資料 1-5

道路及び建築物（戸建て住宅など四号建築物）の液状化対策の検討を行うための基本的な考え方

1. 道路の要求性能の現状

1.1　想定する地震荷重

まず、道路の機能を大きく２つに大別し、それぞれを次のような名称として定義する。

・交通路機能：通常の車両等、人の交通路（歩道、生活道路含む）としての機能

・ライフライン機能：上下水道、電気・ガス・通信等の管路（共同溝含む）の埋設場所としての機能。

「地盤の液状化対策」という観点からは、いずれの機能に関しても明確に“道路としての”要求性能は規定されていないというのが現状である。例えば交通路機能については、被災時でも応急の復旧措置を施すことで最低限の機能確保に努めること、ライフライン機能については液状化発生（の可能性）を前提として、管路等の維持保全に悪影響を与えないよう予め設計時に配慮する、等の対策が主となっている。

そこで、便宜的ではあるが、それぞれの機能について宅地地盤と同様に長期（常時荷重）及び、短期（中地震動時/L1）、終局（大地震動時/L2）の各状態において、「道路に対する要求性能」を想定したものが次表（表 1）である。

表 1　道路に対する要求性能（想定）

<table>
<tr><th colspan="2">道路機能</th><th>長期
（常時荷重）</th><th>短期
（中地震動時／L1）</th><th>終局
（大地震動時／L2）</th></tr>
<tr><td colspan="2">交通路機能</td><td>交通に支障がない状態であること</td><td>ほぼ常時と同じ機能が維持された状態であること
※応急措置の実施は可</td><td>緊急車両の通行や避難経路が確保できる状態であること
※応急措置の実施は可</td></tr>
<tr><td rowspan="4">ライフライン機能</td><td>①上水道</td><td>管路及び設備（消火栓等含む）に支障が生じない状態が維持されること</td><td rowspan="4">ほぼ常時と同じ機能が維持された状態であること
※応急措置の実施は可</td><td rowspan="4">完全な機能喪失がなく、比較的早期の機能回復が可能な状態を確保できること</td></tr>
<tr><td>②下水道</td><td>管路及び設備（マンホール・桝等含む）に支障が生じない状態が維持されること</td></tr>
<tr><td>③ガス・電気・電話等の他企業埋設物</td><td>各管路・配線網に支障が生じない状態が維持されること</td></tr>
<tr><td>④共同溝・その他</td><td>各構造体・機能に支障が生じない状態が維持されること</td></tr>
</table>

※ライフライン機能の要求性能については「下水道施設の耐震対策指針と解説」等を参考とした。

1.2　道路に対する評価項目と限界値について

長期に関しては、液状化対策が施されない場合でも、交通路機能、ライフライン機能ともに問題が生じることはないと考えられる。交通路機能については、3.11 東日本大震災での浦安市における被災事例を勘案すれば、無対策でも表 2 の短期の要求性能を満たす可能性が高いものの、終局に対しては緊急車両等の通行に支障が生じるような段差の発生等は懸念される（特に橋梁との接続部等）。

一方、ライフライン機能に対しては、3.11 東日本大震災での浦安市における被災報告では比較的土被りの小さな位置に敷設されている水道、ガス・電気・電話等他企業埋設物については被害が少なかったことや、前述のとおり個別設計時に液状化対策がなされていること等を勘案すれば、無対策でも短期の要求性能を満たすことについて大きな問題はない可能性があるものの、下水道については管路接続部の損傷による土砂の流入やマンホール（以下、MH と略す。）躯体の浮き上がり、ずれなどの被害が比較的多数報告されているため、道路側として対策が無い状態では、表 2 の短期の要求性能はもとより、下水道側の要求性能（L1 地震動に対する設計流下能力の確保、L2 地震動に対する流下能力の確保等）を満足することは非常に困難であることが予想される。

以上に鑑みて、道路側から考えた場合、路面段差発生の抑制やライフライン機能の確保という観点から、短期に対しては長期とほぼ程度の機能維持、終局に対しては比較的早期の復旧可能な範囲での機能確保が目標性能となりうる。したがって、具体的な評価項目としては、

