

兵庫県南部地震の液状化地帯における戸建住宅の基礎の被害と修復

—戸建住宅の基礎の修復に対する考え方—

Damage and Restoration of Foundation for Houses in Liquefied Areas

by the Hyogo-ken Nanbu Earthquake

—Concept for Restoration of Foundation for Houses—

藤 井 衛 (ふじい まもる)
東海大学教授 工学部建築学科

伊集院 博 (いじゅういん ひろし)
旭化成工業(株)基礎地盤開発室 主査

田 村 昌 仁 (たむら まさひと)
建設省建築研究所 主任研究員

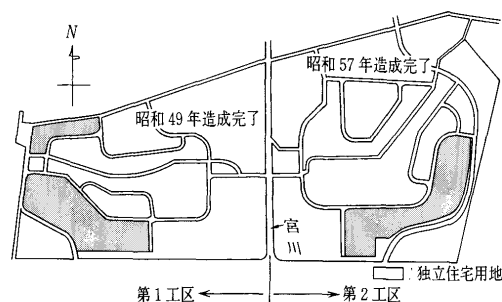
伊 奈 潔 (いな きよし)
中央建鉄(株)中央技術研究所 所長

1. はじめに

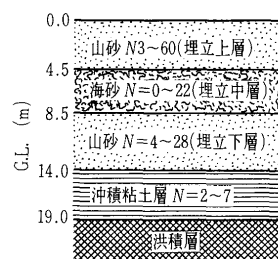
芦屋浜シーサイドタウンは兵庫県が事業主となって昭和44年より造成が開始され、昭和50年3月に完成した総面積125.6 haの規模を有する埋立地である。この地域は兵庫県南部地震により液状化現象が発生し、多くの家屋が障害を受けたことはまだ記憶に新しい。筆者らは、この地域の住宅約100棟に対して被害やその修復工法に関する聞き取り調査を行った。その結果、修復に対する現状の知識・考え方がユーザーには十分正確に伝わっていない印象を受けた。戸建住宅の基礎の障害は自然災害に限らず、掘削工事によってもよく現れる。これまで、地盤変動を受けて障害が発生した基礎の修復工法に関する技術上の蓄積は十分にあるにもかかわらず、今回の震災ではそれが十分に生かされていたかは大いに疑問である。ここでは戸建住宅の工事被害による修復事例をもとに、芦屋浜シーサイドタウンにおける震災の修復事例について考察を行い、戸建住宅の基礎の修復対策工法に対する基本的考え方を示す。

2. 地質構成と被害状況

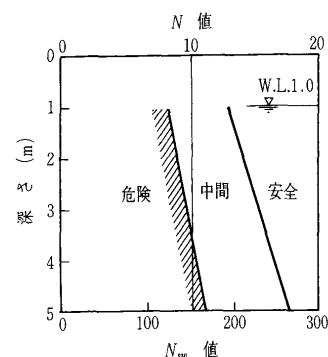
芦屋浜シーサイドタウンは芦屋浜の海浜部にあり、図—1に示すように宮川を境に西側を第1工区(面積約57.4 ha)、東側を第2工区(面積約68.2 ha)として、それぞれ昭和49年7月、昭和57年3月に造成が完了した埋立地である。埋立土砂は淡路産の山砂と岡山産の海



図—1 造成状況



図—2 地質断面概念図



図—3 砂の液状化簡易判定グラフ (小規模構造物用)

