地すべり抑止壁 押え盛土 地すべり抑止荒石控え壁 地すべり抑止山 縦方向プレストレスアンカー地すべり抑止壁 剛性棒地すべり抑止杭 地すべり抑止明りトンネル 抑止排水溝
河川侵食の防止	河岸侵食防止工事
すべり層の土質改良	石灰杭 石灰砂杭
地すべりの回避	路線変更 トンネルによる地すべり回避 橋梁による地すべり通過 明りトンネル 建造物の移転

6-2 地すべり対策工の実例

以下に調査を行った地すべり現場で見られた対策工について紹介する。

1) 葡萄園地すべり

A) 回避

宝天線は建設以来、何度も葡萄園地すべり群の被害を受けたため現在では橋梁とトンネルによって路線を変更し地すべりを回避している（写真-6.2.1，6.2.2）。



写真-6.2.1 路線変更による回避（橋梁）

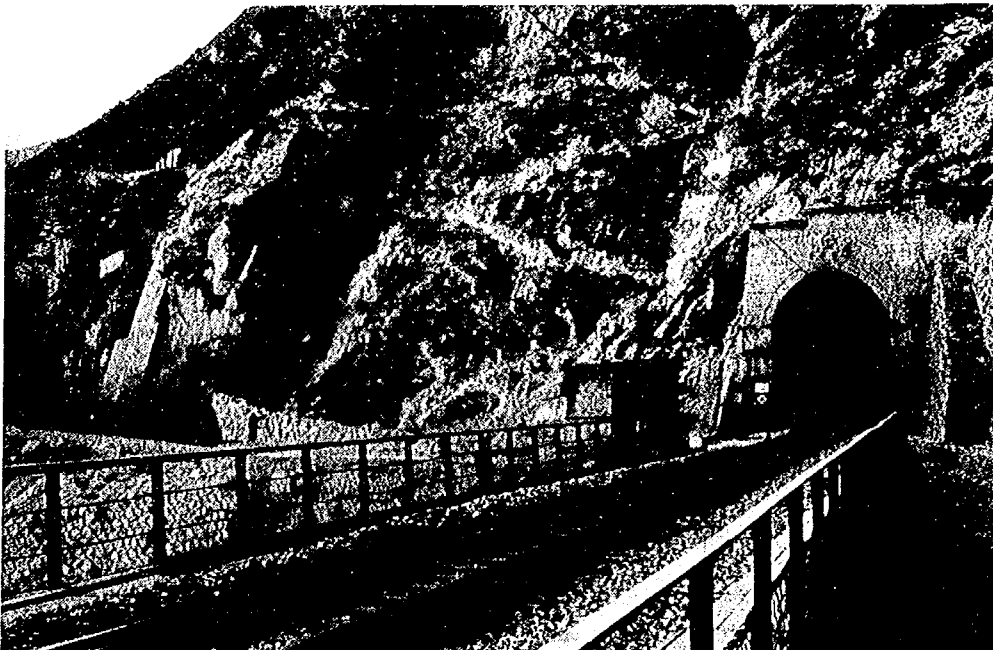


写真-6.2.2 路線変更による回避（トンネル）

B) 表面排水工と抑止壁工

葡萄園第1号地すべりの対策として地表面排水工と小規模な地すべり抑止壁工が用いられている(写真-6.2.3, 6.2.4)。



写真- 6.2.3 樹枝状表面排水工と小規模な抑止壁工



写真- 6.2.4 抑止壁側面

2) 韓城発電所横山地すべり

A) 排土工

横山地すべりの頭部に分布する黄土層を中心に 100 万 m^3 に及ぶ排土工が行われた(写真— 6.2.5)。



写真— 6.2.5 排土工

B) 表面排水工と緑化工

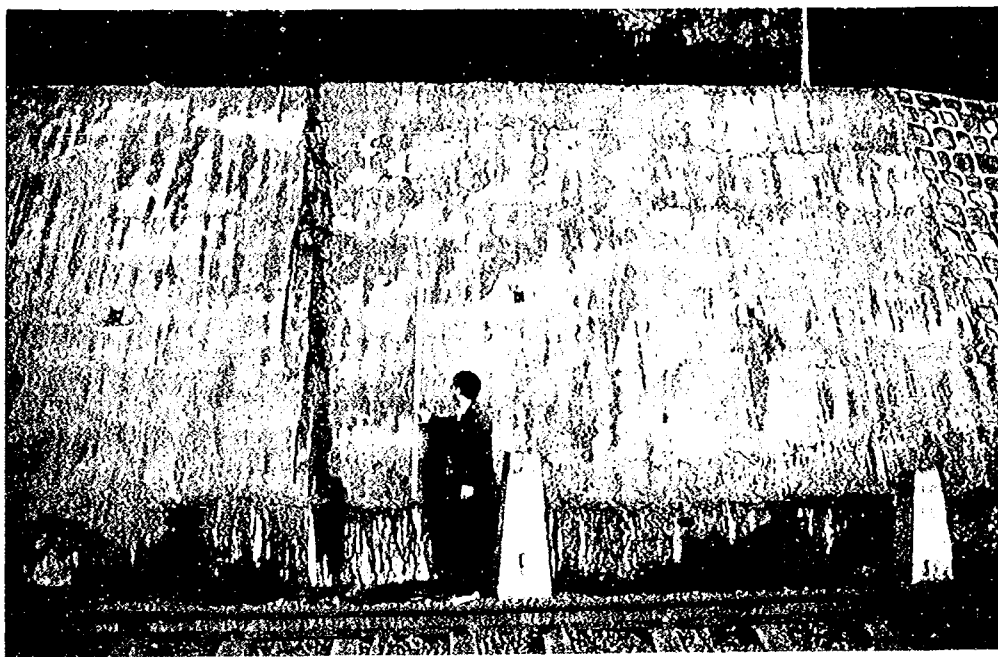
排土後の斜面には排水工が施され、緑化のため林檎の木が植えられている(写真— 6.2.6)。



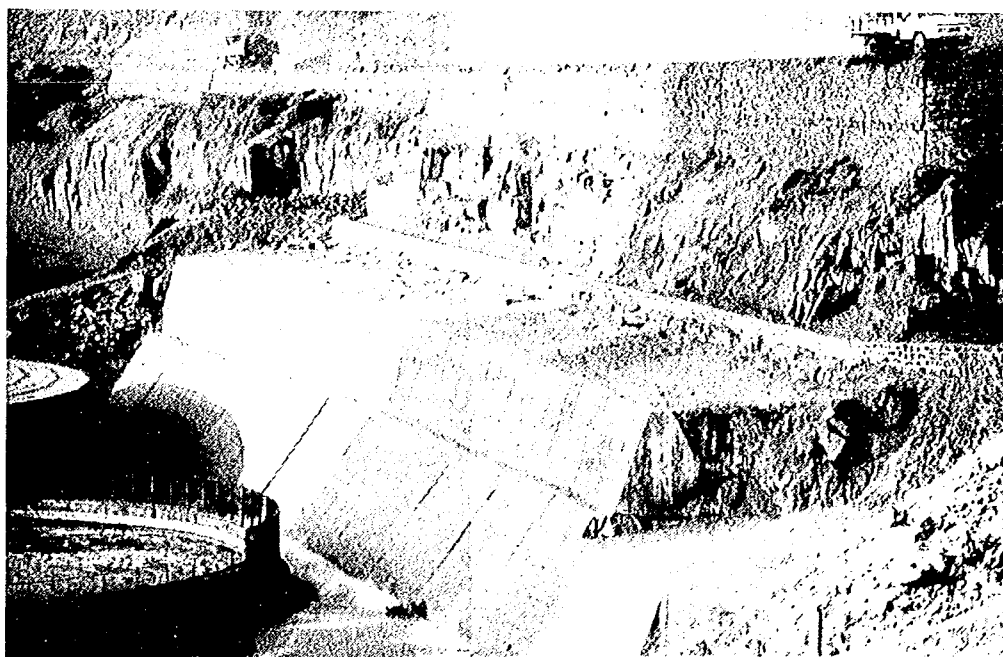
写真— 6.2.6 表面排水工と緑化工

C) 抑止壁

引き込み線横には地面から高さ約 5 m のコンクリート製地すべり抑止壁が施工されている
(写真－ 6.2.7, 6.2.8)。



写真－ 6.2.7 コンクリート製抑止壁工



写真－ 6.2.8 コンクリート製抑止壁

D) 抑止杭

同じく線路横には45本の地すべり抑止杭が施工されている。この杭は廃棄されたレールを用いた鉄筋コンクリート製で径は3.5 m×3.5 m、深さは37mである(写真-6.2.9)。

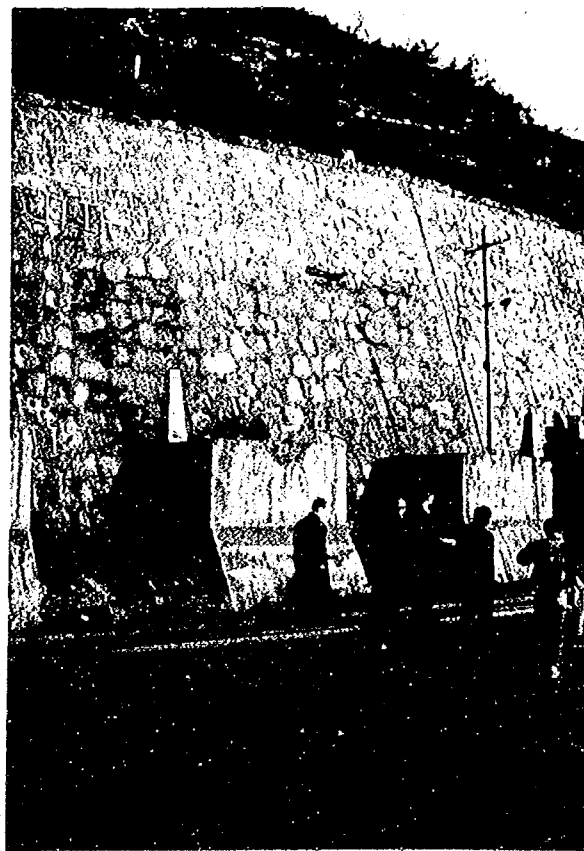


写真-6.2.9 地すべり抑止杭

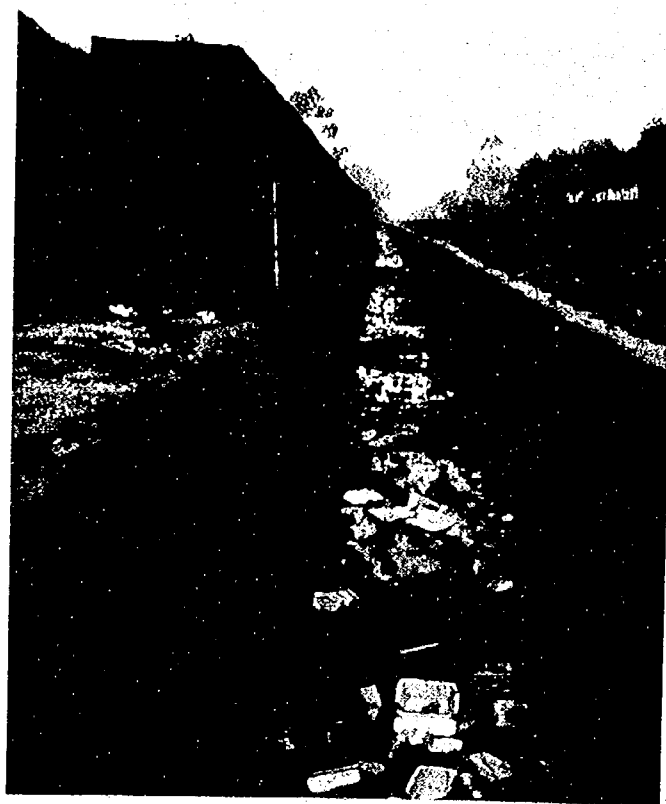
3) 獅子山地すべり

A) 抑止壁

成昆鉄道の1,473 mの区間全域にわたって大小規模多数の地すべり抑止壁が施されている。その形状は少なくとも写真に示す以下の4つのタイプがみられる。(写真-6.2.10~6.2.13)