①液状化に対する抵抗率（FL 値）や地盤液状化指数（P_L 値）

②液状化に伴う予測地盤変形量の略算値（Dcy）

などが考えられる。

なお、液状化に伴う予測地盤変形量の略算値（Dcy）を指標とする場合、短期に対しても、終局に対しても、具体的な値を設定することは甚だ困難であるが、東日本太平洋沖地震発生時の浦安市における被害のうち、沈下量が 5～10cm 程度の地区において比較的被害が少なかったこと等を参考に、何らかの限界値を設定することは可能である。ただし、前述の下水道に関する流下能力確保の観点から、

a) 管のずれ等が多数生じない程度であること（流路の確保）

b) 流域全体がほぼ均等に沈下すること（流路全体の相対的勾配維持）

c) 宅地との接続部に関して、道路側と宅地側の沈下量がほぼ同程度であり（流下機能維持）、かつ宅地側の沈下量が道路側よりも大きくないこと（逆勾配発生の抑制）

などを考慮する必要がある。

1.3　道路－宅地一体化による液状化対策の有効性

道路側に求められる液状化に関する要求性能と評価項目については以上の通りであるが、宅地との関係においては、道路側だけが対策すれば済むという話ではない。

東日本太平洋沖地震発生時の浦安市における液状化被害事例において、土砂の流入による下水道機能の不全を例として挙げたが、これは道路占用部の枝線部分のみに生じたものではなく、次図（図 1）の☆の各接続位置にて多く発生していた可能性が高い。

宅地（民地）			境界上を横断	道路		
宅地 →	宅内配管 →	宅内汚水桝 →	取付管	→ 公共汚水桝 →	取付管 →	MH
	☆	☆	☆	☆	☆	☆

注）☆の箇所で管のはずれ等が生じ、土砂流入が起きる可能性が高い。

図 1　下水道系統への土砂流入発生位置（推定）

したがって、（少なくとも下水道機能に限って言えば）道路側のみに液状化対策を行うだけでは“機能停止を防止する”という観点から十分な対策とは言えず、宅地側も含めた一体的な対策が必要であることの理由の一つとなりうる。

2. 宅地地盤及び基礎の要求性能の設定

建築物の基礎構造に関する要求性能は、政令３８条に示されている（別添資料 1-1 参照）。しかし、要求性能を満足させるための具体的な検証方法については、戸建て住宅のような四号建築物とそれ以外の一般的な建築物とで、実務上の取り扱いに差異が存在している。これらの相違の中には、地盤調査の方法や地盤の許容応力度、杭を使用する場合の杭の支持力の算定方法などの技術基準の適用・非適用の差異も存在する。建築物に対する上位の要求性能は、建築物の規模などによって変わらないと考えて良く、概略、作用する荷重の種類に対応して表 2 のような要求（最低基準）がある。

地盤の液状化現象によって被害を受けた戸建て住宅の基礎を対象とした性能マトリックスを考えると、3.11 東日本大震災や過去の地震における被害から、現状、表 2 に示すような状況にあり、短期（中地震動）の性能をやや満足しない場合がほとんどである。四号建築物を除く一般の建築物に対しては、適用を受ける基準の差異もあってこのレベルにおける要求性能は、十分に満足された状況にあると考えて良い。従って、四号建築物に対するこれからの対応を考えるには、先ず、一般的に建築基準法で要求されている建築物への要求性能に対する方法に沿った対応が一義的に参考にされるべきであると考えられる。

建築基準法における構造関係の検証方法には、仕様規定、許容応力度計算、限界耐力計算、時刻歴応答計算などの方法が採用されているが、基礎構造の設計では、一般的には許容応力度計算によっている。基礎構造の検証では、直接基礎とする場合には、地盤の許容応力度や改良地盤の許容応力度（改良体の許容応力度は別途）、杭基礎とする場合には、杭の許容支持力（杭体の許容応力度は別途）の検証が行われる。

表 2　地盤の液状化を経験した宅地における基礎の要求性能の満足状況
（地盤や基礎への対策が無いか不十分な場合）

荷重の種類	長期（常時荷重）	短期（中地震動時/L1）	終局（大地震動時/L2）
要求性能の内容	生活に支障が生じない	軽微な損傷以内	倒壊の防止や人命の確保 大きい沈下、傾斜が生じるが、家屋の倒壊、人命の損傷無し
地盤の支持力など満足の状況	通常は問題は無い	沈下や不同沈下などが生じることがある	