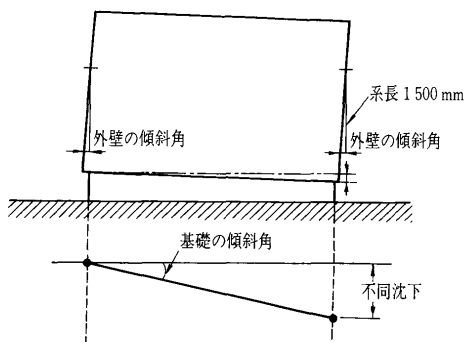
砂である。地質断面概念図を図—2に示す。埋立層は、上層、中層、下層から構成されており、中層を中心に液状化が発生したとみなされている¹⁾。昭和63年に発行された日本建築学会編「小規模建物基礎設計の手引き」に示される図—3の液状化簡易判定グラフを用いると²⁾、深さ5 mの位置においてN値が10以下を示す地盤では液状化の可能性がかなり高いことがわかる。一方、文献³⁾によると、地表面から深さ3 mまでN値が3以上の地層があれば、液状化の可能性は少ないとの結果になる。図—2の地質断面図を見ると、埋立上層はNが3~60までを示しており、液状化の可能性は少ないことになる。このように、現在の判定法によっても、この地盤の液状化の判定は難しく、当時この地盤が液状化の可能性が少ないとみなされていたとしても、それはやむを得なかったものと判断される。被害状況は、芦屋市の「家屋被害判定検討委員会」が建物の傾斜角 ϕ をもとにした表—1に示す被害基準によると、戸建住宅997戸中、半壊が656戸(66%)、全壊が1戸の被害を受けている⁴⁾。

3. 地下の形態

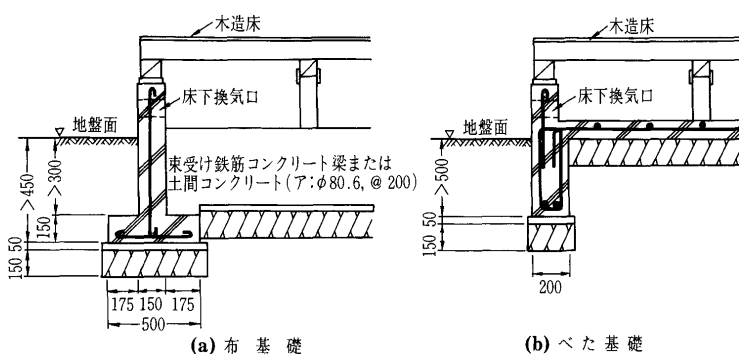
この地域の住宅の沈下の形態を調べるため、鉄骨系の住宅45棟に対し、図—4に示すように基礎と外壁の傾斜角を調べた。なお、この地域の基礎は図—5に示すような有筋の布基礎またはべた基礎である。

表—1 被害基準

	傾斜角 ϕ (rad.)
半 壊	$10/1\,000 < \phi \leq 50/1\,000$
全 壊	$\phi > 50/1\,000$



図—4 測定概念図



図—5 芦屋浜シーサイドタウンの戸建住宅の直接基礎

図—6と図—7は、図—8に示す基礎と外壁の通り方向の違いによる傾斜角の比較を示したものである。いずれも傾斜角はほぼ一致しており、基礎および外壁とも一様に傾斜していることがわかる。また、この傾向は木質系住宅についても同様であったと推察される。すなわち、木質系住宅の基礎仕様は鉄骨系住宅の基礎仕様とほぼ同じであり、かつ間取り調査による被害状況も鉄骨系住宅の場合とほぼ同じであった。このように、比較的剛性の高い有筋の布基礎またはべた基礎を採用すれば、液状化地域では基礎は一様に傾向し、上部構造にそれ程大きな障害を及ぼさないことが分かる。

