

断層変位による建造物の被害発生メカニズムと対策手法

関西大学 八尾 眞太郎
朝日新聞社 村山 恭平

1. はじめに

直下型地震における断層周辺での建造物被害状況は文献 1～7) 等に報告されている。地震が発生した時に断層の動きに伴って断層周辺においては準静的或いは衝撃的に地盤変形が発生する。断層周辺の建造物はこのような地盤変形と一般的な地震動の両者の影響によって被害を蒙ることとなる。本論ではこのような断層周辺に発生する地盤変形のことを断層性地盤変形と称する事とする。断層性地盤変形の実態、断層性地盤変形と建造物被害の因果関係を兵庫県南部地震における被害調査結果に基づいて分析検討した。

2. 既往の調査と対策

米国においては、サンアンドレアス断層が西海岸に平行しており、この断層を震源とする多くの地震によって、サンフランシスコ、ロスアンゼルス等の都市部では大きな被害を蒙っている。Peter I. Yanev⁴⁾は、このような被害の中で、断層性地盤変形にまつわるものをつぶさに調査して、断層近傍にある建造物の被害状況とそれに対する対策について述べており図 1 のようにまとめている。このような調査研究の結果を踏まえて、カリフォルニア州では次のような“断層法”(通称)が成立している。

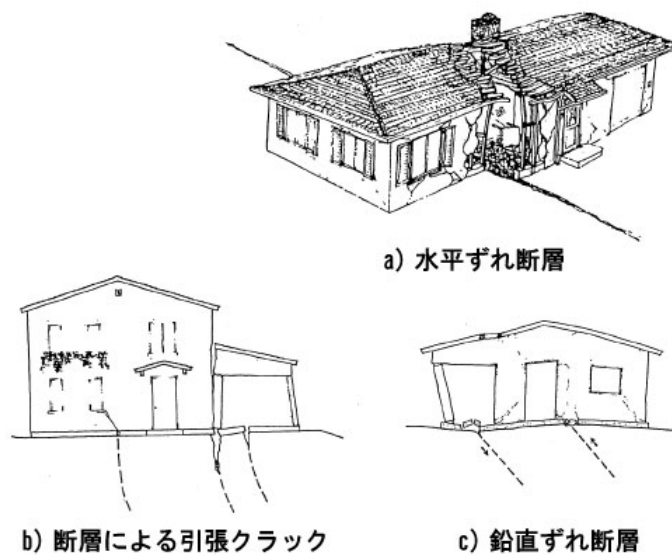


図 1 断層に跨った建造物の破壊⁴⁾

断層法においては、カリフォルニア州政府が認定した活断層を挟む幅約 300mの特別調査地帯に建築許可を申請する場合、事前に地質調査を行い、敷地内に活断層が存在しないことを証明するか、活断層が存在すれば、断層から 15m以上離れた場所に建造物を建設する必要がある。また、特別調査地帯内の不動産を売買する場合には、買い主にこのことを告げる義務がある。この法律を厳密に適用しているカリフォルニア州では、住宅街に幅 30mの空地の帯ができています。

米国の東側にも、サンアンドレアス断層に対峙して大きな断層があることは、あまり知られていない。

1811 年 12 月から 1812 年 1 月にかけて、マグニチュード 8.8 のニューマドリッド大地震が発生している。⁵⁾この地震によって、大規模の地盤隆起と地盤沈下が発生し、地盤沈下した地域には、ミシシッピ川の水が流れ込んでリーフフィット湖が出現したという。この地震を引き起こした断層については、震央近くにあるメンフィス大学の地震研究所において現在でも調査が進められている。

兵庫県南部地震発生後であるが、1999 年 9 月 17 日にトルコ北アナトリア地方でコジャエリ地震(M7.4)、1999 年 9 月 21 日に台湾中部南投県で集集地震(M7.6)が発生している。コジャエリ地震による北アナトリア断層の動きは写真 1、2 に見られるように完全な横ずれ断層で上下ずれ変位は無く周辺に丘陵地帯は無い。従ってこの断層が貫通した二つのガソリンスタンドの間は互いに大きくずれ変位しているが地震後もそのままガソリンスタンドとして機能できた。集集地震による断層の動きは写真 3、4、5 に見られるように完全な逆断層の場合である。運動場に引かれたトラック白線に水平ずれは見られないが大きな上下ずれが発生しており断層に跨る構造物は壊滅的な被害を蒙っている。

わが国においても、過去に数多くの直下型地震を経験しているので、断層近傍に構造物を作る場合の対策としての技術はある程度考えられている。すなわち、断層が確認された場合には、できる限りそれを避けて建設すること。やむを得ず、断層に跨る場合には、その部分の構造を分断するか、静定構造化して接合させることなどである。

ただし、米国のように断層法の類は成立していない。わが国のように人口密度の高い狭い国土の中に多数の断層が存在する所では、米国の断層法よりも、より高度の防災概念と耐震技術にもとづいた対策が必要であろう。