2.1　想定する地震時荷重

いろいろな液状化対策の比較を行うには、目標とする要求性能を明確にしておく必要がある。必要な要求性能を定めるには、対象とする地震動の大きさとこの荷重に対する応答値として何を対象とするかを決めておく必要がある。液状化現象のこれまでの議論をふまえ、地震動の大きさとして、後述するように、大地震動（L2）、中地震動（L1）について、適切に設定する（別添資料 1-2）。道路と宅地の一体的な対策を講じることを考えると、道路側での要求性能と住宅側での要求性能の整合性が取れていることが大切であるが、住宅側での対策には、かなりの幅が生じうることが予想されるので、先ずは、道路側で基準とする荷重が決められていることが望ましい。

国からの復興財源（税金投入）を前提として、道路と宅地の一体的な対策を考える場合に、L2 地震動での人命の損失の可能性が極めて低い現象では、想定する地震動としては適切性に欠ける恐れが高いこと、また、建築物の基礎構造に対する現状の設計方法（L1 での対応を規定）を勘案すれば、液状化現象への対応を考慮する基本的な外力としては L1 相当の地震動を一義的に選定する。

2.2　宅地地盤及び基礎に要求する評価項目と限界値

建築基準法では、建築物の基礎に対しては、想定される地盤の沈下や変形に対して建築物が安全であるように基礎を設計することを要求している。従って、基礎構造を杭基礎とするなどの方法を考えると、宅地地盤自身への要求性能は、本来は必要が無く、一般的な建築物では、そのような対応が取られている。しかし、直接基礎を採用することが多い四号建築物などでは、長期荷重にのみによって仕様が決められているので、液状化現象に対する無対策地盤での直接基礎のリスクが看過されてきた現実がある。今回の道路と宅地との一体的対策を前提とした場合には、道路対策として実施される格子状改良壁の止水性や剛性を有効に利用した地盤対策との併用対策を講じることにより、住宅の基礎を無対策あるいは軽微な地盤対策などとの併用で、短期荷重時の要求性能を満足出来る可能性が考えられる。この場合、住宅の基礎地盤としての要求性能は、通常使用される地盤の短期の許容応力度（地盤工学では、地盤支持力）等を基本として各種の液状化対策の比較検討を行うが、既に液状化発生に対する抵抗率(FL値)などを利用した評価方法が確立しており、実

績のある工法においては、これらの方法による判断や施主等の要求で、L2 地震動での要求性能（例えば沈下量等）を設定することを妨げるものではない。

2.3 対策工法の基本的な考え方

液状化対策を講じる工法に関して、満足すべき要求性能としては、住宅の基礎の種類に対応した短期の地盤の許容応力度や杭などの許容支持力とすることを基本的に検討する。短期の許容応力度は、そのときの過剰間隙水圧が上昇した地盤条件によって求まる終局強度（極限支持力など）に対して一般的にはある程度の余裕を維持していなければならない（例えば、Fs=1.5 など）。この余裕が、L2 地震動に対するある程度の備えとなるが、定量的な要求を定めていないことになる。他方、地盤の液状化時における住宅の沈下量や傾斜をベースとした対策の考察は、目標性能が明確となる反面、計算の予測値やそれらから決められるであろう対策効果の閾値を保証することは、現状の設計の煩雑さや設計精度では、極めて困難であることに留意する必要がある。

2.4　液状化を起こす可能性のある地盤の許容応力度

液状化の発生に伴う過剰間隙水圧等を考慮した地盤の許容応力度を算定することは一般の設計では行われていないが、各工法による住宅への液状化対策効果を評価する上で、必要に応じて住宅の基礎に使用される基礎構造の種類に対応して、検討の際に行われる解析等で求められる地震時に生じる最終の過剰間隙水圧を考慮する（別添資料 1-3 参照）。液状化に伴って生じる過剰間隙水圧の種類として、下記を考慮する。