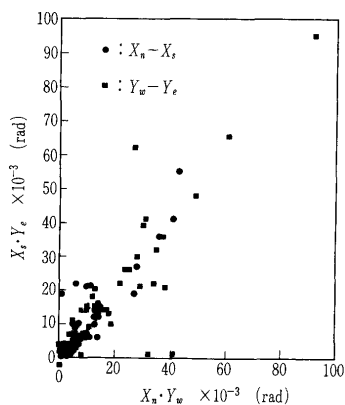
4. 戸建住宅の沈下傾向に対する限界値

一般に、掘削工事などにより、地盤変動が生じた建物に沈下傾斜が発生した場合、修復の基準は次の3点をもとに検討される。

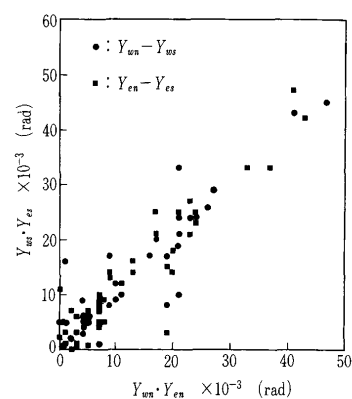
- ① 上部構造に著しい損傷が認められるか？
- ② 建物に機能上または生活上の支障が生じているか？
- ③ 沈下傾斜の発生により建物の価値が低下したか？

③については建物の老朽化の程度や障害に対する個人差の問題があり、その判断はきわめて難しいが、①と②についてはこれまでの研究により限界値を設定することは可能である。

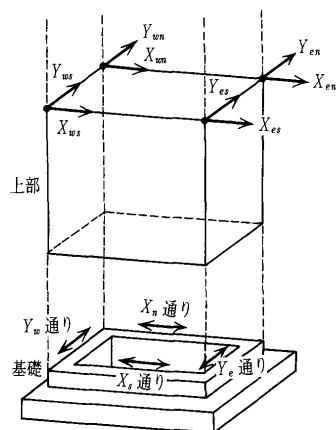
日本建築学会編「建築基礎構造設計指針」によると、沈下傾斜における変形量(変形角)は沈下量と同様にその許容量(限界値)が示されている⁵⁾。ただし、これら



図—6 基礎天端の傾斜状況



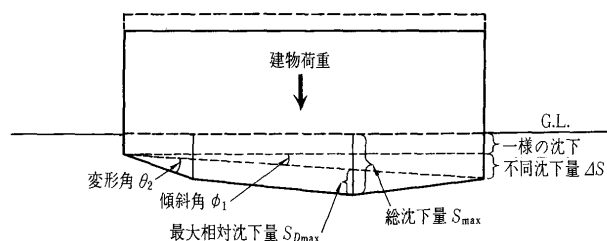
図—7 建物外観の傾斜状況



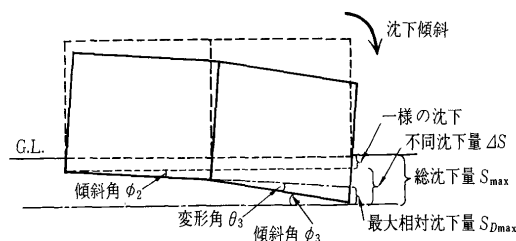
図—8 図—6と図—7の記号の説明

の値は図—9に示すような変形モードによるものである。戸建住宅が地盤変動を受けた時の変形モードは、図—10に示すように基礎に損傷が生じて上部構造が変形する場合と図—11に示すように基礎に損傷がほとんど見られず、建物全体が傾斜する二つのモードに大別される。これらの図より基礎の変形は傾斜角と変形角によって表されることになり、上部構造に有害な障害を及ぼすのは変形角とみなされている。

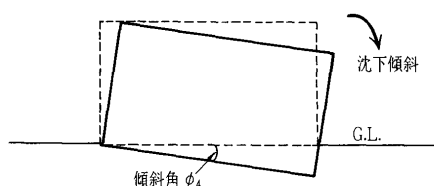
戸建住宅の沈下障害を評価するには、①上部構造の変形角、②基礎の変形角、③居住者の機能上の障害度の3項目を考慮しなければならない。①の上部構造の変形角を調べた実験をもとにすると1/120 rad. (石膏ボード壁体の破壊等)が構造的限界値となっている^{6)~8)}。また、日本建築学会編「小規模建物基礎設計の手引き」によると、木造建築物の障害の発生下限を1/1000 rad. (モルタル外壁の亀裂発生等)とし、3/1000 rad. (束立て床の不陸等)で障害が著しくなり、構造的な変形角を5/1000 rad. (壁と柱の間にすき間等の発生)、15/1000 rad. で倒壊の危険性があるとしている²⁾。以上、これまでの調査結果をまとめると、木造建築物の上部構造の障害度と変形角との関係は表—2のようになる。次に②の木造建築物の基礎の許容沈下量を研究したものと表—3がある⁹⁾。今、軸組の最小間隔を2.7 mと仮定すると、即時沈下における木造建物の布基礎の限界変形角は表—4のようになる。なお、③の機能面から見た場合、変形角より傾斜角の大きさが重要となる。機能