写真 1 北アナトリア断層の動き



写真 2 双子のガソリンスタンドの右ずれ変位量



写真 3 白線の水平ずれはない



写真 4 断層に跨る建物の崩壊



写真 5 逆断層上のRC建造物

3. 兵庫県南部地震での状況

兵庫県南部地震における断層性地盤変形の実態と断層周辺の構造物の被害状況の概要は以下のようである。^{6)～9)}

1) 野島断層

断層ずれ量の大きかった淡路島の野島断層においては、そのずれの量は水平・上下共に 1m 前後の右ずれ断層であり、断層の南端部にある富島地区においては、断層性地盤変形によって構造物(主として木造住宅)に大きな被害を蒙った。また、2 つの送電鉄塔の間を、鉄塔間隔が増大する位置に野島断層が横切る場合には、送電線が引き切れるか、鉄塔が送電線に引張られて折れ曲がるなどしていた。これと同様の事態は明石海峡大橋においても起こっている。図 2 が関係当局による調査結果であるが、この橋は工事途中の吊り橋であったので、径間が同図に示されるように約 1m のびたことによる若干の被害が生じたことにとどまり工事は続行されている。

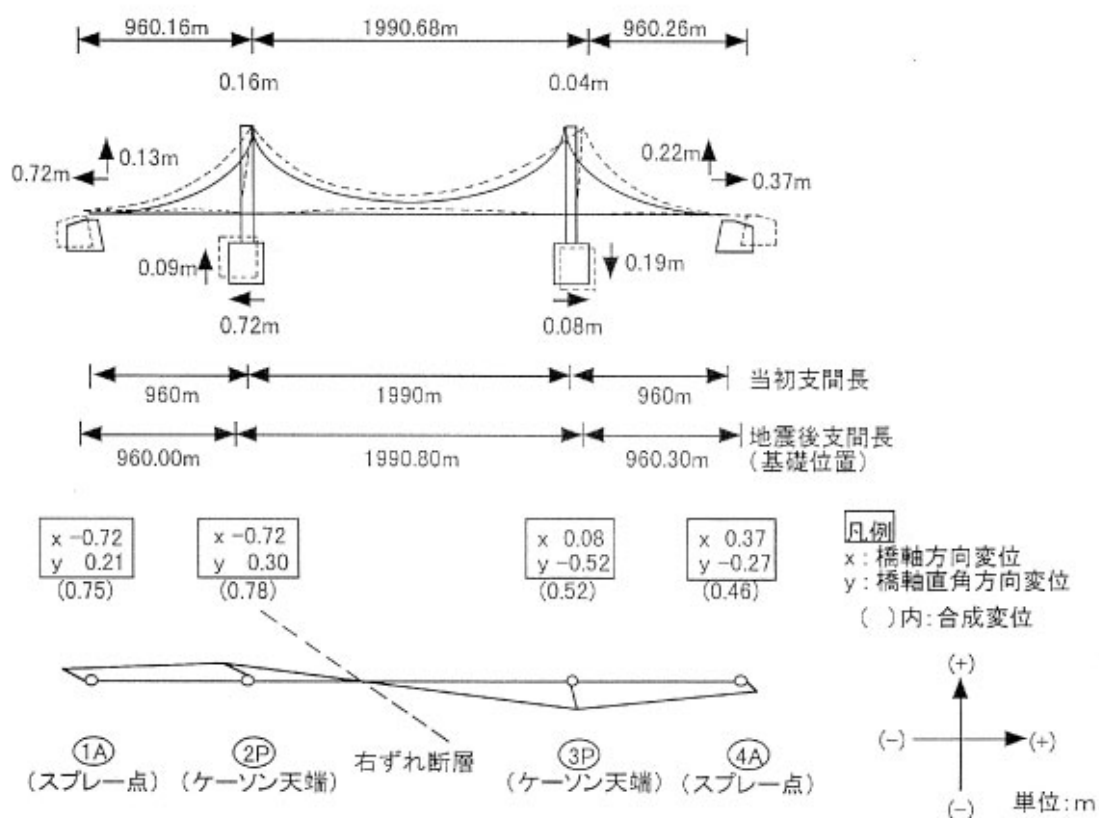


図 2 明石海峡大橋の変位

2) 六甲断層系による地盤変状の分布

須磨から神戸地方に上陸した断層のずれ量は、淡路島におけるほど大きくはなく、水平・上下約 10cm 強にとどまっている場合が多い。図 3 は、地盤の異常な変形、擁壁を含む構造物の破損等地盤変状が報告された地点の分布図と断層分布図を重ね合わせたものであるが断層の分布とほとんど一致しており、断層性地盤変形の分布を表しているものと考えられる。