但し、既に液状化発生に対する抵抗率(FL値)などを使用して液状化の発生の有無が判断されている場合には、これらの判断によっても良い。

2.4. 1　液状化層の過剰間隙水圧

①液状化する地盤の過剰間隙水圧を有限要素法等の解析ツールを使用して評価する。

②FL値が 1.0 以下の層については、その層の平均有効応力相当分を過剰間隙水圧とする。

2.4.2　液状化層の上部に位置する砂層への過剰間隙水圧の伝搬

①　浸透流解析による液状化後の過剰間隙水圧の算定

②　簡易法による過剰間隙水圧の算定

液状化層からの透水力による過剰間隙水圧を考慮する。液状化層からの透水力は、浸透当初は、透水距離が短く、透水の進行に伴って次第に長くなる非定常な状態で浸透するので、最終の定常状態での浸透圧を考慮する。地表面まで浸透流が達しない場合には、上昇した地下水面の静水圧を採用する。地表面まで、浸透が上昇するか否かは、液状化層の体積圧縮量と表層部の不飽和の程度で決まるが、ある程度安全側に飽和度を設定する。

3.モデル地盤と解析区域の範囲設定　(案)

3.1.　解析用モデル地盤の設定

浦安市における液状化対策の実現可能性調査および検討にあたっては、解析用のモデル地盤を設定する必要がある。東日本大震災で液状化の被害を受けた地区の土質構成と H23 委員会資料から、浦安市の土質構成を近似した「解析用モデル地盤」を提案することによって、浦安市の代表的な地盤の液状化対策の実現性検討調査を行うことを想定している。解析用モデル地盤で設定するパラメータは、「土質構成」、「各層の層厚」、「各層の N 値もしくはせん断波速度」、「解析用モデル地盤の各層の物性値」の 4 つである。以下にそれぞれの設定方法について示す。

土質構成

解析用モデル地盤の土質構成は、地表面から B(埋土層)、Fs(浚渫土層)、As(沖積砂層)、Ac1(沖積粘性土層)、Ac2(沖積粘性土層)、Ds(洪積砂層：入力基盤層 Vs=330m/s 相当)の順で堆積していると想定した。このうち、Fs 層は、3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震で液状化したと思われるため、この層を液状化層として設定した。

各層の層厚

平成 23 年度に実施されたボーリング調査 23 本のうち、液状化の被害が報告されている地区で調査されたボーリングデータ 3 本(無作為抽出)から、各層の層厚の平均値を求めた。ただし、昨年度の調査のうち、Ac2 層以深まで調査された地点は、1 地点にのみであった。そのため、Ac2 層以深は、その 1 地点のボーリングデータを参照した。

各層の N 値

液状化の被害が報告されている地点のボーリングデータ 3 本(無作為抽出)から、各層の平均 N 値を求めた。ただし、昨年度の調査のうち、Ac2 層以深まで調査された地点は、1 地点にのみであった。そのため、Ac2 層以深は、その 1 地点のボーリングデータを参照した。

解析用モデル地盤の各層の物性値

解析用モデル地盤の各層の物性値は、平成 23 年に実施された各地点のボーリングと解析用モデル地盤で設定された土質､N 値および深度が概ね同等である地点でサンプリングされた室内試験結果を参照した。各層で参照したとした室内試験結果を表 3 に示す。