図—9 沈下モードの説明



図—10 基礎の損傷が生じて上部構造が変形した場合



図—11 基礎の損傷がほとんど見られず建物全体が沈下傾斜している場合

面から傾斜角を調べた研究によると、 $5/1\,000 \sim 6/1\,000$ rad. が住民が不同沈下を意識する限界値とみなしている。表—5は、筆者らが掘削工事によって被害を受けた住宅の傾斜角と沈下の有無をまとめたものである。これによると、傾斜角が $8/1\,000$ rad. 以上になるとほとんどの住宅が沈下修復を必要としている。すなわち、 $8/1\,000$ rad. 以上になると居住者が傾斜に対して強い意識を持ち、それが苦情となって現れる。また、この傾斜レベルになると「床に置いたものが転がる」、「建付不良」などの構造的障害も報告される。以上、これまでの文献および筆者らの調査結果をもとに、傾斜角と機能上の障害度をまとめると表—6のようになる。さらに、表—2、表—4と表—6をまとめると、木造建築物の沈下傾斜に対する限界値は表—7のようになる。ただし、この数値は構造上どのような状態であるかは、まだ明確ではない。今後、さらに数値の範囲を細分化し検討する必要があると考えられる。

5. 沈下修復方法と修復事例

地盤変動を受けた戸建住宅の沈下モードについては、図—10と図—11に示したとおりであるが、沈下修復要否の判断については、図—10の変形モードの場合、表—7に示したように上部構造の構造的限界値として変形角 θ_3 が $3 \sim 5/1\,000$ rad. を超えるか、あるいは機能上の限界値として傾斜角 ϕ_3 が $6 \sim 8/1\,000$ rad. を超えるかが目安になると考えられる。図—11の変形モードの場合は、機能性に影響を及ぼす傾斜角(ϕ_4)のみが問題となる。芦屋浜の戸建住宅の場合、変形モードは図—11のパターンがほとんどであり、傾斜角は $100/1\,000$ rad. にまで及

表—2 木造建物の上部構造の障害のレベルと変形角

変形角 (rad.)	障 害 レ ベ ル
$3/1\,000$	損傷の発生
$5/1\,000$	構造的障害の発生限界
$8.3/1\,000$	構造的許容上限値 (変形制限値)
$15/1\,000$	倒壊の危険性

表—3 木造建物の許容沈下量 (単位: cm)

沈下の種別		即時沈下	圧 密 沈 下	
基礎形式		布基礎	布基礎	べた基礎
許 容 沈 下 量	標準値	1.5	2.5	2.5～(5.0)
	最大値	2.5	5.0	5.0～(10.0)

注 1) () 剛性の高いべた基礎の値

注 2) 建物全体の傾斜は標準で $1/1\,000$ 、最大で $2/1\,000 \sim 3/1\,000$ 以下

表—4 木造布基礎の限界変形角 (即時沈下)

	変形角 θ_1 (10^{-3} rad.)
標準値	0.5
最大値	1.0

表—5 傾斜角と沈下修復の有無

傾斜角 $\times 1/1\,000$ rad.	沈下修復必要なし		沈下修復必要		合計 件数
	件数	割合 (%)	件数	割合 (%)	
0~1	362	100	0	0	362
1~2	147	99	2	1	149
2~3	79	98	2	2	81
3~5	59	69	27	31	86
5~8	14	38	23	62	37
8以上	1	5	19	95	20
合 計	662	90	73	10	735