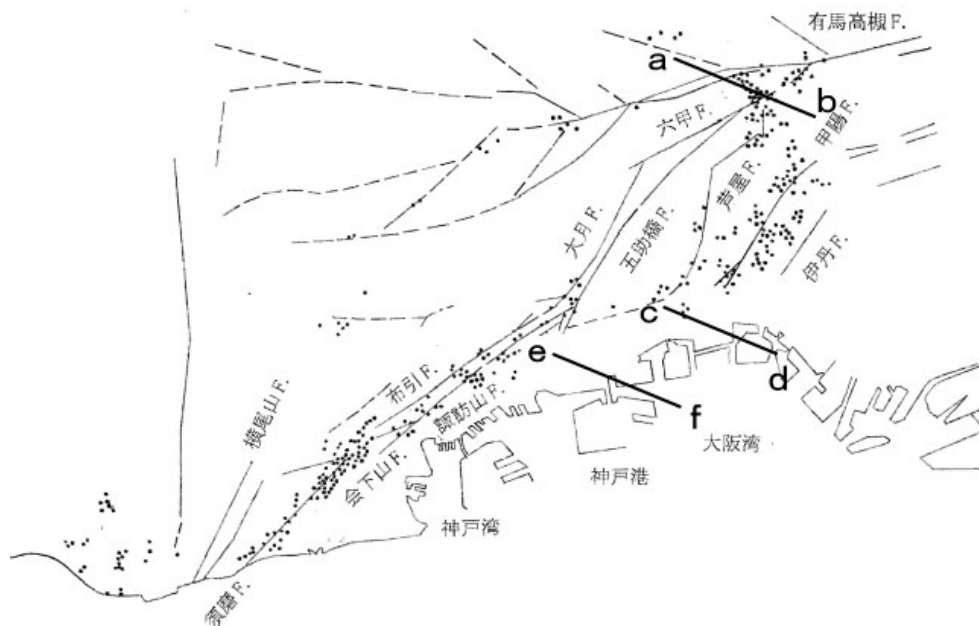


図 3 地盤変状の分布図

3)断層に跨る構造物被害の特徴

図4は、西宮市における筆者らの構造物被害調査結果を模式的に示したものである。同図中Fで示される地域では、埋設管の破損、地盤変状等断層性地盤変形による被害が顕著に認められた。それらの被害状況の特徴として、木造建築物はほとんど倒壊し、鉄筋コンクリート構造体の中、壁量の多いものはほとんど無損傷のものが多い。このように剛強な構造体を貫く位置に断層線がある場合で、かつ、地表層が比較的軟弱な場合には、地表面に表れる断層線はその構造物を避けるように側辺を迂回することが多い。鉄筋コンクリート構造物でも、壁量が少ない純ラーメン構造に近いものは、木造建築と剛強な鉄筋コンクリート構造体の中間的な破損状況にあると見受けられた。

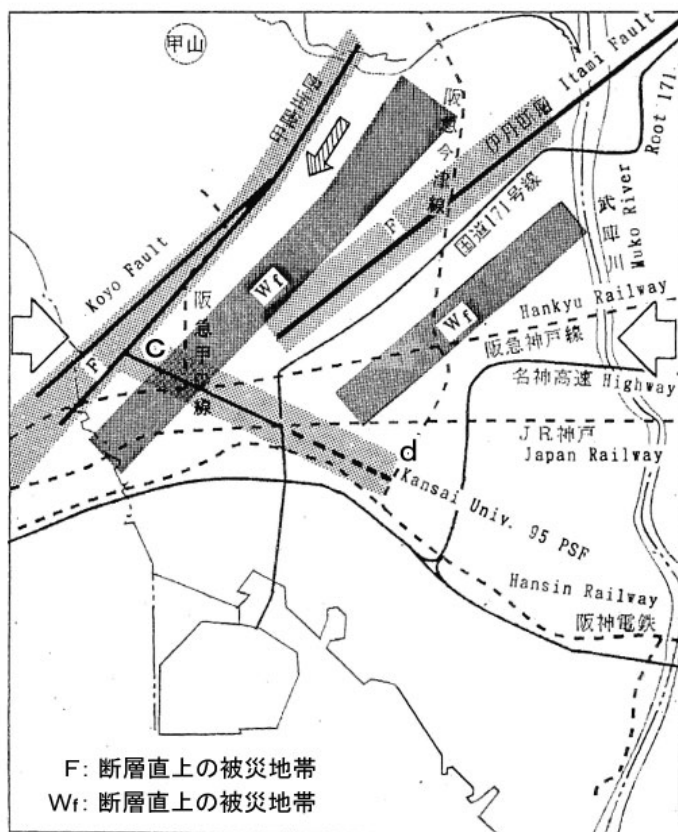


図 4 西宮市域の被災分布模式図

4) 左ずれの共役断層

図4中の下方に北西―南東方向に走る左ずれの共役断層cd(図3中の断層cdと同じ)と推定される位置に帯状の被災帯が確認されている。同図中の W_f で示される帯状の被災地域は、神戸の六甲断層系から約1km離れて、断層に並行して発生した震度7の被災帯と成因が同類のもので、波動現象によるものと推定される。