表 3　各層で参照する室内試験結果

		Fs層	As1層	Ac1層	Ac2層
試料番号（深さ）		(3.00-3.90m)	(8.20-9.60m)	14T-22 (22.00-22.85m)	(42.00-42.93m)
一般	湿潤密度 ρ_t g/cm³	1.672	1.801	1.485	1.452
	乾燥密度 ρ_d g/cm³	1.184	1.368	0.793	0.724
	土粒子の密度 ρ_s g/cm³	2.778	2.760	2.651	2.589
	自然含水比 w_n %	42.5	32.0	87.3	100.5
	間隙比 e	1.385	1.027	2.343	2.575
	飽和度 S_r %	85.2	86.0	98.8	101.1
粒度	石分（75mm以上）%				
	礫分[1]（2～75mm）%	0.0	0.9	3.9	0.0
	砂分[1]（0.075～2mm）%	94.6	77.2	2.5	6.4
	シルト分[1]（0.005～0.075mm）%	5.4	15.8	45.3	43.8
	粘土分[1]（0.005mm未満）%		6.1	48.3	49.8
	最大粒径 mm	2.000	4.750		
	均等係数 U_c	1.9	10.4	-	-
	50%粒径 D_{50}mm	0.1611	0.1824	0.0055	0.0051
	10%粒径 D_{10}mm	0.0962	0.0214		
コンシステンシー特性	液性限界 w_L %	NP	NP	94.7	100.1
	塑性限界 w_p %	NP	NP	43.5	59.5
	塑性指数 I_p	NP	NP	51.2	40.6
分類	地盤材料の分類名	細粒分まじり砂	細粒分質砂	シルト（低液性限界）	砂まじりシルト（低液性限界）
	分類記号	(S-F)	(SF)	(ML)	(ML-S)
圧密	試験方法				
	圧縮指数 C_c				
	圧密降伏応力 p_c kN/m²				
一軸圧縮	一軸圧縮強さ q_u kN/m²				
せん断	試験条件				
	全応力 c kN/m²				
	全応力 φ °				
	有効応力 c' kN/m²				
	有効応力 φ' °				
	変形特性 G0(MN/m2)	7.44	51.81	16.9	34.94
	γr(%)	0.1302	0.644	0.2311	0.5298
	H0(%)	15.5	21.6	15.3	9.1
	液状化強度 RL(DA5%)	0.288	0.375		
	RL(Nu95)	0.294	0.392		

解析用モデル地盤

以上の方法で設定した解析用モデル地盤の層厚、N 値は以下のとおりである。

B 層：層厚 2m、N 値 6

Fs 層：層厚 7m、N 値 5

As1 層：層厚 2m、N 値 14

Ac1 層：層厚 20m、N 値 2

Ac2 層：層厚 14m、N 値 14

Ds 層：層厚 5m、N 値 74

図 2 に、深度毎の N 値および土質を示す。図 2 には、建築基礎構造設計指針に示される簡易液状化判定方法を用いて液状化判定を実施した結果も合わせて示す。液状化判定に用いた外力は、東北地方太平洋沖地震を想定し、M=9.0、αmax=150gal、200gal、250gal の 3 種類とした。