写真-6.2.10 通常の形式



写真－ 6. 2. 11 底面が傾斜したもの



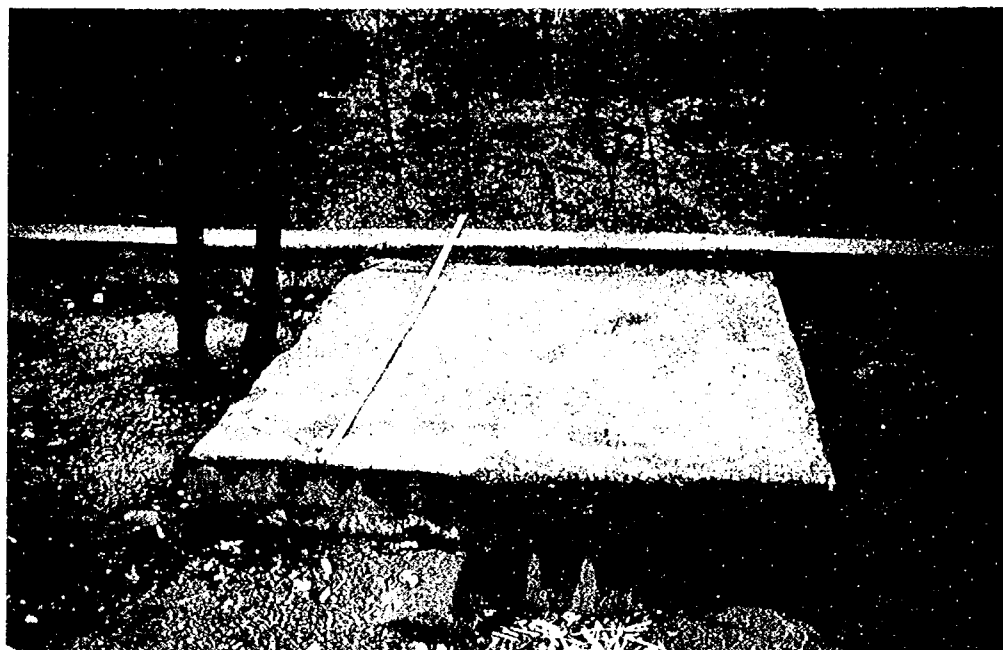
写真－6.2.12 法面の高い位置に施工され下部はモルタルで保護されたもの



写真－6.2.13 抑止壁天端に垂直にアンカー工が施されたもの

B) 抑止杭と抑止板

一部の区間では地すべり抑止杭（径 1.8 m × 1.5 m，杭間隔 3.5 m）と抑止板（厚さ 0.2 m）が組合せて施工されている。抑止板の背後には空石が充填されている（写真－ 6. 2.14 ）。



写真－ 6. 2.14 抑止杭と抑止板

C) 地下水排除工

抑止壁には一定の間隔で排水管用の升が設けられている（写真－ 6. 2.15）。またこの升の背後には抑止排水溝（暗渠）が施工されている（写真－ 6. 2.16）。



写真－ 6. 2.15 地下水排除工の前面の升



写真－6.2.16 切土斜面中には斜面排水溝（法面浸溝）が施工されている



写真－6.2.17 切土法面中には斜面排水溝（法面浸溝）が施工されている

7. あとがき

平成2年度科学技術振興調整費による「地すべり移動土塊の到達範囲に関する研究」の一貫として実施された中国国内の現地調査結果を述べてきた。また、現地で見られた地すべり抑止壁工を主とする対策工についても紹介した。研究の性格上、黄土地帯に発生した地すべりの調査が主体となっているが、広大な国土を有する中国にはそのほかにも非常に多くの興味深い地すべりが分布していることを改めて認識させられた。

今回の現地調査の期間は平成3年2月1日及び19日からのべ約40日間であったが、その期間中に日本とはまったく異なる自然条件のもとに発生した地すべりを何箇所も踏査できたことは大きな収穫であった。それ以上に、中国側の研究者・技術者達と活発な交流をもつことができたことは、相互の考え方を認識し合う上で極めて有意義であった。

短期間の調査であったため、本文中にも誤解があるかも知れないが、この報告が今後の日中間の地すべり技術に関する情報交換の活発化の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) Northwest Institute China Academy of Railway Science(1991): Introduction for Typical Landslide in China
- 2) 衛傑文他編, 河野通博・青木千枝子訳(1988); 現代中国地誌, 古今書院
- 3) 中国地質科学研究院主編(1975): 中華人民共和国構造体系図 400 万分の 1, 地図出版社
- 4) 中国地質科学院主編(1976): 中華人民共和国地質図 400 万分の 1, 地図出版社
- 5) 佐藤信次(1979): 中国 I - 中国の地史, 岩波講座地球科学 16 - 世界の地質, 都城秋穂編, 岩波書店
- 6) 中国科学院三峡工程生態と環境科研項目組(1989): 長江三峡生態と環境地図集, 科学出版社
- 7) Wang Gong-xian(1985): The Measures for Controlling Landslide on Railway in China, Proc. IV th Intenational Conference and Field Workshop on Landslide, Tokyo
- 8) Jin Zexian(1987): On the Distribution of Landslide in Loess Plateau, China, Proc, The China-Japan Field Workshop on Landslide, Xian-Lanzhou, China
- 9) Zuo Fayuan(1985): Characteristics of Regional Landslide of West Loessial Plateau in China, Proc. IV th Intenational Conference and Field Workshop on Landslide, Tokyo
- 10) 中国国家地震局蘭州地震研究所・寧夏回族自治区地震隊編著(1980): 1920 年, 海原大地震, 地震出版社
- 11) Zhu Haizhi(1989): Some Types of Seismic Landslides in Loess Area in China, The Lanzhou Field Workshop on Loess Geomorphological Processes and Hazards, Journal of Lanzhou University
- 12) 甘肅省科学技術委員会, 森脇寛訳(1984): 1983 年中国甘肅省酒勒山地すべり, 地すべり Vol. 20, No. 4
- 13) Wang Shitian et al(1985): On the Characteristics and Dynamics of the Catastrophic Mount Sale Landslide, Kansu, China, Proc. IV th Intenational Conference and Field Workshop on Landslide, Tokyo
- 14) Nakamura Hiroyuki, Tsunaki Ryoussuke, Ishihaama Shigeru: Simulation Model for Debris Movement of Landslide, Proc. The Japan-China Symposium on Landslide and Debris Flows, Niigata, Tokyo, Japan
- 15) 中村浩之, 久保田哲也: 動的計画法を用いた臨界すべり面解析法, 土木研究所資料 第 2425 号 昭和 62 年 1 月
- 16) 徐峻齡(1987): 葡萄園 1 号滑坡力学机制分析, 鉄道部科学研究院西北研究所
- 17) 宇済民(1991): 韓城發電所象山滑坡声発射(A.E.) 監測報告 1990 年 7 月~11 月, 鉄道部科学研究院西北研究所

- 18) 鉄道部成都工務段(1990):獅子山滑坡情況介紹
- 19) 載士同・王崇源(1963):獅子山滑坡原因和規律分析, 鉄道部第二設計院地路處地質組
- 20) 王恭先(1987):長江三峽ダム湖岸地すべりの主な類型及びその安定性, 地すべり Vol. 23, No. 4
- 21) 湖北省西陵峽岩崩調查工作處(1983):長江西陵峽新灘岩崩區調研資料編
- 22) 中国鉄道部科学研究院西北研究所編(1977):滑坡防治, 人民鉄道出版社
- 23) 中国鉄道部第一設計院主編(1978):鉄路工程設計技術手冊《路基》第4編 特殊条件下路基, 中国鉄道出版社
- 24) Feng Xue-cai, Guo An-ning:Earthquake Landslide in China, Proc. IV th International Conference and Field Workshop on Landslides, 1985
- 25) Zhang Linyuan: The Landslide History and Late Cenozoic Environment Factors in Saleshan Area, Dongxian County, Gansu, Internatinal Field Workshop on Loess Geomorphological Processes and Hazards 1989

参考資料集（翻訳）

I 鉄道沿線の地滑りの防除に対する研究の従来の回顧と今後の展望	77
II 中国の黄土と黄土状岩石	88
III 地すべり抑止壁の設計施工基準	93

I 鉄道沿線の地滑りの防除に対する研究の従来の回顧と今後の展望

徐邦棟 王恭先

(鉄道部科学研究所西北研究所)

30年以降、我が国で新設された線路及び従来の線路の改築中に斜面災害の大々的な復旧工事を行ったが、取り分け地滑りの防除及びその作業に対する工事量が多く、成功した事例や、失敗し教訓を得た事例もある。本稿では鉄道線路基盤の地滑りの防除やそれに関する研究課程及び主な成果の概略を述べ、今後地滑りの防除技術や地滑りのメカニズムに対する研究が更に発展されるために重点を置くべき研究課程や、その方向について展望する。

1. 鉄道線路沿線の地滑りの防除に対する研究課題

我が国は地滑りの災害が比較的多い国であるにもかかわらず、中華人民共和国成立以前は、地滑りに対する研究は少なかった。我が国に古くからある線路の多くは、沿岸や平原地区に敷設された。その地質条件は比較的簡単で地滑りによる被害は少なかった。宝天鉄道線を敷設する際に、地質条件の不良により、初めて山崩れや地滑りによる被害が多数発生した。中華人民共和国成立以後、山間地への鉄道敷建設が進むにつれて、日増しに広範囲に山崩れや地滑りの災害が数多く発生するようになった。50年代初頭、宝天鉄道の改修及び宝成、鷹厦等の山間地区を通る鉄道を敷設の際、地質調査を重視し始め、地質条件の良くない地域を回避したものの、地質に関する知識に乏しく、地質調査の技術的水準の低さや経験不足により、とうとう敷設後大規模な災害が発生してしまった。中でも大規模な古い地滑りの再活動がもっとも多く、宝成線と接続後宝略地区で発生した12の大災害はいずれも地滑りによるものであった。当時の地滑りの知識をもとに行なった宝略地区の地質調査は、地貌の外形や地質探査の結果から地滑りの特性を判断したに過ぎなかった。復旧対策面では、主に地滑りの前方周辺に抑止壁や押え盛土等を実施し、山体の平衡を回復させる措置を取り、地滑後方及び側面周辺以外に、地下水をせき止め、排除する溝や排水ボーリング等、地下水を排出する措置を用いて、災害防止に大きな効果を上げた。

鉄道部は線路基盤災害の復旧に関する研究やその統括を比較的重視した。1951年宝蘭鉄道敷設の際に、いち早く崩壊及び泥流研究委員会が発足し、1956年には宝成、宝天それぞれに崩壊対策委員会を設置し、両路線の斜面災害の復旧を結びつけて、観測、調査及び研究を進めていくと同時に、蘭州鉄道局には土砂崩れを研究する機関を設置し、宝天、宝蘭両路線等の土砂崩れや地滑り災害の対策に協力した。1959年西安で正式に「鉄道部斜面崩壊科学技術研究所」が設立され、その後調整され、1961年冬「鉄道部科学研究院西北研究所山崩れ及び地滑り研究室」と改正され、我が国初の地滑り及び山崩れ研究の専門機構になった。同時に宝成線路の路床の土砂崩れ及び地滑りの復旧工事を行った経験に基づき、1959、1961及び1964年に相次いで3回にわたって「全路線に置ける土砂崩れ、地滑り経験交流及び科学研究協力会議」を開催し、土砂崩れや地滑りに関する研究活動が大いに発展した。

60年代初期、鷹厦線、外副両路線の斜面災害の復旧工事中、地滑り観測に対して次第に地質調査

と探査の両方に重点を置くようになり、適当な場所にボーリング孔を設置した。対策に関しては、地滑りの特性に即応するような措置を取り、例えば地滑り前面での抑止壁や、地下水の排出溝、地滑りを抑止する杭工により成果を上げた。

60年代中後期、成昆、貴昆等の路線を敷設中、過去の経験や教訓を生かし、ルート選定の際、地滑りの多く発生した地区や大規模で古いすべり面のある地区をできるだけ回避した。避けにくい箇所に対しては、その地滑りの特性と安定状態を探知し、判断した上でその状況に見合う対策工事を行った。しかし地質条件が複雑なため、施工後、回避できない地滑りが発生した。例えば貴昆線の二梯岩、椰、格里橋、小田等で発生した地滑り、成昆線の会仙橋、甘洛2号、白石崖、乃托、沙北、林場等で発生した地滑りである。当時鉄道部西南2地指揮部は直ちに設計、施工、科学研究のグループで組織した「路基山崩れ及び地滑り対策委員会」を発足させ、それぞれの分野に基づき復旧工事を行い、比較的よい成果を上げた。このような地滑りの知識をもとに、主として地質調査による分析を行ない、それにより探査の実施件数やその時間を減少させ、早期鉄道敷設の要求に答えた。対策上においては、既存の技術を習得する以外に、労力の節減、工事の安全を保障し、災害防除に関する研究を発展させるために、垂直ボーリングを研究試用し、地滑りの地下水を排除し、コンクリート杭工及び集水井工、抑止壁等の新しい措置を重視した。コンクリート杭はそれ以後他の路線でも広く応用され、統計は不完全であるが鉄路地滑り復旧工事に千本もの杭工が使用されたようだ。

70年代の初期、焦枝、陽安、湘黔、枝柳、太焦線等を敷設中にもタイプの異なる地滑りが発生した。例えば、震旦紀及び古生代の変質砂頁岩がすべり面を構成する破碎岩層地滑り、新第3紀（Q1とも称される）湖相雑色粘土中の流れ盤地滑り、具河湖相複理石からなる流れ盤地滑り、伸縮土地区の掘削箇所の近傍或は盛土堤上で発生した伸縮土地滑り、湖相沈積粘土中の浅層地滑り、及び炭層上を覆う厚層黄土地帯の大規模な地滑り等である。粘土地滑りとその鉱物組成とは密接な関係がある。したがって、地滑りの土質とイオン化学作用という新しい分野の研究を進めていくようになり、同時に粘性滑り面土の残留強度試験を用いた多くの研究も進められていった。

最近では、土木地質法を統合的に利用する中で既に地質力学原理が試用され、それにより地形形態や岩体構造より土木地質を結び付けて、地滑りの特性、規模及び安定性を判断出来るようになった。土木地質類推計算法を用いて差し当たり地滑りの推力の大小及び抑止工事の規模を推定し、施行しながら探査を行なうという方法を考え出し、既に細部設計の要求を満たし、品質の保障、探査時間の減少、建設速度が早まり、鉄道敷設時に発生した地滑りの復旧工事に直ちに実施された。