左ずれの共役断層は他に2箇所筆者等によって確認されている。それらは図3中に示される断層abと断層efである。断層efは図5中にefとして示される。この断層は芦屋断層とJR摂津本山駅の南西で交差する左ずれ共役断層であるが、この断層上に跨る建築物(同図中のA)の被害状況を写真6、7、8に示した。写真6はRC造マンションの全景、写真7は左ずれ共役断層の直上にある階段室エキスパンションの左ずれ変位、写真8は杭基礎頂部と基礎座面の接続部分が左ずれ変位等にずれ動いた跡を示している。

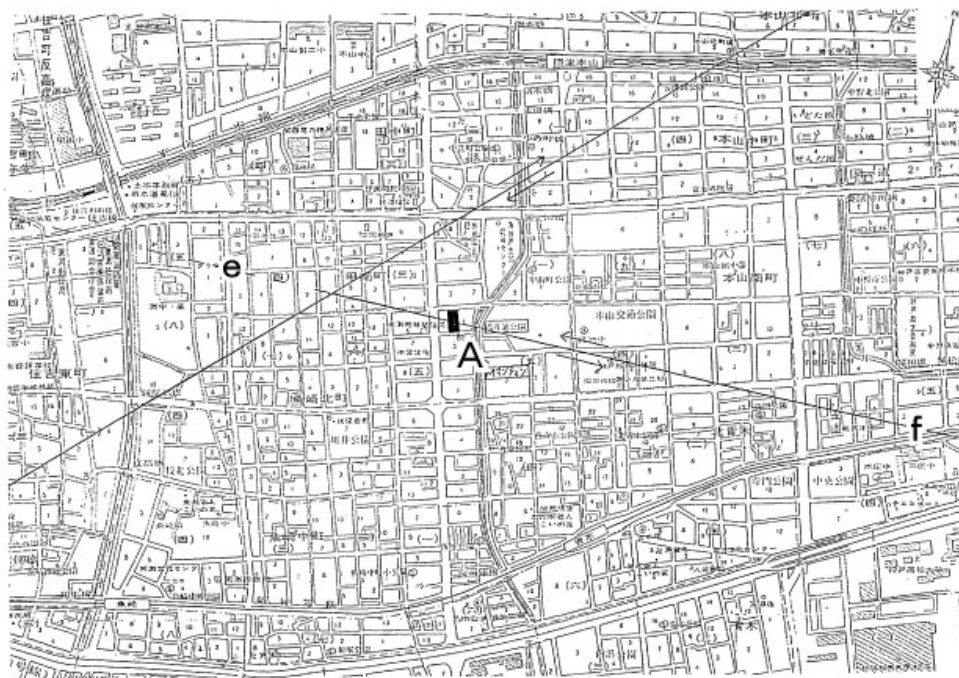


図5 神戸市東灘区市街詳細地図



写真6 マンションの全景



写真7 エキスパンションの左ずれ変位



写真8 杭頭部のずれ変位

5) 地盤ブロックの上下変位と斜面流下

断層性地盤変形として、表層地盤はさらに複雑な挙動を呈することが見出された。図 6 中に、航空写真測量によって兵庫県南部地震前後を比較した地表面の変位分布を示した¹⁰⁾。同図によれば、地盤が鉛直方向に隆起・沈下している現象も見られ、この隆起・沈下した地塊ブロックの大きさは、互いに共役な断層によって区画される地塊ブロックにほぼ同じであると推定される。図 7 a) にこれらの挙動を推定するメカニズムを模式的に示した。地震振動中には、地震波動に加えて、地盤は断層ずれによってせん断変形と回転変位を強制されると同時に、強い上下動を受けるので、表層地盤の緩みと液状化等が発生して、静止時よりも変形しやすい状態にあることが推察できる。したがって、傾斜地盤においては、表層が斜面に沿って流下する変位成分が顕著に表れることになる。