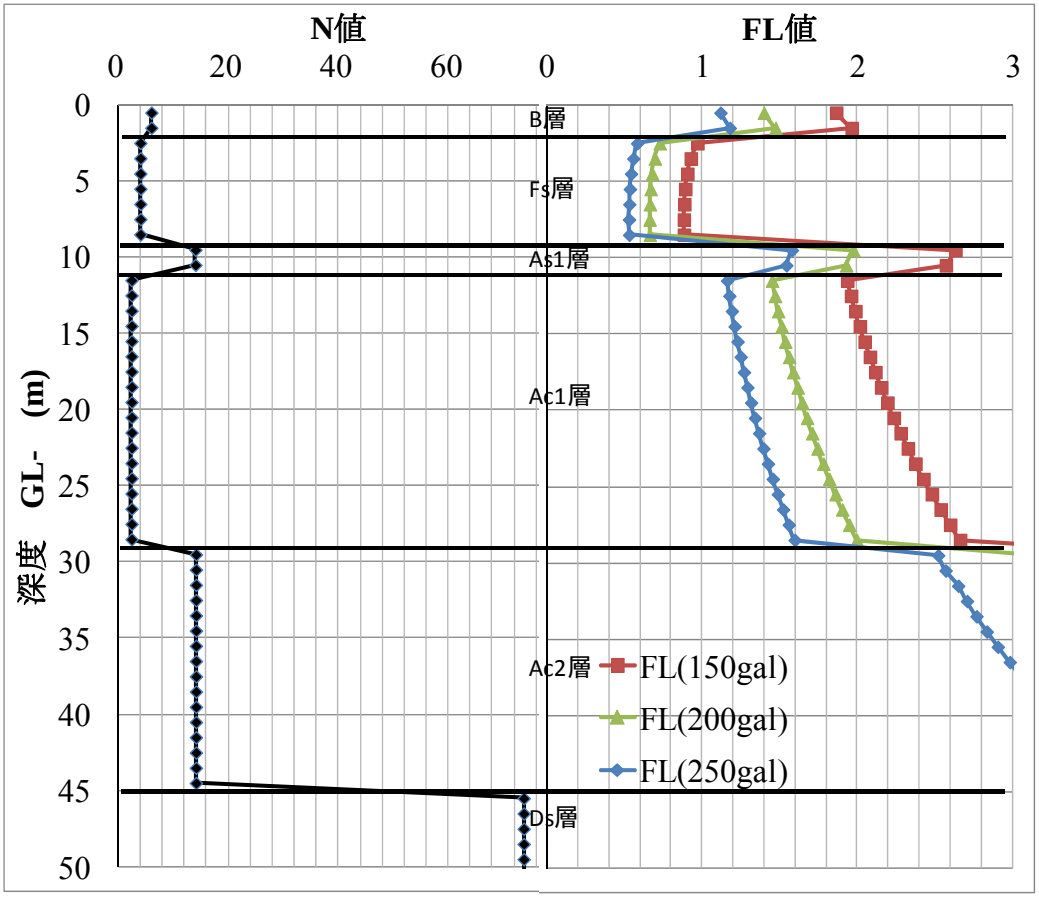


図 2　モデル地盤の深度毎の土質および N 値

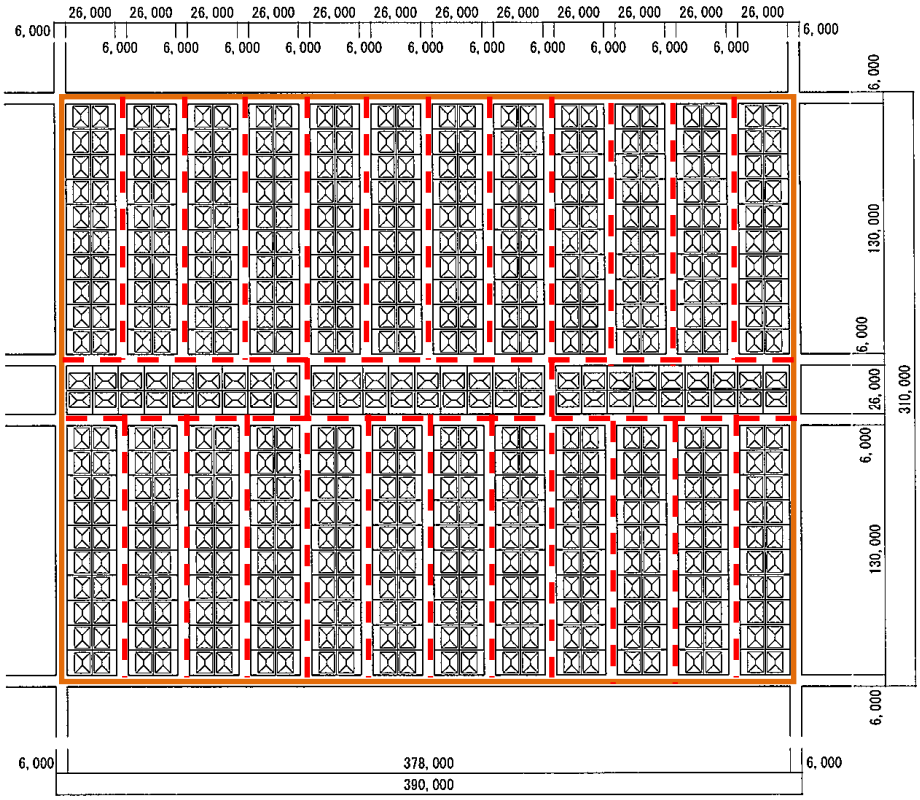
なお、地下水位低下工法においては、沖積粘土層(Ac1 層)の層厚により、圧密沈下量が異なることや、地震時の応答が異なることが想定されるため、沖積粘土層(Ac1)の層厚を変更