鉄道沿線で発生した地滑りの状況、類型、発生した地質の特性及びその原因、防除作業の成果を把握するために、鉄道部内外30余りの関連機関は、線路沿線千余りの地点で発生した地滑りに対して調査し、記録に残した。

上述した作業をもとに、我が地滑り研究室では1971年に「地滑りの防除」（初稿の要約）を総括編集し、研究室内部で検討を行ない意見をまとめ、1977年に人民鉄道出版社より刊行された。

1973年の全線第4回地滑りの防除経験交流及び科学研究協力会議には、28省、市、自治区の計118機関の代表が参加し、実質的に全国的規模の地滑りの防除経験交流会となった。開催後、「地滑り文献集」が出版された。その他、このグループにより、イギリス、日本、ソ連の60年代末から70年代初期の地滑りの防除研究に関する代表的な文献を翻訳し、我が国の地滑りの特徴と他国との差異を明らかにした。総合してみると、土木地質学の分野において我が国は国際水準に接近もしく

は到達し、かつ我が国独自の特長もあることが分かった。しかし探査方法、観測技術においては他国との差異が大きい。

地滑りの防除の研究が上述したような成果を上げ進展した主な原因：

(1) 線路各部門の指導を重視し支持したこと。30年以降、たゆみない研究を行ない、常に専門の研究人員を確保してきた。(2) 鉄道敷設の需要。鉄道の新設及び既存の線路上で大量に発生した地滑りは、今後地滑りの研究に課題を提供しただけでなく、現場という試験場所も提供した。(3) 社会主義的協力関係。地滑り防除に対する設計、施工、運営及び科学研究に携わる機関の人材が集まり、その能力を発揮した。(4) 科学研究活動は実践第一という見地を固持したこと。実際に発生した地滑りから問題点を取り上げ、それを研究した後、更に実践に移しその研究の正確性を検証し、研究機関を短縮した。

2. 主な成果

われわれは30年に渡る実践や研究により、主として以下のような成果を得た。

(1) 地滑りの類型

地滑りを分類することは、地滑り防除の重要なポイントである。国内外で地滑り分類研究に従事する学者は数多く、彼等は異なる角度から、異なる分類指標により様々な分類法案や意見を提出している。欧米の一部の国家では、「地滑り」という概念に、山崩れ、錯落及び土石流等を包括し、統一して分類している。我が国はそれらを別々に分けて研究している。地滑り分類においては意見が統一されていないものの、鉄路部門に関して西北研究所は元来の分類に加え、1974～1976年にわたって、「地滑りの分類及びその分布」という特定のテーマで更に進んだ共同研究を行ない、地滑り分類の目的は地滑りの防除であるという意見ではほぼ一致した。比較的少ない調査、探査作業により地滑りの基本的特性、規模及びそれによる被害を理解し、地滑りの防除対策を立てることを主とし、同時に我が国の地域による地質の特性も考慮した上で「地滑り物質及びその成因による分類方法」を提出した。地滑りは、粘土、黄土、盛土堤、堆積土、破碎岩石及び岩石地滑りの6つに大別される。それを更に主なすべり面の成因類型により、堆積面、層面、構造面及び初生面地滑りの4つに分類する。また更に、すべり面の厚度により巨厚層(>50m)、厚層(20～50m)、中層(6～20m)及び浅層(<6m)地滑りの4つに分類する。このような分類方法は地質条件を考慮し、更に防除の難易を考慮した土木地質分類法で、現在では比較的統一された分類法の1つとなっている。この分類法は地滑りの防除や地滑りの規則性に関する研究及び累積経験のいずれにも比較的適していると実践により証明された。当然この分類法はもっとも完全な分類法案には至っておらず、今後も引き続き研究する必要がある。

(2) 地滑りの分布

線路沿線で発生した地滑りの基本的状況、地質条件、発生原因や分布の規則性を完全に把握するために、鉄道を新設するに当たり必要な参考資料とするよう「地滑りの分類と分布」を特定テーマとし、1974～1976年にわたり全国の線路沿線で発生した地滑りに対して調査を行ない、千件もの地滑りを記録し、全国線路沿線で発生した地滑りの分布図を作成した。

1. 地滑りの発生及びその分布と岩性との関係は最も密接である。

地滑りの分布している地層を10種の岩石の組成に分類する。その中で地滑りを起こしやすい地層は泥岩、頁岩及びその変質岩、夾炭層、泥灰岩、凝灰岩、風化した長石岩類、雲母岩類と石膏或は溶性の塩分を含んだ地層である。地滑りを起こしやすい岩層中には、往々にして粘土化、泥化、長石化、絹雲母化、滑石化、黒鉛化、蛇紋化、緑泥化及び千枚岩化等のような軟質の岩石が分布しており、その分布箇所では地滑りが発生している。これらの岩石は常にモンモリロナイト或はカオリナイト、伊利石、海緑石、緑泥石とボーキサイト等の特殊鉱物や炭酸石炭、硫酸マグネシウム、塩化物やその他の可溶性塩分等を含有している。岩石或は全体的に柔らかい層を岩層に挟んで形成されているため移動体に成りやすいのである。

2. 岩性条件が類似する時、岩性の構造条件は地滑りを規制する要因となり地殻を覆うあらゆる岩土はある一定の地質条件の下で形成され、それぞれ性質が異なり、層面の一般的な剪断強度は垂直剪断強度より小さい。岩性の構造作用を受けた後、一部は亀裂面或は不可視亀裂面に沿って、様々な性質力により破壊され、その強度は著しく下降するため比較的平かな単斜構造地域では、流れ盤地滑りが多く分布している。大断層付近に地滑りは集中的に分布しており、取り分け2つ或は多数の断層が交差する箇所の分布は著しい。褶曲軸部や大断層の上層も岩層が比較的破碎されるため、常に地滑りが集中する箇所となっている。岩性の構造条件がすべり面滑帯中水の形状を制御する以外に、地滑りの地下水の状態(構造供水)も地滑りを制御し、かつ地表水、滑帯水それらを浸透させない層上の岩性不良の一層に集中させて地滑りを発生させる。

3. 岩性、構造条件が一致している時、山の斜面の地形は地滑りの発生に対しても重要な作用を及ぼす山の斜面の地形は、主としてすべり面の空げきの大小、勾配の急緩、すべり面の応力状態及びその変化を決定している。特に偏向荷重の作用は新しい亀裂や岩体破壊を絶え間なく引き起こし、岩盤を一定の方向に緩ませるため、各種もの水流に経路を供給し、これにより各亀裂面を軟化させる。また、地表集水条件を決定し、地下水の浸透条件を変化させる。統計によると、線路沿線で発生した地滑りの40%以上は施工により斜面の外形が改変された後に発生したもので、或は古い地滑りが再活動したものである。これらのことにより、斜面外形の改変が地滑りの発生に影響を及ぼしていることが明らかである。

4. 上述の3項目を基礎とし、異なる気候帯においても種類の異なる地滑りが発生する。我が国西北乾燥地区では黄土地滑りが多数分布しており、かつその多くは黄土が岩盤の上部或は水を含んだ砂れき層に沿って滑るものである。降水量の多い中南、西南、華東地区で発生した地滑りの多くはいろいろな種類の堆積土地滑りや風化した岩漿岩及びその変質岩の地滑りである。寒冷な東北地区やチベット高原では浅層のツンドラ土融解による地滑りなどが発生している。

岩性の不良は地滑りの分布が地域性を持っているという特徴を決定付けている。大きな構造線は地滑りの分布が带状集中性を特徴づける。異なる区域の平坦面と段丘地では、地質作用の結果が、一定年代の水文地質の循環に影響を及ぼす。その影響により、地下水の成層分布がその地滑り面の成層分布を特徴づけた。

(3) 地滑りの基本的属性及び防除対策

1. 堆積土（堆積層）地滑り

一般の堆積層は基岩に沿って滑るが、それ以外に、崩積層、坂積層の間で、崩積層は坂積層に沿って滑るものであり、崩・坂積層中においては崩積層が坂積層に沿って滑る。崩・坂積層は古い洪積層（Q3）に沿って滑る。洪積層中の、新洪積層は、古い洪積層面に沿って滑る等である。また、厚度数10メートルの花崗岩や片麻岩の風化層中においては、すべり面は地下水分布の変化に伴って変化する。堆積土地滑りのすべり面地下水は地滑りの後方及び側面より供給されるものもあり、いくつかの補給帯に別れている場合もあり、これは補給位置が比較的固定している一例である。その他、侵蝕基準面（人工掘削面を包括）の改変に伴い、斜面の岩体は緩み、水文地質条件に変化を及ぼす。こうした地滑り類型は多く、地質条件が複雑でその防除や原因に見合う有効な措置をとる必要がある。取り分け、土木作業が地質条件に及ぼす変化や傾向には注意が必要である。

2. 黄土地滑り

新しい黄土は古い黄土或いは基岩面に沿って滑る場合以外に、すべり面の特徴による黄土地すべりの2つに分類される。前者は黄土が年代や成因の異なる古い黄土界面或は基岩（主として第3系泥岩よりなる）に沿って滑るもので、形成過程の関係によりすべり面は数度の傾斜があるものの大体なだらかで、このすべり面中に地下水を豊富に含んだとき初めて地滑りが発生する。すべり面中の古い黄土、特に洪積黄土及び古い土壤層は浸透性が悪いいため、地表水の作用は不明瞭である。こうした類型の地滑りは絶え間なく緩慢に滑る場合もあるし、すべり面が比較的厚いために、地下水の圧力で潜水侵蝕され、或は押し出され急激に滑る場合もある。後者のすべり面の特徴による黄土地滑りは、黄土が古い基岩面上の懸移式地滑りを覆うもので、接触面の勾配は急なため、すべり面地下水は通常発達しない。一旦地震、或は偏向荷重等の作用を受け、土中の節理や土体の緩和が生じるために、地表水や土中水は接触面に沿って集中した後、山崩れ性の地滑りが発生する。防除対策に関しては、両者の性質が異なるため、前者に対してはすべり面地下水をせき止め、排出或は減少させることに主眼を置き、安定性を向上させる。後者に対しては抑止杭に主眼を置き、荷重を減少させるようにする。注意すべき点は、黄土地滑りは洪積、堆積および地震節理のある黄土中で多数発生しており、この点と黄土形成の年代とははさして密接な関係がない。新しい黄土及び風蝕黄土となって初めて大空隙や垂直節理、垂直浸透作用を伴う。しかし新しい黄土や風蝕黄土には軟層が無く、地下水が下伏の比較的浸透を隔てる場所に浸透し、前述の黄土を軟層に転化させて初めて地滑りが発生するという点である。

3. 粘性土地滑り

粘土地滑りの主な形成要因は、粘土中に含有された特殊な親水鉱物、例えばモンモリロナイト等を含有しており、伸縮性が著しく、加水分解等の水の影響を受けた後、その強度が究めて低くなることである。そのため、地滑りの発生及びその規模は特殊鉱物を含有するこの粘土層の形状、分布位置及びその箇所の水文地質条件やその変化と関係があり、特に地形、地貌条件の改変後、上層地下水の分布、発生及び変化が粘土滑りに及ぼす影響は大変大きい。その1つは、特殊土層を含有した層の上面の傾斜度と空隙と開削面間の関係であり、2つめはすべり面地下水の多くが上層の停滞水空の供給や地形、地貌条件と関係があることである。鉄道は紅色

盆地周辺の丘や畑を通過し、トンネルを通過する際、上層の停滞水の状態を変化させてしまうため大量の地滑りが発生する。すべり面は岩性の良くない粘土の上、底部で多く発生しており粘土層中部で発生しており粘土層中部で発生することは稀である。このような類型による地滑りを防除する時は、一般に広範囲内で発生している伸縮土の分布状況や形状及びその埋蔵状況などを明確にし、鉄道の走行方向と路基標高を調整することを主として行ない、このような類型の土を埋めないことである。そうでなければ、地下水をせき止め、排出を徹底して良くする工事を主として行ない、建築物を支える基盤を軟層より更に深くする必要がある。必要ならば、土質の改良方法を用いるべきである。それ以外に、粘土中の風化による亀裂は広範囲にわたり発生している現象であり、特に形成の異なる粘土層で多い。粘土中の風化による亀裂に沿って地下水が浸透するため、すべり面の浅く小さな地滑りとなる。その防除対策としては、土壌中の地下水を排除することを主とし、基盤となる面との境界を緩和し、一定の温度を保つ等の措置をとることである。もしこうした土を充填料として使用するならば、良好な排水措置が必要となるであろう。

4. 岩石地滑り

岩石地滑りは岩石全体による地滑り（流れ盤より滑るものが多くを占める）と破碎岩石地滑り（地滑り土塊亀裂面が発達し、岩石が破碎し、逆断層上の基盤岩石が不揃いのために地滑りに転化するものが多い）の2つに分類される。前者は岩性と密接な関係（地滑りを起こしやすい地層）があるほか、そのすべり面の多くが層間移動帯となっている。当地帯の形状と空隙部の関係及び地滑り面中の岩土の構造とその強度が地滑りの特性や状態を決定している。後者は、主として断層移動帯により制御を受け、すべり面は必ず単一の面だけとは限らず、石段状やのこぎり歯状になることもある。防除対策については、現場の地滑りの特性に見合った工事を行うことである。前者には主としてアンカー工或は抑止工をそれぞれの地滑りに採用し、併せてすべり面地下水の遮断、排出作業を行なう。後者には主として、抑止を行ない、地滑り土塊重量を減らし地滑り面地下水の排除を補足して行なう。