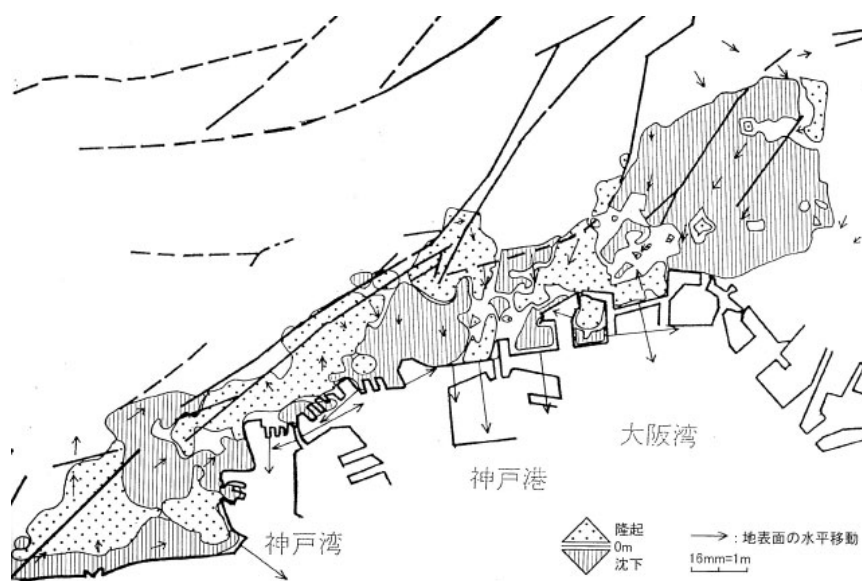


図 6 航空写真測量による地盤変位分布

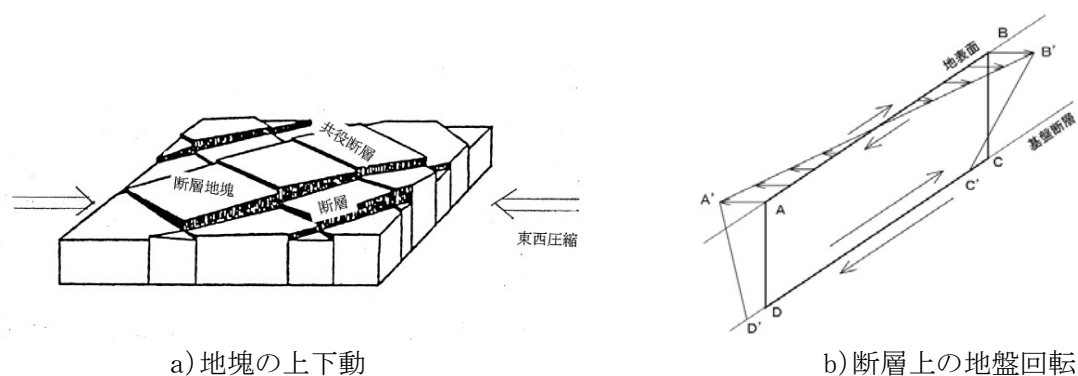


図 7 断層ずれによる近傍地盤の動き

6) 表層地盤の右回転

図 6 によれば、三宮～東灘間の地盤が一体として、図 7 b) の如く右回転しているという指摘がある¹¹⁾。図 6 に示される変位ベクトルはこのような回転による成分と南面する斜面を流下する成分が合成されていることが認められる。

4. リーデルせん断実験²⁾

断層に跨る構造物被害の調査結果或いは断層性地盤変位の調査結果を実験的に検証するために断層模型によってせん断試験を実施した。写真 9 のように 2 枚の厚手の板を横に並べて水平にずり滑らせることで断層に模擬し、その上に可塑性の粘土を数センチの厚みに圧延して表層土と見做す。板をずり滑らせる事によって表層の粘土乃至はその上に設けられた構造物模型がどのように挙動するかを観察した。表層土の強度と厚みの組み合わせによって、地表面において直線状の断層線あるいは雁行状の断層線が観察された。構造物に関しては写真 10 に見られるように構造物が木造のようにせん断強度・剛性共に弱い時には断層線に沿って構造物はせん断破壊される。構造物のせん断強度・剛性共に強い場合には写真 9 のように地表面に現れる断層線は構造物を避けるように基礎の周辺を迂回して構造物は破壊されない。このことは現地調査で観察された事を裏付けている。



写真 9 断層上の剛強な構造物



写真 10 断層上の木造構造物

5. 断層直上での構造物破壊のメカニズム

従来、断層直上に構造物を計画することを余儀なくされた場合には、次のようなことが考えられている。

① 構造物が断層を跨がないように配置する

② どうしても断層を跨ぐことが避けられない場合には、その部分を静定構造化する。

このような断層対策としての構造形式を、本稿では「分離型」と称することとして、図 8 に示した。

前述したように、カリフォルニア州において実施されている断層法は、断層から 15m 以内を空地にしている。したがって、これは分離型の一例である。分離型は主として、構造強度が十分でない建造物に適用されると効果的な構造形式である。

それに対して十分に剛強な構造体の場合には、必ずしも分離型とする必要はない。前述したように現地における調査とリーデルセン断試験結果より明らかなことであるが、剛強な構造体がある程度以上の層厚を持つ堆積層上に建つ場合には、直下に断層があっても断層すべり線は構造体を破壊させることなく、建物の側辺に沿ってその建物を迂回するように現れることがわかった。つまり、堆積層中のせん断面は建物を切断する方向に発生するのではなく、図 9 に示すように剛強な建物を避けるように側辺に向けて断層面が発生するのである。

このように、堆積層上にその地盤強度に見合った剛強な構造体を作っておけば、その構造体は断層が滑った場合にも破壊されずに安全でありうるということである。但し、このような対策が成立するのは横ずれ断層又は上下ずれ変位成分が比較的少ない一般断層の場合である。このような構造形式を本稿では「剛強型」と称することとする。