表—6 傾斜角と機能上の障害

傾斜角 (rad.)	居 住 者 の 感 覚
$5/1\,000$	傾斜を感じる。
$6/1\,000$	不同沈下を意識する。
$8/1\,000$	傾斜に対して強い意識、苦情の多発。

ぶものもあった。また、ほとんどの住宅は、 $10/1\,000$ rad. 以上にならないと基礎に亀裂が発生せず、発生したとしてもその亀裂は軽微なものであった¹²⁾。これは、基礎が液状化によりゆっくりと一方向に沈み込んだことと基礎の剛性が高かったことに起因しているものと考えられる。ただし、聞き取り調査によると、居住者は表—8に示すように機能性の面で著しい障害を受けていることがわかった。すなわち、今回の場合は構造障害より機能障害を回復するために修復が必要とされたことがわかる。

通常の建設工事等において障害が発生した建物を修復する方法としては、①部分揚屋、②受梁工法、③鋼管圧入工法、④注入工法などがある。芦屋浜の戸建住宅の沈下修復工法に採用された工法は、①受梁工法、②注入工法、③鋼管圧入工法の3種類である。文献¹⁾に示される

表一 7 木造建物の沈下傾斜に関する限界値

分 類	限界値 (rad.)
上部構造の構造特性から決まる値	変形角 $\theta_3=3\sim5/1\,000$
機能から決まる値	傾斜角 $\phi_3=6\sim8/1\,000$
基礎構造の特性から決まる値 (即時沈下)	変形角 $\theta_3=1/1\,000$

表一 8 芦屋浜の戸建住宅に見られた機能・居住性の障害

傾斜に対する感覚	かなりひどい (14件), めまい, 吐き気, 食欲不振 (8件), 少しあるが慣れた (9件)
建付け不良	ドアの建付け不良 (52件), 無し (19件)
ボール等の転がり	自然に転がる (49件), 無し (11件)
気密性の損失	あり (20件), 無し (33件)

表一 9 修復工事の実施状況

修復工事の実施	あり (54件), 無し (32件)
工法の選定者	修復工事専門業者または住宅会社 (10件), 建主 (13件)
工法の種類	受梁工法 (18件), 薬液注入 (10件), 鋼管圧入工法 (3件)
コスト	500万円未満 (2件), 500万円以上 (27件), 1000万円以上 (7件)
工期	1箇月未満 (21件), 1箇月～2箇月 (13件), 2箇月～3箇月 (7件), 3箇月以上 (2件)

1996年度の修復実績によると, 最も被害が大きい潮見地区では257戸中10戸が建替, 96戸が修復工法を実施しており修復率は約40%, 浜風1と同南地区では226戸中4戸が建替, 53戸が修復工事を実施しており, 修復率は25%となっている。筆者らの聞き取り調査によると, 修復工事の実施状況は表一9のようになっている。修復工法は, 修復工事専門業者, 住宅施工会社, および建主がそれぞれ独自の判断基準に基づいて選定しており, 修復に関する現状の知識・考え方がユーザーに正確に伝達されていたかは疑問である。また, 戸建住宅の沈下修復工事にはあまり用いられていない注入工法がかなりの割合で用いられていた。中には注入によって近隣の地盤に悪影響が出たため, 途中で工法を変更した事例もあったようである。木造の戸建住宅の修復の基本は受梁工法であり, 経済性や構造的観点からみて, 本来はこの工法を中心に検討することが望ましい。鋼管圧入工法は, 地盤の支持力確保と沈下修復を兼ねて用いられることが多い。なお, 鉄骨系の戸建住宅の場合には, 土台と基礎が分離できないケースが多く, 鋼管圧入工法が多く用いられた。いずれも, 事前にスウェーデン式サウンディング試験を実施して地耐力の調査を行う必要がある。今回の場合, 十分な調査がなされず液状化により地盤が緩んだため, 家屋をジャッキアップするのに必要な地耐力が不足していたケースも多かったようである。このような地盤条件下で受梁工法を採用する場合には, 事前に基礎下にコンクリートを打つかあるいはコンクリート版をセットして地耐力の確保を図る必要がある。設計・施工が不適切な工事のみられ, 震災直後の状況より損傷が広がった事例もあったようである。また, コストに関しては, ほとん