岩石による地滑りの防除対策に関して研究、実践することにより、地質力学的方法により地滑り地区の岩体の構造及びその形態を調査研究し、構造過程や構造応力場及び各岩体亀裂面間の力学性質とその相互関係を明確にした。それにより地滑り発生条件、地滑りによる分界、すべり面土強度のパラメーター及びすべり面地下水の分布等について、迅速かつ正確な研究を進めていくことができた。このような方法により探査作業にかかる時間が大幅に削減され、迅速な復旧工事を行うことができる。

我々は、地滑り発生メカニズムや地質力学上の特性に関して研究を行なった。

(4) 地滑りの地質探査及びその試験

かつて地滑りの発生する地区で、試錐探鉱、坑道探鉱、井戸掘探鉱、電気探鉱、地震深探鉱の探査方法を総合的に利用し、地滑りの地質構造、特にすべり面とすべり面となる可能性のある部位及び地下水の分布状況を重点的に調査した。これは地滑りの性質やその規模を決定づける明確な根拠となった。我々は以前すべり面を確定する10種類の方法を総括したことがある。岩心の鑑定、分析を主とした総合土木地質学法では、すべり面の位置を確定するうえにおいて、我々に独

自の見解方法を提供した。この方法は、すべり擦痕が構造上における擦り傷かを見分けること、すべり面が現在活動しているか、既に活動を終えてしまったかによる区別、すべり面中にいくつかある亀裂面の性質及びすべり面の相互関係とその区別等の総合分析分野の発展を促した。我々は、無水逆循環法のような、異なる地滑り地層に対して、違った探鉱方法を研究した。地面の調査は主として、各地滑りの主軸断面を把握し、その地点を重点的に試錐する方法を行ない、それにより試錐作業が大幅に減少し、比較的大きな成果を上げた。しかし物質探査、リモート・センシング技術の応用分野においてはまだ劣っている。

すべり面土強度試験に関して、我々は先ず実際の地滑り状態を真似てテストを行ない、それをもとにして、すべり面に対して、重ね剪断、多数剪断、野外大型垂直剪断等、多種に渡る方法で研究を行なった。特に、我が国の当時の条件を併せて、垂直剪断試験器を開発し、その機器と多数剪断法を併用し、大規模な地滑りに対して、地滑り発生の際、すべり面土の含水状態を調査把握し、すべり面土がある一定量の地下水を含んだという条件で何度か剪断した後の強度指標と大規模なすべり面発生回数との相互関係を見出し、実際の地滑りの復旧工事に利用し、併せて多数剪断により残留強度を見出した。これと同時に、リング剪断試験器や往復垂直剪断器を作成し、粘性すべり面土の残留強度に対して比較的系統的な研究を行ない、ある一定の規則性を見出した。

(5) 地滑りの動態観測について

50年代初頭から60年代末にかけて発生したいくつかの大規模な地滑りに対して、系統的に土塊移動や地下水の動態観測を行ない、併せて地滑り中の観測資料を分析応用した研究を行ない、その結果、地滑りの周期を確定し、土塊を区分し、主な滑る方向、土塊の移動と集積する地区を区分し、すべり面各部の力を受ける箇所を分け、滑る地盤の傾斜度や深さを予測する方法を提出した。地下水の観測や水力試験を通してすべり面地下水と当地地下水の供給関係、供給方式、地下水の水源及びすべり面地下水の流速、流量等を調査解明した。近年では地滑り地面傾斜計、伸縮計やすべり面の測定管等を研究開発した。しかし地滑りの地下移動及び地下水の観測など新しい技術の応用分野ではやや劣っている。

(6) 地滑りの安定性の判断について

地滑りの安定性の判断について、20年余りにわたる研究や実践を経て、我々は地質探査を主とした総合分析方法を開発し、以下のようにまとめた。1.地貌形態の変化 2.地質条件との対比 3.滑る前の予兆観測 4.滑る要因の変化の分析 5.斜面平衡計算 6.傾斜安定性計算 7.斜面下部の圧力と岩及び土強度の対比 8.地質探査の模擬計算。1つの地滑りに対して、この8つの方法のうち3ないし5つの方法により分析すると、どの地滑りの安定性も判断でき、かつより正確に判断するために、相互に検証、補充することができると実践により証明された。この方法を用いると、地滑りの発達段階をより正確に分けることができ、現在の地滑りの状態や発達傾向、以前の地滑りの推力限界も判断することが出来る。地滑りをコントロールする主な要因をつきとめてからは、一定の範囲内で地滑りが変化する要因のいくつかを制御することができ、これにより設計水力の大小を決定することができた。我々が、初めて開発した地質探査の模擬計算法を用いて算出した推力限界や建築物の寸法はすでに定量的に求めることができ、他方面でも、測定手段

の増加や元来の資料の正確さに伴い定性的判断から更に定量的判断ができるようになった。

(7) 地滑りの予測、予報について

何件もの地滑り防除の研究、実践を通して、各種の地滑り発生の基本條件、要因、動態過程、分布の規則性等について理解してから地滑り発生の予測、即ち地滑り発生可能な地点、その規模、被害程度や発達傾向等の予測が大体できるようになる。従って、鉄道を敷設する際、地滑りの多い区間を避けて、既存の地滑りに対しても対策工を講じることができる。しかし地滑りの発生、発展時期に関する予測や地滑りの速度についての研究はまだ少なく、これから後重点をおく研究テーマの1つになるであろう。

(8) 地滑りの対策について

地滑りの対策については、地滑り特性の認識程度に従って進歩してきた。当初は地滑りに対する認識が乏しいため、復旧工事に失敗し、或はやみくもに地面を掘削し、被害を更に大きくしてしまったという経験も少なくない。その後、斜面の従来のバランスを回復する従来の抑止の方法を採用して成果を上げた。宝成、鷹厦、成昆、貴昆、太焦線等を例とするように、地滑りの特性に対して比較的多くの理解を得てこそ初めてその地滑りの原因に対応した有効な措置を取ることができ、かつまた二次的要因に対しては知識を総合した対策措置を取ることができ、技術的・経済的にも理にかなうのである。

1. 地滑り対策の原則

地滑りが連続して分布している地域についてそれぞれが大規模な地滑りか、もしくは地滑り防除の対策が技術的・経済的に調整がつかない場合の鉄道敷設では、線路を迂回させて地滑りを回避する。いくつかの条件のもとでは、河川の方へ線路を移し、従来の斜面の平衡状態を壊さないようにする。もしくは破壊を少なくする。それぞれが大規模な地滑りに対する対策が難しい場合や、技術・経済的に不合理である場合は、すべり面が影響を及ぼす範囲の下方にトンネルを抜く。地滑りの発生位置が比較的低い中・小型の地滑りには渡り橋を築造する。発生位置が比較的高い場合は渡り溝を築造し、それぞれが大規模な地滑り群に対しては、活動している地滑りの前方を避け、比較的安定した区間に線路を移設する。規模の小さい地滑りならば、諸条件が許すなら、地滑り全部を取り除く措置をとる。地滑りの対策にはいわゆる「将来再び発生することのないよう一度で根絶する」という原則に従うべきである。

2. 地滑り対策措置

地滑りの発生原因をもとに、例えば地下水作用と結び付いて引き起こされた地滑りには、主として地下水をせき止め、排出する溝、排水ボーリング、斜め孔等の対策により地下水を排除するが、先ず地下水の供給水源、供給方式、推量、位置、方向等を明確にしなければならない。宝成、成昆線で発生した地滑りには、このような措置をとり成功した。短期間で地下水の詳しい状況を正確に調べ、以前の地滑り前方部に排水溝や抑止壁を築き、更に小さい抑止壁を加える。このような対策により、地下水の排出前方部を地滑り抑止やすべり面を密にし、地表水が下部に浸透する作用を減少させた。このような措置を取り、既に鷹厦、宝成線では地滑りが安定し、よい成果を上げた。河川の侵食作用が地滑りを引き起こす場合、河川の護岸工事に重点

を置く必要がある。宝成線は地滑り前方部の河床上に水をさらい、保護坂を築造し、鉄筋コンクリートの抑止壁で地下水の排出を抑え、沈殿を促し、各種の小突堤（浜辺の侵食を防ぐため、護岸堤防と丁字形を成して築造された防波堤）を建造し、いずれも著しい効果があった。敷設工事による土砂の掘削が山体の平衡を壊し、地滑りを引き起こした場合は、線路上のいたるところに抑止壁をつくり、バランスを回復することで復旧工事に成功した。1966年、成昆線で発生した地滑りは、鉄筋コンクリートの抑止柱を埋めた措置により成果を上げた。それ以後、この方法は全国で広く応用した。仮に地表水の浸透或は自然排水の供給により地滑りが発生したならば、地表面に浸透を防止するものを敷きつめ、地表水の排出及び溝床の浸透を防止する等の措置を取る。仮にすべり面の土質が不良であるなら、グラウト、焙焼等の土質を改良する措置を取るか、或は地下水の排出作業により地下水の作用を減少させると良いが、まだ研究の段階である。

地下水排出工は、実践によりいずれの場合にも良い成果を上げたと証明された。抑止措置の採用は設計にミスがなく、抑止壁が基盤以外に埋められ、その深さが十分であるならば、すでに地滑りを安定させる効果を上げることができるだろう。しかし、抑止壁を築造するには、土塊の掘削を段階的に分けて施工する必要がある。そうしないと抑止力量が減少し、地滑りを引き起こし、工程に支障をきたすことになる。こうした教訓は軽視できない。減重措置を単独で用いても結局地滑りを安定させることは出来ない。必ず抑止工或は排水工を併用して初めて成果が得られるのである。

地滑りの推力計算において、強度定数の決定にあたっては、我々はすべり面全体の平均値をとる方法は回避した。我々の採用した方式は地滑りの地質条件によってすべり面を、主に滑る区間、牽引区間、滑り止め抑止区間に分け、それぞれの定数を採用する方法である。含水条件が異なるため、区間毎に定数を定め、不利な要素の組み合わせも併せて考慮すべきである。また、テスト値と逆算値、経験値を総合的に分析し、数値を相互にチェックし、補充して用いる必要がある。

抑止工設計中、基盤の地質状況に基づき、すべり面が下方へ発達する可能深度を考慮し、比較的深い地点に抑止壁を埋めた。深く埋められた抑止壁は、壁底部の摩擦抵抗作用が十分発揮されてから、更に抑止壁前方が土圧により移動する、それによる抑止壁工事の現象を一層考慮したことで成果を上げた。現在、抑止壁はほとんど抑止柱に取って代わった。地下水排出溝、排水ボーリングも斜め孔排水に交代したものの、施工機器に関する問題はまだまださほど取り上げられていない。

3. 今後の地滑りの防除に関する研究の展望

地滑りの防除に関する研究分野において、我々はある程度の業績をあげたものの、先進国レベルと比較するとまた一定の差がある。出来るだけ早急に先進国レベルに達し、超越するよう更に研究を進めるべきである。

(1) 研究の基本的出発点

1. 我が国の地質の特性を緊密に統合し、研究を行なう必要がある。我が国の国土は広く地質の

特性も比較的複雑で、地滑りの類型も多く、その分布には一定の地域性がある。従って類型を分け、各種の地滑りのメカニズムを正確に把握すべきである。それには類型の異なる地滑りに対して、それぞれの地滑りに適した研究や対策方法を用いる必要がある。

2. 地滑りの研究には土木地質学を中心に行ない、その他の学科、例えば土質力学、土質学、岩盤力学等と併せて研究を進め、試験及び観測方法を多用し、典型的な地滑りに対してはそれに適合した限界条件を想定し、これにより結果の正確さを検証し、研究を定性的なものから定量的なものに発展させるべきである。
3. 地滑りの研究に従事する者は、一定の地質に関する基礎知識、岩盤、土質力学知識、鉄道敷設の知識、設計構造、測量、地質探査及び試験技術に関する知識に精通していなければならない。専門の知識を身につけた上更に広い知識が必要である。
4. 地滑りの研究をする中で、長所を発揮させ、短所を取り除く。我々が行なった中で比較的良好な成果を上げた分野、例えば研究理論を実践に結びつけて行なう、地質探査やそれによる総合分析等は引き続き研究を進め、より完全なものにする必要がある。我々がまだ研究していない、或は研究の立ち遅れている分野、例えば模擬試験、探査、測量、地滑りの予測予報及び防除やその新技術等を重点的に研究していく。そしてその研究成果を直ちに現場で活用し、地滑りの防除作業に生かす必要がある。

(2) 地滑りの主な研究テーマ

1. 各類型の地滑り破壊のメカニズムの研究

地滑りのメカニズムに関する研究には、地滑りの発生条件、要素、原因及びその発生、発達、動態過程等も包括される。それぞれの地滑りの特性に見合った研究を行なう必要がある。例えば、岩石地滑りには主として地質力学による方法を用いて、粘土地滑りには主として特殊鉱物の特性や特殊鉱物の発生箇所の水文地質条件より研究を行なう必要がある。実地調査と室内試験の双方を総合した方法で地滑り破壊の実態を解明しなければならない。