このような剛強型の例として、写真 1 と写真 2 に示した北アナトリア断層が双子のガソリンスタンドを貫通したときに発生したずれ変位の位置を推定した例を図 10 に示した。同図に示されるように、地表層で断層は地下のガソリンタンクを避けて発生している。地震後二つのガソリンスタンドはそのまま使用できたのであるから、このように推定する他ない。

このように、断層直上部における構造物被害の形態は、断層周辺での地層構造に強く依存していることが明らかである。図 11 に、断層周辺における地層構造断面を分類・整理して示した。詳しくは後述するが、対応策としての大筋は以下になる。

分離型：断層を避けて計画する、または断層を跨ぐ部分は静定構造とする

剛強型：断層上に堆積層が十分ある場合には、地盤のずれ変形に抵抗可能な剛強な構造とする。あるいは、堆積層厚が不十分な場合には、盛土等の緩衝材を用いて、堆積層と同様の機能を持たせる

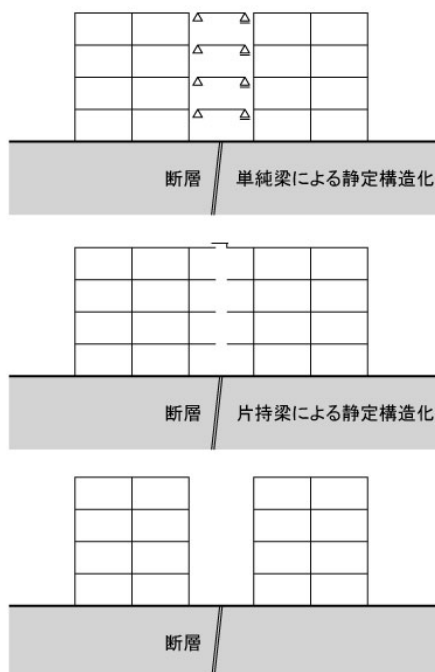


図 8 分離型の例

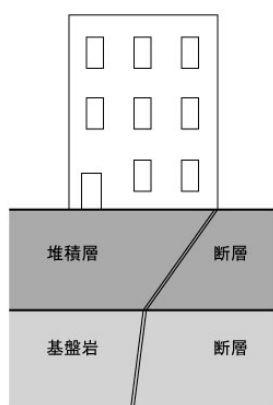


図 9 剛強型の例

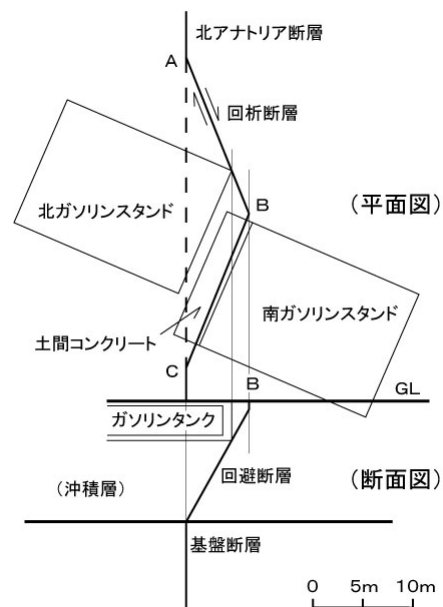


図 10 回避断層の断面想定図

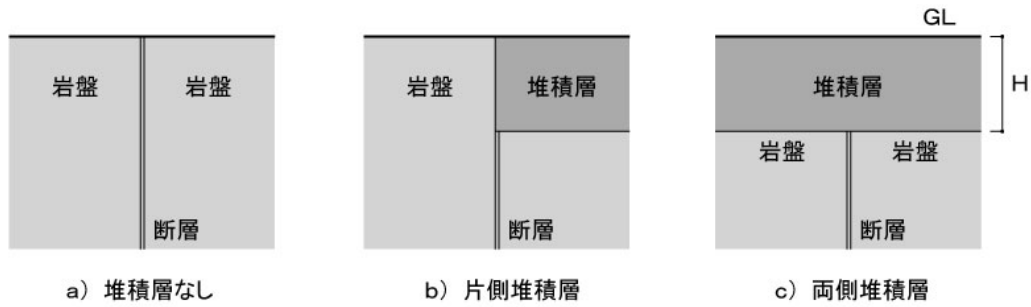


図 11 断層周辺の地層断面の地層断面の分類

6. 断層上での耐震設計手法

分離型構造物については、前述の解説で十分足りると思うので、ここでは剛強型構造物を設計する方法について述べる。

図 12 は断層直上にある堆積層と構造物を概念的に示している。いま断層が滑ったとき、以上述べてきたことに従えば、堆積層と構造物に発生する破壊面として、図 12 に示されるケース①～③が考えられる。

- ケース①:破壊面がADD'A'で発生し、構造物は破壊される
- ケース②:破壊面がACC'A'で発生し、断層面が構造物の側辺に避ける
- ケース③:破壊面がABB'A'とBCC'B'の面で発生し、構造物底面と地盤の間に滑り面が発生する