どの住宅が500万～1000万の高額の費用をかけているにもかかわらず, 修復後の再沈下に対してどのような保証がなされていたかは必ずしも明確ではなかったようである。すなわち, 補修工事における施工管理の充実と工事後の再沈下に対する保証が今後必要になってくるであろう。これらの二つがあって初めて, ユーザーとしては安心して修復工事を依頼できることになる。このことは, 今回の修復工事に限らず, 住宅の建設工事全体の問題として, これからの課題となろう。

6. ま と め

芦屋浜の液状化地帯では基礎の剛性が高かったために上部構造の障害はそれほど大きなものではなかった。しかし, 比較的修復しやすい状況にありながらも修復工事に関して, 現状の知識・考え方がユーザーに正確に伝わったかは疑問であり, 中には施工不良や工法選定ミスのため障害が発生した住宅もあった。

本来, 液状化の可能性のある地盤に戸建住宅を建てる場合, 地盤改良を実施して地盤を堅固なものにするかあるいは逆にあらかじめ修復しやすいような基礎形式を選択してその都度ジャッキアップにより傾きを修正する方法も有効であると考えられる。今後は, ユーザーが独自に沈下の状況を把握できる性能表示型の住宅の開発が望まれるし, また基礎の性能に関する保証制度も考えてゆくべきであろう。

謝辞: 今回, 芦屋浜シーサイドタウンの多くの方々にアンケートのご協力をいただき, ここに心から厚く感謝する次第です。

参 考 文 献

- 1) 長田吉勝: 芦屋浜シーサイドタウンの液状化問題, 第17回日本環境会議神戸大会資料集, pp. 74～79, 1997.
- 2) 日本建築学会編: 小規模建築物基礎設計の手引き, 1988.
- 3) 国土庁防災局震災対策課ほか: 小規模建築物のための液状化マップと対策工法, 1994.
- 4) 朝日新聞: 1995年9月21日.
- 5) 日本建築学会編: 建築基礎構造設計指針, 1988.
- 6) 山崎 裕・川島謙一: 実物プレハブ住宅の動荷重実験(3), 建材試験情報, Vol. 8, pp. 9～27, 1972.
- 7) 川島謙一・斉藤元司: 木造平屋建住宅の水平加力実験(その2 地盤荷重に対する安全性の検討), 建材試験情報, Vol. 2, pp. 6～11, 1979.
- 8) 定方 啓・鈴木俊郎・朝山和佳: 2階建て実大木造建築物の正負繰返し載荷実験(その11. 実験結果およびその考察), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 5～6, 1988.
- 9) 芳賀保夫: 木造建築物の不同沈下と障害, 土と基礎, Vol. 41, No. 11, pp. 59～64, 1993.
- 10) 田村昌仁: 軟弱地盤における住宅の不同沈下, 日本建築学会構造系論文報告集, Vol. 420, pp. 53～61, 1991.
- 11) 藤村成夫ほか3名: 泥炭地盤における家屋の被害状況調査例について, 北海道立寒地建築研究所, 昭和60年度調査研究報告集, pp. 45～51, 1985.
- 12) 伊集院博ほか: 兵庫県南部地震における液状化地域の低層住宅の被害実態調査(その2: 被害状況と復旧対策), 第33回地盤工学研究発表会, 1998.

(原稿受理 1998.2.26)