2. 地滑り発生 of 主な要因の研究

水は通常地滑り発生 of 主な要因であるにもかかわらず、以前は地質探査、観測方法に関して立ち遅れており、また水に関する知識が不十分なこともあり、地下水について系統的に掘り下げた研究を行なわなかった。今後、すべり面土質及びすべり面地下水の鉱物イオン等を地下水の実質的作用、及び応力条件の変化が地滑りの発生に及ぼす影響と結びつけた研究を行なうべきであり、応力集中、すべり面の形成過程等を包括する必要がある。

3. すべり面土の性質及びその変化についての研究

前述した地滑りのすべり面土に対して、地滑りの各類型毎に剪断試験を行ない、設計に資する。同時に初生地滑りと再活動の地滑りについて、各発達段階でのすべり面土強度の衰退状況及びその破壊のメカニズムを研究する。伸縮土地滑りについては、土質と地質形成要因から、そのすべり面土の性質や変化を研究する。液状化現象による地滑りに対しては、その組成物質や構造よりすべり面において振動下の性質や変化を研究する。山崩れ性地滑りは側面の荷重応力の変化や亀裂面の形成等により、そのすべり面上の性質や変化を研究する。

4. 地滑りの地質探査と測定の新技術の研究

総合物理探査により、すべり面と地下水を捜し出し、リモート・センシング技術により地滑りの動態観測と地滑りの分布を研究する。地滑り体及びすべり面の移動、応力測定は遅れている分野で、早急に新しい測定準備、測定方式やその技術を検討する必要がある。新しい地質探査や測量技術の発展は将来必ず地滑りのメカニズムに関する研究に大きく貢献するであろう。

5. 新しい抑止工の施工方法の研究

斜め孔排水を進めていく中で技術問題を研究解明していく必要がある。抑止柱配列設計理論について更に進んだ研究を行なうと同時に、抑止柱にアンカーを打ち、柱群を組み合わせる剛溝構造やアンカー構造等新しい型式の抑止能力を研究すべきである。経済的である上、柱が少なくてすみ、施工の目的がはたせる。化学的方法による地滑りの固めや回転の噴射技術によるすべり体の改造事業も進めるべきである。地滑りの防除作業にかかる労力や作業を削減する新しい領域を開き、我が国の地滑りの防除の分野を先進国レベルに引き上げる。

6. 地滑りの予測、予報の研究

地滑りのメカニズムの研究を更に進めると同時に、測定技術により地滑りの動態過程を研究し、これにより地滑りの予報の理論とその方法を次第に研究解明していく。

II 中国黄土と黄土状岩石

1. 中国黄土と黄土状岩石の分布

1. 中国の黄土と黄土状岩石は主に崑崙山（その北斜面で、青蔵道路に沿う地域全体では黄土が分布されている）、秦嶺、泰山と魯山を結んだ一線の北側にある干ばつと半干ばつ地域に分布され、北緯 30° — 49° の間の地帯に位置し、そして特に 34° — 45° の間の地区において最も発達している。ヨーロッパ各地に於ける黄土と黄土状岩石分布区域と較べれば、その占めている緯度はやや南に偏っている。中国黄土と黄土状岩石分布区内における年間降水量はほぼ500mm未満で、そして250—500mmの地区にはその黄土の分布範囲は最も広い一方、250mm未満或は500mm以上になる地域には黄土および黄土状岩石の分布はやや少ない。
2. 中国に於ける黄土の分布地区の北側は砂漠かまたはゴビ（砂礫砂漠）であって、北から南へ向い、順にゴビ、砂漠、黄土の3者に徐々に過渡し、带状配列を呈している。砂漠地区に接近している黄土の顆粒成分がより粗くなる。黄土の切断面の中に風成砂層が挟まれてあることは黄土と砂漠、ゴビの間に密接な関係が有ることを証明している。
3. 中国における黄土の分布は早更新世以来だんだん拡大し、連続的な超覆（over lap）によって形成されている、この様な連続的な超覆は黄土区域内あるその他の第4紀沈積の分布形式と異なっており、黄土が地勢の高低に局限されない、この様な一定の気候帯による超覆は、中国北部の地質構造の相対的な安定および、気候条件が第4紀晩期から徐々に乾燥状態に成っていることに関係している。
4. 中国北部の各地における自然地理条件と地質地貌条件に従い、大体、黄土を4つの分布区に（現有の資料に基づいて）分けることができる：1. 黄土高原区、2. 華北区、3. 東北区、4. 西北内陸盆地、この4つの区に於ける黄土の分布、発生状態、地層および厚さ等はそれぞれ特徴を持っているが、その中で黄土高原の黄土が最も発達していて、典型的な黄土である、分布状況においては、黄土高原の黄土は基本的には連続的で、西から東に向い、徐々にその分布がバラバラに成っていく、その厚さに関しては、黄土高原区が一番厚く、そして東から西へかけてだんだん薄く成っていく、埋藏土壌の發育についても黄土高原区ではその層の数が最も多く、そして東より西に向かって層数が漸減し、西、北ではその發育が不完全である、これらのことは全て黄河中流地域が第4紀以来黄土の堆積に有利な状況に有ることを裏付けている。

2. 中国の黄土堆積の地質時期

1. 中国の黄土の中に含まれている脊椎動物化石に基づき、黄土をそれぞれ早更新世黄土（午城黄土）、中更新世黄土（離石黄土）と晩更新世黄土（墨蘭黄土）に分けられる、馬蘭黄土の上に尚厚くない全新世黄土（Holocene epoch loess）の堆積が見られる、したがって中国の黄土は少なくとも早更新世から既にその堆積を始め、しかも第4紀にその全部を経過して、今尚続いている。

各地の黄土の断面を比較した結果、異なる時代の黄土の厚さも互いに違ふ、そのうち、離石黄

土が最も厚く、その次が馬蘭黄土で、そして午城黄土がやや薄く、全新世黄土が最も薄い、だから、中国北部の黄土の堆積は中更新世時期にその速度が最も大きい。

2. 中国の各時期の黄土は多くの地区において上下積み重ねに形成しているが、馬蘭と離石黄土の間、離石と午城黄土の間および離石黄土の上、下部の間には全てはっきりした不整合面（侵蝕面）が存在し、しかも河谷と凹地の中に河湖相沈積が見られる、これらは中国の黄土が連続的に沈積しているが、その間になお幾つかの間隔も存在していることを証明している、これらの間隔に適応していたのは乾燥から湿潤と変わる気候条件である。
3. 中国黄土とその他の第4紀沈積物地層の関係、とりわけ河湖相地層との関係は中国北部第4紀地質研究において重要な問題である、しかし過去にこの問題に関する研究は非常に少なかったし、従来の研究者達がこの両者間の関係を相変化と見ている、つまり黄土と河湖相沈積の関係は横方向において過渡的で、その時代も同じであると考えていた。

黄土高原の多くの化石を含む断面の研究を通じて、黄土と河湖相の間には殆ど互い積み重ねの関係にあることが分かる、黄土と河湖相沈積の互いの積み重ねは黄土堆積の過程において、気候が徐々に乾燥へ移り変わっていくのを基調としながら、その間に何回かに気候条件が湿潤に変わることに逢った事を反映しているものである。中国北部各地の黄土と黄土状岩石および河湖相沈積の研究に基づいて、初歩的にこれらの接触類型を3種類に区分することができる：第1類型が黄土が互いに積み重ね、その間に幾つかの侵蝕面によって隔離されている、黄土高原がこのパターンに属する地区の1つである、例えば山西、甘粛及び河南北部等が含まれている、但し一部の河谷地区を除外する：第2類型が黄土と河湖相がそれぞれ交替して現れる、このパターンに属する地区の中に黄土高原の東南部および大河河谷地区が含まれている：第3類型が積み重ねの連続的沈積で、断面上の顆粒成分が粗いものから細かいものへの何回かの旋回しか反映していない、このパターンの中に華北平原が入る。

3. 中国の黄土の物質成分

1. 中国黄土の顆粒成分は主に粉末土である（平均値は大体50%を超す）0.25mmを越える粉級になるものは黄土の中に普通ないかまたは極めてすくない、粗粉土の含有量は細粉土より多いことは中国の黄土が極めて典型的であることを示している。中国黄土の絶対多数のものは軽亜粉土と中亜粘土に属している、軽亜砂土と重亜粘土は甚だ少ない。
2. 中国黄土の鉱物は60余種類に上るが、そのうち石英、長石を主とする。鉱物の種類から見て、非常に複雑なものである。火成岩、変成岩と沈積岩等の岩石から来ているものと思われるが、異なる地区と異なる時代の黄土の鉱物成分は互いに種類と含有量の面において極めて接近している、このことは中国の黄土の鉱物成分が西北部の広大な砂漠地区から由来し、運搬されている内に高度に混合して、更にその西北部の多斯とアラ善砂漠にも関わっている。

中国黄土の中に不安定な鉱物成分が非常に多く、大量な角閃石、輝石と黒雲母等の鉱物が保存されてある、粘土の中は主にモンモリロナイトとイライト鉱物である、だから、黄土は乾燥した気候条件の下で形成されたものと示されている。

中国の黄土の鉱物成分のもう1つの特徴はいまだに海緑石が発見されていないことである。このことはおそらく中国北部及び北部の近隣地域に海相地層が欠乏していることに関係するかもし

れない。これは世界各国の黄土の鉱物成分と違っている所である。

3. 中国の黄土の化学成分は SiO_2 と Al_2O_3 を主とする。それぞれ 50.84—55.58%と 10.89—11.68%を占めている。分析の結果、異なる地区と異なる時代に於ける黄土の化学成分が互い非常に接近していることは判明された。ただしその主要な化学成分の中に次の様な変化が有る：黄河中流地域の SiO_2 , FeO , CaO , Na_2O は西北部から東南部へ向けて漸減する反面, Fe_2O_3 , Al_2O_3 等の成分が幾分増加する、遡る時代の黄土は古いものから新しいものへ変わっていくに連れて、その SiO_2 , FeO 等の含有量が漸増する一方, Al_2O_3 , Fe_2O_3 の含有量が減少する。

黄土の顆粒、鉱物、化学成分等の分析に基づいて、異なる地区、異なる時代に於ける黄土は基本的に類似していることが分かる。この類似性は各地の地質地貌条件にあまり関係しない様で、これは地質地貌条件の影響を受けやすい坂積 (slope wash), 洪積, 沖積, 氷川等の沈積物と違い、両者間に鮮明な対照が形成されている。このことは先ず黄土の物質成分が沈積区以外の遠い処から由来し、大面積にわたる各種類の岩石より供給され、そして長距離の移転運搬の内に高度に混合されている。

黄土の顆粒、鉱物、化学成分等が基本的に規律のある変化を呈している。西北から東南にかけて方向性のある変化を見せている、この特徴はその物質が西北部の広大な地区をその源としていることを表している。

中国の黄土の物質成分は異なる時代における黄土は互いに非常に大きい一貫性を持っている。これは各層の黄土の関係が密接であることを示しているにとどまらず、そのそれぞれの成因においても関わりがもたれていることを意味している。それによって中国北部第4紀以来の侵蝕と堆積条件が相当に安定し、そして侵蝕と堆積条件のその安定性がまた古い地理条件の安定性に関わりが有ることを間接に証明されたことになる。

4. 中国の黄土の沈積条件

1. 現有の黄土に保存されている脊椎動物の化石に基づいて見ると、乾燥を好む齧歯類動物を主とするが、その他の喜湿動物はとても少ない。

孢子花粉の分析結果もその中ではヨモギ属とイネ科植物を主として、木本植物花粉が従属な地位を占めることを明らかにした。これは黄土堆積当時の気候条件が相当に乾燥していたことを反映する。黄土の顆粒、鉱物と化学成分等の分析結果もその顆粒成分が粉土を主とし、不安定な鉱物の含有量がとても高く、鉱物風化が弱く、大量の炭酸塩や石膏とモンモリナイトを含み、 pH 値がとても高いことを表明している、これらすべての特徴は黄土形成その当時の気候条件が相当に乾燥だったと証明したことになる。

しかし、異なる時代における黄土堆積当時の気候条件が終始変化しないわけではない、なぜなら、午城、離石、馬蘭各異なる時代の黄土の中にはいずれも埋蔵土壌層が夾まれているのを見つけたからである。これは黄土堆積の過程において、乾燥気候条件を主とする以外に、その間何回もの乾燥寒冷から湿潤温暖に変わった段階もあることが説明されている。しかし、ある時期での変化回数は黄土の中から発見した埋蔵土壌層の層数の多少によって決められる。午城黄土の中の埋蔵土壌層がやや多く (たぶんその中の一部分のカルシウム質結核層が成土作用に無関係である)、離石黄土の中では比較的少ない (上部が下部より少ない)、馬蘭黄土の中ではもっと少な

い、これは黄土堆積当時の気候条件の変化回数が徐々に減少していたことを証明している。

2. 黄土下部における塩基性岩の地形輪郭は白亜紀末期に形成された。第3紀時期で更に加工された。起伏する丘もあれば、広々とした平坦な古盆地もある。その特徴の違いによって7つの種類に分けられる。