いま、ケース①の破壊を発生させるのに必要なせん断力を F_1 とし、ケース②の場合を F_2 、ケース③の場合を F_3 とする。このとき、現実には発生する破壊面は F_1 、 F_2 、 F_3 の中で最小値の場合である。

ここで以下のように記号を定義すると、 F_1 、 F_2 、 F_3 は下式(1)、(2)、(3)のようになる。

τ_u : 土のせん断強度 (tf/m²)

標準貫入試験によるN値を粘土質地盤に適用する場合には、次式を参考とする

$$\tau_u = \frac{5}{8} N$$

Q_b : 構造全体を断層方向にせん断する場合の、断層方向単位長さあたりの構造体のせん断強さ (tf/m)

B: 基盤岩の断層の直上にある構造物の位置から側辺までの近い側の距離 (m)

L: 構造物の断層方向の長さ (m)

f: 構造物の基礎底面における地盤との摩擦強度 (tf/m²)

H: 一様な強度を持つとみなすことが出来る堆積層の厚さ (m)

$$F_1 = \tau_u \cdot H \cdot L + Q_b L \quad (1)$$

$$F_2 = \tau_u \cdot L \sqrt{H^2 + B^2} \quad (2)$$

$$F_3 = \tau_u \cdot H \cdot L + f \cdot B \cdot L \quad (3)$$

- ケース①が現実には発生するときの条件: $F_1 < F_2$ かつ $F_1 < F_3$
- ケース②が現実には発生するときの条件: $F_2 < F_1$ かつ $F_2 < F_3$
- ケース③が現実には発生するときの条件: $F_3 < F_1$ かつ $F_3 < F_2$

また、ケース②のように、構造物が断層によって破壊されないためには、 $F_2 < F_1$ より、構造体の断層方向のせん断強度 Q_b が式(4)を満たさなければならない。

$$Q_b > \tau_u \left(L \sqrt{H^2 + B^2} - H \right) \quad (4)$$

ここでは F_3 を考慮していないので、構造物の基礎底面において地盤との間に滑りが生じるか否かのことは問題にしていないが、とりあえず断層のずれ変位によって構造物が大破しないためには、式(4)が成立することが必要である。

式(1)～(4)によれば、地盤の強度 τ_u と構造体の強度 Q_b または基礎底面での摩擦強度 f 、堆積層の厚さ H 、建物の幅 B との相互の大小関係によって、断層直上の構造物が断層性地盤変形によって損傷を受けるか否か判定することができる。

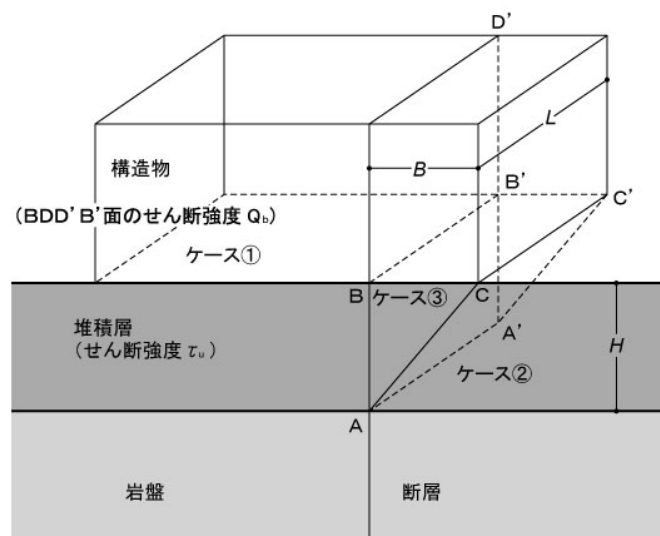


図 12 堆積層中に破壊面(断層)が発生する形態

7. 例題

西宮市域にある伊丹断層周辺の沖積層厚の分布は図 13 のようであるが⁸⁾⁹⁾、この断層上にある木造住宅と鉄筋コンクリート構造体について、断層性地盤変形に対して安全かどうか以下に検討する。

例題 1.鉄筋コンクリート構造体の場合

[与条件]

●地盤： $\tau_u = 20 \text{tf/m}^2$

(N値 30 程度)

●鉄筋コンクリート構造物(5 階建て、壁量は十分である)：

$Q_b = 500 \text{tf/m}$

(スラブのせん断強度より)

$B = 5 \text{m}$

$L = 20 \text{m}$

この場合、式(1)～(3)により、 F_1 、 F_2 、 F_3 を求め、大小関係を調べる。

$$F_1 = 20 \times 10 \times 20 + 500 \times 20 \\ = 14000t$$

$$F_2 = 20 \times 20 \times \sqrt{10^2 + 5^2} \\ = 4472t$$

$$F_3 = 20 \times 10 \times 20 + 4 \times 5 \times 20 \\ = 4400t$$

これらの値に対して、一般地震波動の震度による影響もあわせ考慮すべきことは当然であるが、この場合 F_1 が最大であり他の F_2 、 F_3 よりも十分大きいので、この鉄筋コンクリート構造体は断層地盤変形によって破壊されることはない。また、 F_2 と F_3 の間では大差がないので、ケース②とケース③が混在して発生することが予測される。