埋藏土壌層の形成状態が古地面の形態を反映する。午城黄土の中に、埋藏土壌の横の切断面はほとんど水平に近く、離石黄土の下部ではやや傾斜を呈し、そして離石黄土上部では非常に大きな曲がりくねりが見られる。これらの特徴は午城黄土堆積当時の古地面は平坦だったが、午城黄土堆積以後、地面が軽く切られたり、削られたりして破壊され、離石黄土堆積時期になって、地面が既に大きな起伏を呈し、馬蘭黄土堆積以前に既に現代地形基礎がほぼ形成されてしまったことを物語っている。故に、いま観察できた黄土地形の大部分が馬蘭黄土堆積以後に侵蝕を受けて形成したものではなくて、第4紀の全時期にわたって堆積と侵蝕の相互作用を経て形成されたものである。

中国の黄土地形は塬(平台)、梁(loess flat-topped ridge)、峁(loess replat)と3つの相違う類型に区分けられる。この3種類の地形がそれぞれ一定の分布地理位置を有し、しかも古地形と相符合する。塬の下部基底が平坦で、梁、峁の下部基底が丘陵起伏となっている。同様に、梁、峁地形は必ずしも原が侵蝕を受けることにより形成されたものではない。だから黄土地形発育過程を単に塬から梁に、そして梁から峁に変わってきたものと理解してはいけない。

5. 中国黄土の分類及び岩相変化

1. 中国黄土はその細砂と粘土の含有量によって、砂黄土、黄土と粘黄土1)に分けられる。砂黄土中の細砂($>0.05\text{mm}$)の含有量は30%より高い。粘土の含有量が15%より低い。黄土中の細砂の含有量が15-30%、粘土の含有量が15-25%、粘黄土中の細砂含有量が15%より低い、粘土の含有量が25%より高い、この3つの種類の黄土は平面上において、規律な分布を呈しているが、砂漠からの距離の遠近と時代の新、旧の違いに伴って、変化も見られる。
2. 現在手元の分析資料がさほど多くないにも関わらず、中国黄土の岩相の変化規律が顕著と言える。

相変化の事実根拠の1つは塔里木、准葛爾、柴達木等の地域の黄土が黄河中流の各地の黄土より、更に多くの細砂成分を含有する一方、山東地区の黄土の顆粒は比較的細かく、粘土成分の含有量が高い。この地区性の差異は各地における地質、地貌条件、とりわけ気候条件上の差異に関連し、新疆と柴達木の黄土がより乾燥の条件の下に形成しているのに対して、山東地区の黄土が黄河中流地区の黄土よりもっと湿潤の条件の下で堆積されたことを反映している。

相変化の事実根拠のもう1つはゴビと砂漠を中心として外側に向けて、顆粒、鉱物、化学成分が規律な変化を見せている。特に顆粒成分の変化はそうである。黄河中流において、砂漠から外側へ(西北から、東南へ)向けて3つの岩相帯に区分けすることができる。第1帯は、砂黄土；第2帯は、黄土；第3帯は粘黄土である。准葛爾と東北等の地方に対していまだに大量の顆粒分析を行ったことはないけれど、砂漠から外側へ向けての黄土顆粒は段々細くなっていくことと、典型的な黄土と砂漠の間に、砂黄土帯が存在していることはとても明白である。黄河中流地区では馬蘭黄土の変化がその通りであることを発見したばかりでなく、また離石-午城黄土も同様の

変化規律を呈している。

中国黄土の中では相変化が存在する原因は風力作用により形成されたと考えられる。風化の土壤形成作用は異なる時期においては大きな補助作用を発揮しているのである。

3. 中国北部の黄土堆積はその分布、生成形状、岩の性質、物質成分等などに基づいて、黄土と黄土状岩石に分けられる。

黄土中の動物化石が陸生を主とすること、黄土は違う高度、違う地貌単位(morphologic unit)の上に覆って、全層の上下が均等であること、砂と礫石から成る中間層(gravel bed)がなく、顆粒、鉱物、化学成分等がその下、或はその近隣の山地の塩基性岩石成分と直接な関係を持っていないこと、また顆粒、鉱物、化学成分が砂漠より外側に向けて規律的な変化を有すること、これら全てのことに基づいて中国黄土が風によるもの(風成)だと証明されている。しかし広々とした黄土の分布区における地理、地質条件が余りにも複雑の為、黄土堆積時期において、ある局部地区には風以外のその他の地質営力の参与が有ることも考えられる。

黄土状岩石が普通よく地勢のやや低い位置に分布し、そして岩性(lithological)からみて、分水嶺から河谷へ向けて顕著的な変化を見せていて、しかも砂、礫石層を夾むこと等の特徴、これらの全ては黄土と違って、これは流水作用で形成されたものであることを証明している。

黄土と黄土状岩石は互いに転化しあう。地質構造と地形条件が黄土堆積に不利である時、風によって運ばれてきた大量の塵土が地上にそのまま保存されにくい。そのため、分水嶺、山の斜面から河谷やくぼ地へ移動していく。移動しているうちに当地の塩基性岩の碎屑が混ぜ込まれて、砂、礫石から成る中間層が形成され、層理構造(bedding)ができた。ところが、これに反して、もし早期沈積した黄土状岩石が地表に露出したら、風で吹き上げられて、したがって黄土状岩石が更新した黄土に形成することになる。

黄土は第4紀地質歴史時期において広々とした乾燥地区での特殊風化、風力による運搬のお蔭で堆積した産物であり、わが国の黄土堆積の主体である。

-
- 1) 粘黄土は細黄土とも呼ばれる。

Ⅲ 地すべり抑止壁の設計施工基準

(滑坡防治第7節地すべり抑止壁翻訳)

地すべり抑止壁

地すべり抑止壁は地すべりを防止するためにしばしばもちいられる有効な対策の1つである。大規模な地すべりに対しては、排水工・排土工などとともに総合的な対策の一環として用いられる。中小規模の地すべりに対しては単独で用いられる。また、支え暗渠工と併用すればさらに効果が高い。地すべり抑止壁工の利点は、地すべりを安定化させる効果が速いこと、現地の材料を使用できること、施工性がよいことなどである。しかし、地すべり抑止壁工を使用する場合には、地すべりの性質・地すべり体の構造・すべり面の数や位置・地すべり推力及び抑止壁基礎の状況などを明かにしなければならない。それを怠れば、地すべり抑止壁の変形がおこり、対策工事の失敗につながる。

通常の擁壁と同様に地すべり抑止壁もその外力の条件や壁体材料及び構造によっていろいろな種類に分けられる。たとえば、(練石積み式・コンクリート式・実体式・組立式・床板式) などである。本節では山岳鉄道においてしばしば用いられる重力式地すべり抑止壁と特別な条件下で用いられるケーソン式地すべり抑止壁の特徴を中心に紹介する。

1. 地すべり抑止壁に作用する土圧力

地すべり抑止壁と通常の擁壁の主たる違いは受ける土圧力の大小・方向・分布・作用位置である。通常の擁壁の受ける主動土圧力はクーロン理論やランキン理論によって算出する。その最も危険な破壊面と土くさびによる土圧は、すべて擁壁の高さ及び背面形状によって変化する。また、この土圧力の方向は、背面形状や粗さに関係しており壁面と一定の角度をなし土圧力は三角形分布をなす。そして合力の作用点は壁底より3分の1のところである。

地すべりの破壊面は形と位置の決まったすべり面である。これは地すべり抑止壁の高さや背面形状とは関係ない。すべり面の出口は地すべりの性質によって決まり、出口は路基の法尻にも法面中にもあるいは路基面下方にも存在する。地すべり抑止壁に作用する土圧力ー地すべり推力には以下の特徴と仮定がある。

- (1) 推力の大きさは地すべり推力によって計算する。(第6章参照)
- (2) 地すべり体の構造的特徴に基づいて、地すべり推力の方向は抑止壁背後の長いすべり面(帯) に平行と仮定する。(図7-45)
- (3) 地すべり推力の分布と作用点：地すべりは一体となった移動を行うため、その推力の分布は三角形ではない。いままで、この分布はすべり面から壁頂まで矩形であり、合力の作用点はすべり面から壁頂までの2分の1と仮定してきた。この仮定を検証するため我々は現場実験を行い、地すべり抑止杭及び抑止壁背後に土圧計を埋設した。4年間の観測によって図7-46に示されるような結果が得られた。この図から以下のことが読み取れる。

垂直の杭に対して、その土圧分布は矩形に近い梯形になり(7-46)、中部が大きく上下がやや小さい。その合力作用点はすべり面から壁頂までの1/2～1/2.5にある。これは今までの推力が矩形分布をすると仮定して設計することは現実に近く、安全側であることを示している。地す

べり抑止壁の推力分布図は、すべり面が多数の場合や抑止壁の形状が不規則な場合は観測が必要である。

上述の仮定は、中～厚層地すべりに対しては現実にあっている。飽和粘性土の浅層塑性地すべりではその合力の作用点はすべり面から壁頂までの $1/3 \sim 1/2$ の間にあると考えられる。しかし、現在のところ実際の観測資料はない（詳細は第6章参照）。

ある場合には抑止壁の背面は、すべり面付近はみだされていないしっかりした土層で、上部はばらばらになった埋め戻し土である。このような場合には地すべり推力は下部に分布し合力作用点も壁高の $1/3$ くらいにある。具体的な状況を見て作用点は採用すべきである。

- (4) 通常、地すべり推力は普通の土圧力より大きい。普通は地すべり推力によって設計するが、中小地すべりに対しては地すべり推力と普通の土圧力と比べてその大きい方で設計する。

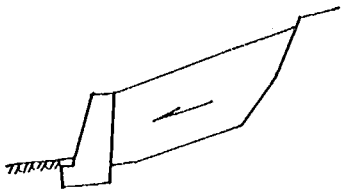


図7-45 地すべり推力の方向

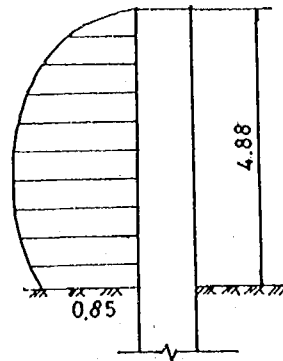


図7-46 地すべり抑止杭上の圧力分布図

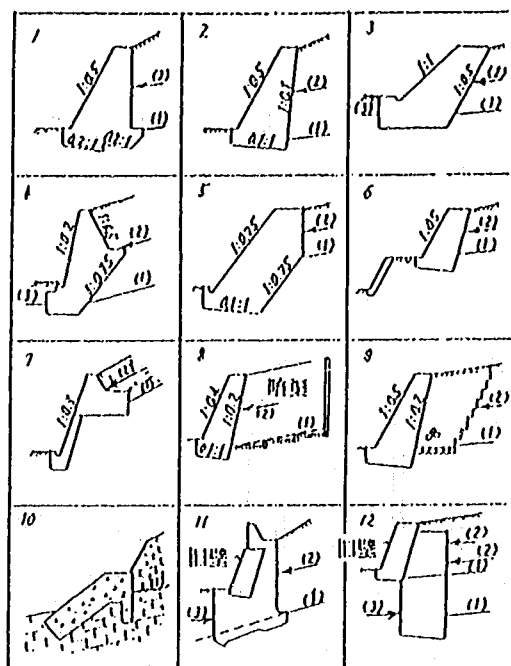
2. 地すべり抑止壁の構造の特徴

地すべりの推力が大きく、作用点も高いため重力式地すべり抑止壁は前面が緩く外形が低い特徴がある。地すべりの構造は様々であるため、地すべり抑止壁の断面形式も様々であり、標準形式はない。ここでは、現在まで鉄道で用いられているいくつかの形式を図7-47に示すので参考下さい。

地すべり抑止壁の構造の特徴は次の通りである。

- (1) 前面勾配；前面勾配は緩い。通常 $1:0.3 \sim 0.5$ が使われるが $1:0.75 \sim 1.1$ も使われる。
- (2) 卸荷平台；壁背後には卸荷平台を設け、工事量を節約する。平台の広さは実際の状況を見て決める。普通は $1 \sim 2$ m である。平台の上には透水性の土石を埋める（図7-47の1と9）。これが、壁背後の地下水を抜き抑止壁の工事量を減少する効果がある。できるかぎり平台を設けるべきである。その底部はすべり面下に置かなければならない。そして排水工を設置する。しかし平台が広すぎて地すべりを掘削しすぎると地すべりを誘発する恐れがある。
- (3) 壁の高さ；抑止壁施工後、地すべりの出口が塞がれ、地すべり推力の作用下で、すべり面が方向を変えて壁頂の上から滑り出す可能性がある。だから、壁の高さを決めるには検算をしなければならない（実例参照）。必要なときには工程地質法で確認する。
- (4) 壁基礎の形式・根入れ深度及び前面受働土圧；壁基礎の根入れ深度が不十分のために工事が失敗する例は多い。通常、壁基礎の根入れ深度はすべり面が下方に移動する可能性を考慮し検算を

行って定める。通常、基礎を堅固な岩盤中に埋める場合は0.5 m以上、安定した土層に埋める場合は2 m以上の根入れが必要である。滑動抵抗力を増加させるためには基礎底面を傾斜させたり階段状にする。土層基礎の場合、底面傾斜は0.1:1～0.15:1が適当である。これにより基礎及びその下方の土体と一緒に滑動することが免れる。岩盤基礎に対しては、壁底面に作用する反力と岩層面をはほぼ垂直にさせる。そしてときには1～2段の階段をつくる。



- (1) すべり面
(2) 地すべり推力
(3) 受働土圧力

図7-47 地すべり抑止壁構造形式図

壁基礎の根入れ深度が大きい場合には壁前面の受働土圧を勘案し抑止壁断面を節約することができる。しかし、受働土圧を考慮できる条件を考えなければならない。すなわち、壁前面の土体は移動してはいけない。また土体が除かれて前面がさらされてはならない。また壁の移動によって地すべりの範囲が拡大したり他の構造物の破壊を招いてはならない。

受働土圧は普通、クーロン土圧理論によって計算する。壁前面の地表面が水平な場合の最大受働土圧は

$$E_p = \frac{1}{2} \gamma H^2 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)$$

となる。

ただし、

γ : 壁前面土体の単位体積重量 (t/m^3)

H : 壁基礎の根入れ深さ (m)

ϕ : 壁前面土体の内部摩擦角 ($^\circ$)

受働土圧力を期待できる最小根入れ深度については、現在でも一致した見解はない。しかし、我々は安定した土層に対しては、 $H_{\min} = 3.5 \text{ m}$ を提案している。これは現場測定の結果とほぼ一致している。具体的な使用の場合、地すべりの性質・規模・壁位置の地盤状況・今後の変化・作業方法などを総合的に考慮しなければならない。

内部摩擦角 ϕ 値の規定にあたっては適当な安全率を考慮するべきである。

- (5) 壁背後の2方向の暗渠の設置；壁背後の縦方向の暗渠の設置は、土体内地下水を地すべり体外に排出し、地すべり体を支え滑動抵抗力を高めることができる（図7-48）。最も重要な効果は、壁背後に水がたまり壁基礎に水が浸入し抑止壁が滑動することを防ぐことができることである。現場の状況に応じて使用すべきである。また、支え暗渠と同時に使用するときには、その底部に排水管を設置することが、排水と検査に役立つ。

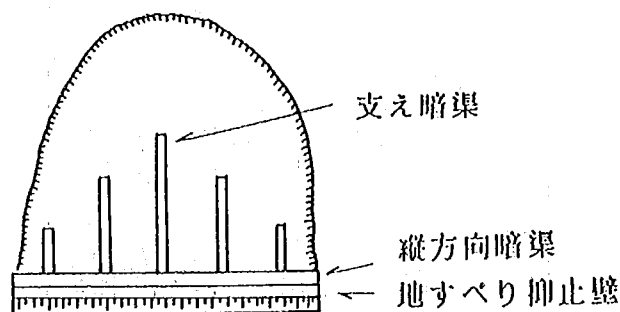


図7-48 抑止壁工と暗渠工

- (6) 地すべり抑止壁の伸縮目地、排水孔の設置は普通の擁壁と同様であり、ここでは省略する。
 (7) すべり面の深度が深すぎて、作業が困難な場合は、ケーソン式地すべり抑止壁が用いられる。

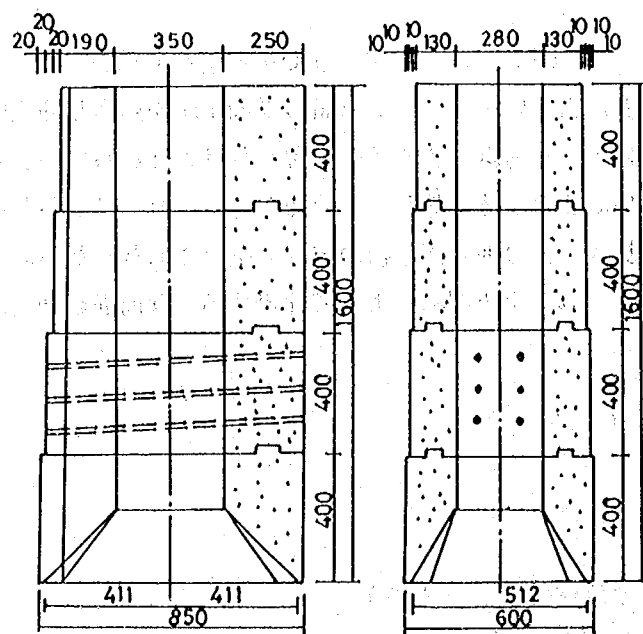


図7-49 ケーソン式抑止壁

貴昆線鉄道の二梯山隧道出口にある地すべり対策において縦横深さ $8.5 \times 6.0 \times 12\text{m}$ の5つのケーソン式地すべり抑止壁が採用され良い効果があった。その構造図を図7-49に示す。

3. 地すべり抑止壁の配置

地すべり抑止壁の配置は戦争で陣地と攻撃地を選ぶのと同様である。配置によって工事の効果や経済性、施工性に影響がでる。これは地すべりの範囲、推力の大きさ、すべり面の位置、形状、数、工事の安全性、抑止壁基礎の状況などとすべて関係がある。ここでは鉄道の地すべりにおいてよく用いられる方法について説明する。

- (1) 簡単な中小規模地すべりに対しては抑止壁は地すべりの末端側に設置するのがよい。
- (2) 地すべりの中下部にしっかりした岩盤が露出して地すべり体が狭まっている場合（鎖口）この位置に設置することができる。壁より下部についてはすべり体の大きさ、厚さ、地下水等を考慮し安定状態をみて対処する。
- (3) すべり面の出口が路基面付近にあり線路や建物から一定の距離がある場合や、線路の位置を移せる余裕がある場合には壁はできるだけ線路に近付け壁背後には卸荷平台を設ける（図7-51）。これは工事量を節約するばかりではなく施工する上でも便利である。線路を移す余裕がない場合には壁は法面の法尻に設けるほかない。

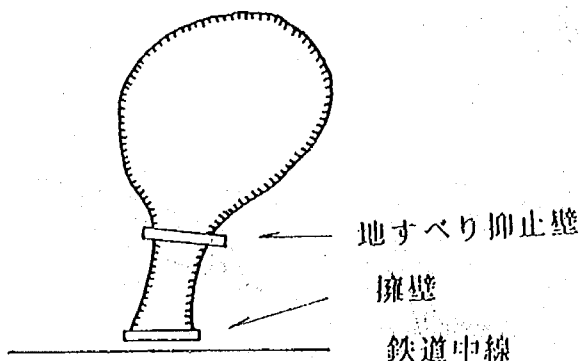


図7-50 鎖口付近への抑止壁の設置

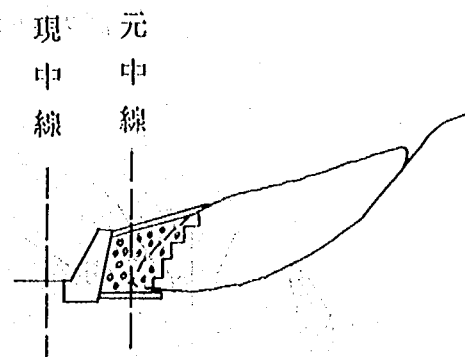


図7-51 壁背後の卸荷平台

- (4) すべり面の出口が法面中にある場合はすべり面下の基礎地盤の状況を見て地すべり抑止壁の位置を決定する。
 1. すべり面下の地盤がしっかりした基岩で抑止壁基礎となりうる場合には、上下に壁を分けて上は抑止壁工、下は法面保護工とする（図7-47の6）。
 2. すべり面下の地盤が弱く、抑止壁基礎となりえない場合には基礎は法尻以下に設置するほかない。
- (5) すべり面の出口が法面の高い位置にでる場合には、基礎の状況を見て明りトンネルを設置しトンネル頂部の埋め戻し土で地すべり推力を支える。あるいは地すべり体をトンネル頂部から滑らせる（図7-52）。地すべり抑止明りトンネルは地すべり推力作用下での特別な設計が必要である。
- (6) すべり面が路基面以下にあり、路基が地すべりと一緒に滑動する場合、例えば地すべり末端が

水にさらされる場合などは（図7-53），まず河岸で抑止工や保護工を施工する。地すべり全体が安定したのち，法尻付近から地すべりがすべり出す可能性の有無を検討して抑止構造物の設置が必要であるかどうかを決定する。

- (7) 地すべりが多段すべりである場合，地すべり体の中部に薄い部分がある場合には，法尻位置での総推力や工事量が大きくなるのを避け，複数の段に分けて施工することができる（図7-54）。この場合，杭・壁結合の形式を用いてもよい。

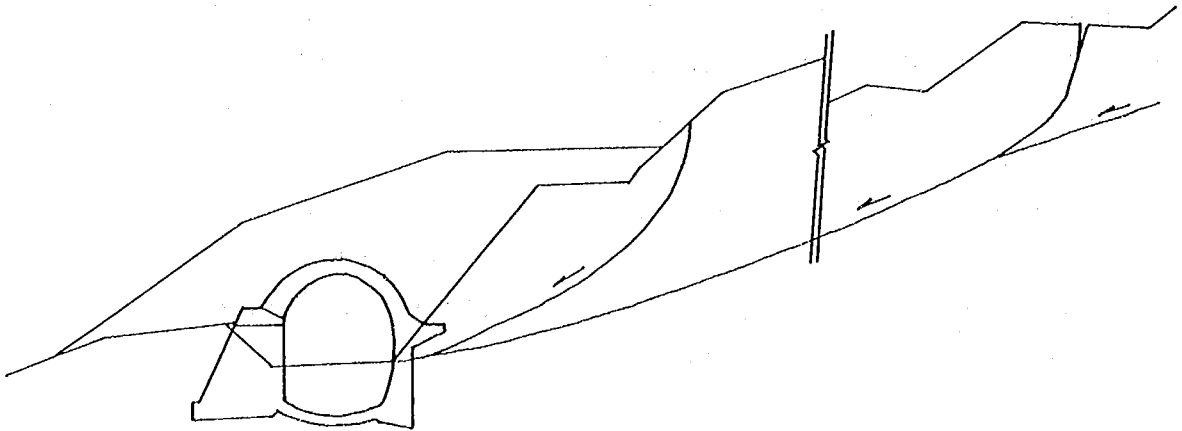


図7-52 地すべり抑止明りトンネル

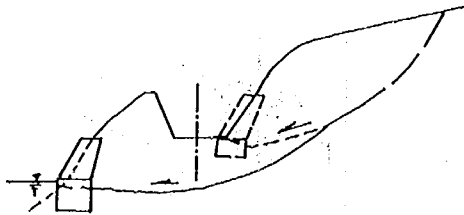


図7-53

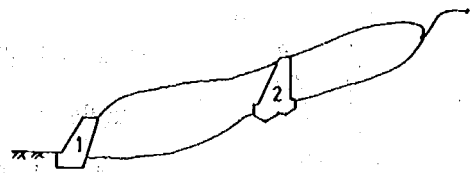


図7-54

- (8) すでに抑止壁があり，これを補強する必要がある場合，具体的な状況を見てもとの抑止壁の前後に新しい壁をつくることができる（図7-47の11，12）。或は壁の前面に土石を積んで抑止力を高める。ただし，もとの壁を補強することはしばしば新しい壁をつくるよりも工事が難しいため慎重に検討すべきである。
- (9) 地すべり抑止壁の縦断面については，地すべり体の地質条件および推力の変化に基づいて，多数の横断面（通常10～15mに1つ）を選び，異なる断面を設置すべきである。

4. 地すべり抑止壁の設計計算

(1) 地すべり抑止壁設計に要する資料

地すべり抑止効果を上げるために，地すべりの性質・範囲・深さ・原因・現在の安定度・今後の動き等を把握するほかに，下記の資料を収集しなければならない。

1. 地すべり対策工地質平面図（一般に 1:1500）
2. 地すべりの代表的地質断面図（1:200）
3. 地すべり推力計算図及び資料（各断面の推力の大きさを含む）
4. 地すべり地の水文地質資料
5. 抑止壁設置位置の地質縦断面図（1:200 あるいは 1:500）
6. 抑止壁設置の土質資料（単位体積重量 γ ，内部摩擦角 ϕ ，粘着力 c 等）
7. 抑止壁基礎地盤の許容支持力 σ 及び底面摩擦係数

(2) 設計計算順序

1. 抑止壁設置位置及び範囲の決定
2. 抑止壁高さの決定
3. 抑止壁基礎の根入れ深さの決定
4. 利用可能な受働土圧の計算
5. 抑止壁の滑動・転倒・支持力・断面部材強度の安定計算

(3) 実 例

図 7-55 はある地すべりの主測線断面である。当地すべりは鉄道建設のために洪積層の斜面を掘削したために誘発されたもので、当時緩慢的な移動状態であった。諸案を比較検討した結果、地すべり抑止壁をすべり面出口に施工して地すべりを抑止した。本工法の具体的条件に基づいて選択した設計計算パラメーターは下記の通りである。

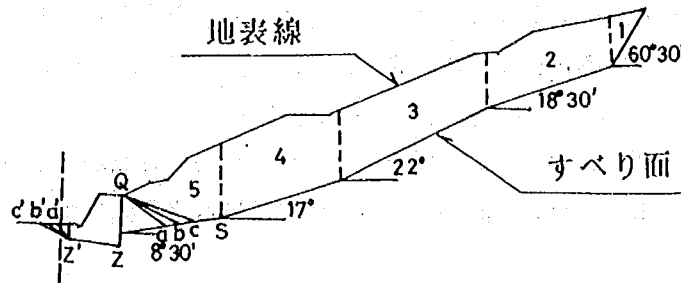


図 7-55 地すべり主測線断面図

地すべりが壁頂部に向かってすべり出す場合を考慮し、壁背面土体の内部摩擦角 $\phi = 30^\circ$ ，粘着力 $c = 0.5 \text{ t/m}^2$ 。