例題 2. 木造住宅の場合

[与条件]

●地盤： $\tau_u = 20tf/m^2$
(N値 30 程度)

$$f = 4tf/m^2$$

$$H = 10m$$

●木造住宅(2 階建)：

$$Q_b = 5tf/m$$

(木造梁のせん断強度より)

$$B = 4m$$

$$L = 8m$$

この場合も例題 1 と同様に F_1 、 F_2 、 F_3 を求めることとする。

$$F_1 = 20 \times 10 \times 8 + 5 \times 8 \\ = 1640t$$

$$F_2 = 20 \times 8 \times \sqrt{10^2 + 4^2} \\ = 1723t$$

$$F_3 = 20 \times 10 \times 8 + 4 \times 4 \times 20 \\ = 1728t$$

この場合には F_1 が最小であるので、木造住宅が断層性地盤変形によって破壊されることになる。ただし、 F_1 、 F_2 、 F_3 の間には大差がないので、これらの値だけからは判定が難しいが、地震動もあわせ考えたり、あるいは古い木造住宅の場合には Q_b の値がさらに小さくなることも考えると、総合的に勘案して、断層性地盤変形によって木造住宅の倒壊が多くなることが予測できる。

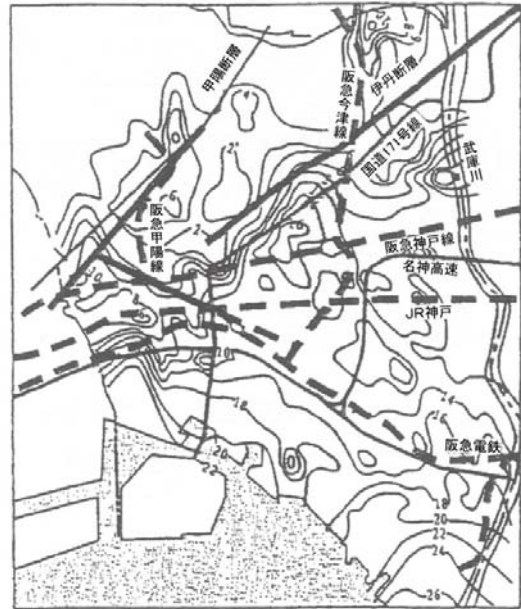


図13 西宮市域における沖積層下限深度分布図

8. おわりに

断層上周辺で構造物を計画することは避けた方がよいことはわかっているが、必ずしもそのことが容易に許されるとは限らない。例えば、鉄道等の交通網は、断層を避けることは不可能である。また、都市においては重要な公共建造物が断層上に存在している場合も少なくない。

断層近傍構造物に対する耐震対策として本稿で述べた事を纏めると以下の様である。

- 断層の分布図を作成すると共に各断層の種類(上下・水平ずれ成分)、ずれ周期、発振予想、周辺地盤構成等断層耐震設計に必要な情報を整備する。
- 断層性地盤変形には種々の形態が考えられる。上下・水平ずれ変形、共役断層として左・右のずれ、地表層の斜面流下・回転等が存在する。
- 断層周辺に構造物を設計する場合の耐震設計手法として分離型と剛強型がある。上下変位成分が比較的小さい断層の場合には剛強型の設計が可能であり、本文中に示したケース①～ケース③の状態を判断して設計する。

【参考文献】

- 1) 田村重四郎:地盤と地震被害, 山海堂、1996
- 2) 小出仁, 山崎晴雄, 加藤碩一:地震と活断層の本, 国際地学協会, 平成7年(1995)
- 3) 日本地形学連合編:兵庫県南部地震と地形被害, 古今書院, 1996
- 4) Peter I. Yanev:Peace of Mind in Earthquake Country, Chronicle Books, Sanfrancisco, 1991
- 5) David Stewart and Ray Knox:The Earthquake America Forgot, Gutenberg-Richter Publications, 1995
- 6) 八尾眞太郎:断層周辺における耐震設計(その1), 建築技術 No.592, 1999.6
- 7) 八尾眞太郎:断層周辺における耐震設計(その2), 建築技術 No.594, 1999.8
- 8) 八尾眞太郎, 西田一彦, 楠見晴重, 西形達明:兵庫県南部地震活断層周辺の構造物被害と今後の対策, 直下型地震防災研究報告書, 関西大学工学技術研究所, 1997.3
- 9) 八尾眞太郎:断層直上における構造物被害の発生メカニズムと対策, 直下型地震防災研究報告書, 関西大学工学技術研究所, 1998.3
- 10) 田中耕平:1995 兵庫県南部地震による地表面変位量図, 科学技術庁, 1996
- 11) 田中耕平:震災で神戸の地表面灘区役所付近軸に回転, 朝日新聞, 1997.1.19