抑止壁の基礎は透水性の栗石上につくり、その許容支持力は $\sigma = 5 \text{ kg/cm}^2$ ，壁底面の摩擦係数 $f = 0.4$ 。

抑止壁前面は水平の鉄道路基面とする。根入れ深さは 3.5 m とし前面受働土圧は $\gamma = 2.0 \text{ t/m}^3$ ， $\phi = 35^\circ$ として計算する。

抑止壁コンクリートの単位体積重量 $\gamma = 2.3 \text{ t/m}^3$ 。

コンクリートの許容せん断応力 $\tau = 3.2 \text{ kg/cm}^2$ 。

コンクリートの許容引張応力 $\sigma = 1.2 \text{ kg/cm}^2$ 。

滑動安全率 $K \geq 1.3$ ，転倒安全率 $K = 1.5$ 。

1) 抑止壁設置位置及び範囲の選定(略)

2) 抑止壁高さの決定

図7-55に示すように、抑止壁背面 qz が確定したら上部から下部に向かって順次 qz まで地すべり推力を計算する。この時、 sz においてすべり面が5番目スライスの c, ϕ 値によって安全な抑止壁高さを計算できるように、すべり面出口をかえることができる。当方法は s から上方へ qz まで可能なすべり面をつくり、マイナスの推力になった時点での高さが安全な抑止壁の高さである。

一般的には地すべり体の状況に基づき、まず適当な抑止壁頂点の高さを仮定した上で、下記の手順により検算する。

- (1) 抑止壁頂点を仮定した後、縁点 Q から下方へ水平線よりなす角 $(45^\circ - \phi/2)$ で伸ばし線 Qa とする。すべり面 SZ 上の点を a とし Qa 沿いのすべりの可能性を検算する。プラスの下降推力がない場合は当面に沿っての地すべりは発生しないことを意味する。

そして、上方(及び下方)へ、 5° ごとに $Qb, Qc \dots$ 等の線を引いて試算し、下降推力が最低ピーク値になるまで検算をおこなう。

- (2) プラス値の下降推力となった場合は、抑止壁高さが不足していることを意味する。マイナス値の最低ピーク下降推力値が大きすぎる場合は、壁が高すぎることを意味し、再度調整する必要がある毎回 1m を目安に安全かつ合理的に調整を行う。

- (3) 妥当な壁の高さを求めてから、 Q 点から Qb の両側へ 1° 毎に Qa から Qc まで線引きを行い、逐一計算をして真の最大下降推力の位置 so, Q を求める。

- (4) so, Q の2等分線上の点を中心として多くの円弧すべり面を書いた上でその下降推力を計算しそのうち、最も危険なのはプラス値になることであり、再度抑止壁高さを調整しなければならない。実際には簡便化計算を行い、一般には(3), (4)は省略してもよく、安全のために sbQ 沿いのマイナス下降推力をやや大きくする。

- (5) 抑止壁背後に荷卸平台がある場合には、平台後方の縁点から下方に線引きを行い検算する。方法は同様で地すべりの可能性がある場合には壁高さを調整する。あるいは他の措置を講じる。

3) 抑止壁根入れ深度の検算

抑止壁設置後、すべり面が壁底面に沿って拡大するか否かは、検算を行わなければならない。特に、土壌地質、壁背面に蓄水の可能性のある場合には行う必要がある。検算方法は、基本的には壁高さの検算方法と同様であるが壁基礎 Z' 点から路床に向かって $Z'a', Z'b', Z'c'$ 等とする。

本工法における壁頂点はすべり面より 5.2m 以上、根入れ深度が 3.5m であれば、検算結果に合う。

抑止壁の設計高さで、背面土圧をクーロン式及びワッター式により計算すると 26.5t と 28.6t となり地すべり推力が 67.4t であるから、地すべり推力によって設計を行うことになる。

4) 壁前面で利用可能な最大受働土圧力

$$E = \frac{1}{2} \gamma H \tan(45^\circ + \frac{1}{2}\phi) = \frac{1}{2} \times 2.0 \times 3.5 \times \tan(45^\circ + \frac{35}{2}) = 45.2\text{t}$$

5) 抑止壁断面設計

地すべり推力 E は、 $8^{\circ}30'$ で下方に向かって壁背面に作用するため、その水平、垂直分力は下記の通りとなる。

$$E_x = 67.4 \cos 8^\circ 30' = 66.7 \text{ t}$$

$$E_y = 67.4 \sin 8^\circ 30' = 10.0 \text{ t}$$

滑動に対して安定な抑止壁の最小断面積は、下記の通りとなる。

$$A = \frac{KE - E - fE}{f\gamma}$$

$$= \frac{1.3 \times 66.7 - 45.2 - 0.4 \times 10.0}{0.4 \times 2.3}$$

$$= 40.8 \text{ m}^2$$

よって地すべり抑止壁の設計断面は図7-56のようになる。

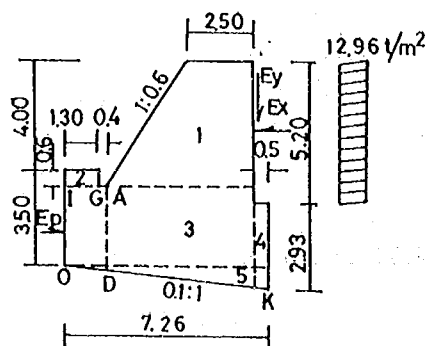


図 7-56 地すべり抑止壁設計断面図

6) 滑動に対する安定計算

単位延長当りの抑止壁重量は分割ブロックの計算により

$$w_1 = 38.9 \text{ t}, w_2 = 1.8 \text{ t}, w_3 = 45.1 \text{ t}$$

$$w_4 = 2.5 \text{ t}, w_5 = 6.1 \text{ t}, w_{\pm} = 5.0 \text{ t}$$

$$\Sigma w = 99.4 \text{ t}$$

底面水平とした場合の滑動安全率は

$$K = \frac{f(\Sigma W + E) + E}{E} = \frac{0.4 \times (99.4 + 10.0) + 45.2}{66.7} = 1.33 > 1.3$$

よって底面を傾斜させた場合について再計算する必要はない。

7) 転倒に対する安定計算

抑止壁が極限平衡状態にある場合、傾斜底面での地すべり抑止に要する受働土圧力は、転倒に対しての安定下においても作用するためこの状態での受働土圧力を求めると、

$$\tan^{-1} 0.1 = 5^{\circ} 43'$$

$$\begin{aligned} f(\Sigma W + Ey) \cos 5^\circ 43' &= 0.4 \times (99.4 + 10.0) \times 0.995 \\ &= 43.541 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\Sigma W + Ey) \sin 5^\circ 43' &= (99.4 + 10.0) \times 0.0996 \\ &= 10.896 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (Ex - Ep') \sin 5^\circ 43' &= 0.4 \times (66.7 - Ep') \times 0.0996 \\ &= 2.657 - 0.0398 \times Ep' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (Ex - Ep') \cos 5^\circ 43' &= (66.7 - Ep') \times 0.9965 \\ &= 66.367 - 0.995 \times Ep' \end{aligned}$$

$$\text{よって } 43.541 + 10.896 + 2.657 - 0.0398 Ep' - 66.367 + 0.995 \times Ep' = 0$$

$$Ep' = 9.273 / 0.9552 = 9.7 \text{ t}$$

壁底面 0 点に対する力のモーメントを計算すると下記のようになる。

$$M1 = 187.9 \text{ tm} \quad M\pm = 35.1 \text{ tm}$$

$$M2 = 1.2 \text{ tm} \quad MEy = 67.6 \text{ tm}$$

$$M3 = 152.4 \text{ tm} \quad MEp' = 11.3 \text{ tm}$$

$$M4 = 17.5 \text{ tm}$$

$$M5 = 29.5 \text{ tm}$$

$$\text{よって } Mo = 502.5 \text{ tm}$$

$$MEx = 326.8 \text{ tm}$$

$$Ko = \frac{\Sigma Mo}{MEx} = \frac{502.5}{326.8} = 1.54 > 1.5$$

8) 底面応力の計算

抑止壁の傾斜底面の長さは $B = 7.30 \text{ m}$

合力の偏心距離は

$$\begin{aligned} e &= \frac{B}{2} - \frac{\Sigma Mo - MEx}{(\Sigma W + Ey) \cos 5^\circ 43' + (Ey - Ep') \sin 5^\circ 43'} \\ &= \frac{7.30}{2} - \frac{502.5 - 326.8}{(99.4 + 10.0) \times 0.995 + (66.7 - 9.7) \times 0.0996} \\ &= 2.12 \text{ m} > \frac{B}{6} = \frac{7.3}{6} = 1.22 \end{aligned}$$

応力分布に基づいて底面の最大応力を計算すると

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{2 \{ (\Sigma W + E) \cos 5^\circ 43' + (Ex - Ep') \sin 5^\circ 43' \}^2}{3 (\Sigma Mo - MEx)} \\ &= \frac{2 \{ (99.4 + 10.0) \times 0.995 + (66.7 - 9.7) \times 0.0996 \}^2}{3 (502.5 - 326.8)} \\ &= 49.8 \text{ t/m}^2 = 4.98 \text{ kg/cm}^2 < 5 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

9) 抑止壁の部材断面の検算

一般の擁壁と同様であるので省略する。

(4) 地すべり抑止壁設計における注意事項

1. 一般的な状況では地すべり推力の分布は矩形であるため、抑止壁上部にかかる圧力分布は一般の土圧力より大きい。壁上部の部材断面の検算には注意を要する。
2. 壁の背後に2層以上のすべり面がある場合には、その活動状況に注意する必要がある。各すべり層の地すべり推力に基づいて総合的な推力分布図形（各図形の包絡線を取る）を描いて検算を行う。特に上部の幾層かのすべり面での抑止壁部材断面の検算は大切である。この点に注意しなかったために抑止壁上部でせん断されるケースが多い。
3. 地震力、水圧等の付加力を考慮しなければならない地すべり抑止壁の場合の計算は一般の擁壁と同様である。
4. 旧抑止壁が安定性を失ったり、或は地すべりによって破壊された場合は補修工事を行うが、この時、検算によって部分的に断面を増して補修を完全なものにする必要がある。抑止壁補修のための計算は新設計をするのと基本的には同様であるが特に注意しなければならない点は新旧両壁の接合部の断面計算であり、必要に応じて鉄筋やその他の部材で補強し、新旧両壁が違和感なく地すべり抑止効果を発揮できるように配慮する。
5. ケーソン式地すべり抑止壁を採用する場合の計算も上記と同様であるが下記の点に注意する。
 - (1) 発破時に壊れないように表面土台部分は特に強固にする。
 - (2) 沈下防止のために下を大きく上を小さくする断面設計が望ましい。

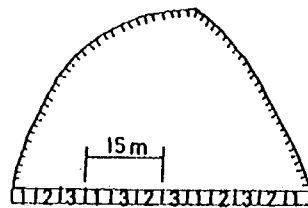


図 7-57 地すべり抑止壁の施工順序

5. 地すべり抑止壁の施工上の注意点

- (1) 地すべりは雨季には移動が加速され乾季には緩慢になるか相対的に安定化するため、施工の安全性から、乾季に施工するとともに、施工前に排水工事を行わなければならない。
- (2) 分割掘削、抜き掘りを要する場合は地すべりの活動状況によって間隔を決定し、溝引き状の掘削は全面的に禁止する。掘削作業によって生じる局所的な崩壊が全体的移動に移行するケースが非常に多い。

成昆線の地すべり抑止壁施工においては施工の便を考慮して、掘削運搬機で溝引き状の掘削を行った。抑止壁の基礎底面まで掘削したところ地すべりは全面的となり掘削した坑はすべて埋まってしまう、再度分割掘削せねばならず、またすべり土塊も軟らかくなり施工に支障を来すことになった。

一般には、抑止壁の全長を10～15mに分けて、各々の掘削量は地すべりの移動状況を見て決定するが、全長の1/4～1/5以上にならないようにし、一段掘ってはただちに埋め戻し、順次各段

を掘削する。図7-57に示すように、局所的な崩壊が全面的な地すべりにならないように注意する。

- (3) 施工は一般には地すべり体の端から中央に向かって行い、中央での推力が大きくかつ集中することによって施工に問題が生じないようにする。
- (4) その他については、一般の擁壁と同様である。

中国の地すべり現地調査報告書
(主に黄土地帯の地すべりについて)

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第3046号
平成4年1月(1992)

地すべり研究室 室 長 吉松弘行
新 潟 試 験 所 所 長 鋼木亮介
地すべり研究室 主任研究員 近藤観慈
同 部外研究員 山田琢哉*

*現 復建調査設計株式会社

要 旨 本報告は、中華人民共和国(以下中国と称す)の自然条件(地形、地質、気候)と黄土の概要を紹介するとともに、現地調査をはじめとする諸調査、現地で得た資料に基づき、中国の西北地域に分布する黄土の地すべりを中心とした地すべりの概要及び中国で実施されている対策工についてとりまとめたものである。

キーワード：地すべり、中国、中華人民共和国、黄土、移動土塊、致達範囲、対策工

郵便はがき

41円切手を
はって下さ

305-□□

建設省土木研究所

地すべり研究室 御中

茨城県つくば市大字旭一番地

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第3046号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名 印

土木研究所資料第3046号