したモデル地盤を別途用意し検討することを想定している。

3.2　解析区域の範囲設定

道路-宅地一体の液状化対策工法の効果を確認するための解析区域の範囲は、道路および戸建住宅の被害が多く報告された地区の都市計画街区を参考に設定することとした。

これらの地区では、住宅が 2×10 棟の配置となる街区(以下、1 街区)が数街区単位で組み合わされている。被害が多く報告された地区と同規模でモデル化した解析区域の範囲を図 3 に示す。



地下水位低下工法：実現可能性の調査(浸透流解析)およびコスト算定時に使用

格子状改良工法：コスト算定時に使用

図 3　解析区域のモデル図(橙線枠内：解析区域、赤点線：格子状改良のイメージ)

本業務において液状化対策実現可能性調査対象としている工法は、地下水位低下工法、格子状改良工法、および個別対策工法である。

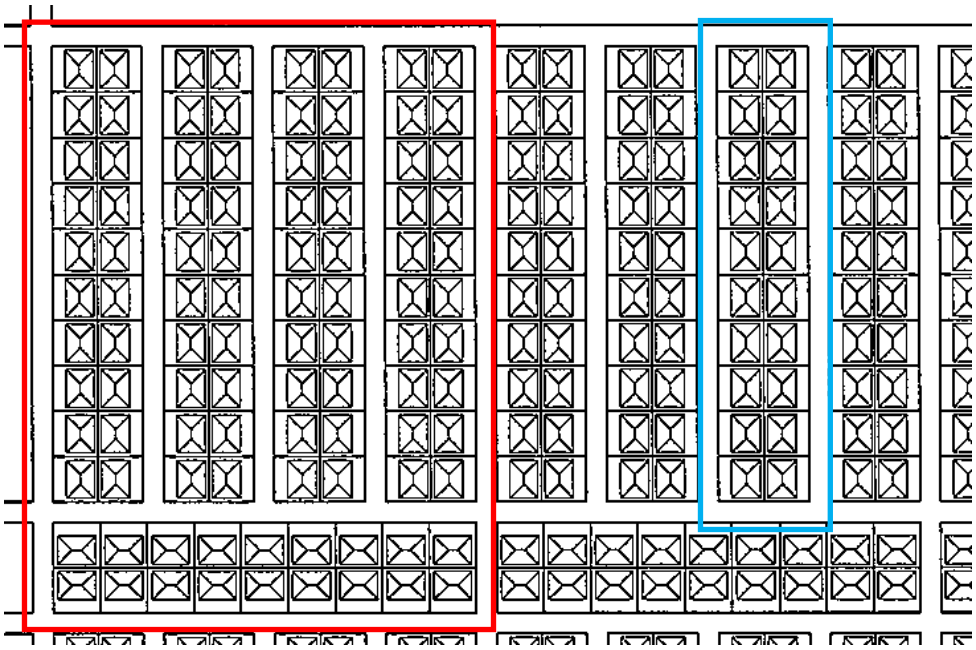
地下水低下工法の場合では、大規模に対策を計画することでコストメリットが大きくなることが想定されているため、例えば、地区単位（図 3 の全域）での解析を行うことを検討している。

図 3 は、区画道路を 6m道路、1 敷地を 13×13m（169m^2）と仮定して、534 棟の住宅を

配置したモデルである（この範囲全体の面積は約 12.1ha）。

次に、それぞれの工法の実現性を検証するために、幾つかの解析区域の範囲を設定する。例えば、地下水位低下工法と格子状改良工法のコスト比較を行うこと、および道路-宅地一体の液状化対策工法の効果を確認するため、5 街区単位（図 4 a）参照）での解析を行うことを検討している。5 街区は区画道路を 6m道路、1 敷地を 13×13m（169m^2）と仮定して、98 棟の住宅を配置した解析区域である（この範囲全体の面積は約 2.33ha）。

格子状改良工法、および個別対策工法は、1 街区単位（図 4 b）参照）での解析を行うことを検討している。1 街区は区画道路を 6m道路、1 敷地を 13×13m（169m^2）と仮定して、20 棟の住宅を配置した解析区域である（この範囲全体の面積は約 0.54ha）。



地下水位低下工法と格子状改良工法の液状化対策効果の確認解析およびコスト比較に使用

格子状改良工法および個別対策工法の液状化対策効果の確認解析とコスト算定時に使用

a）5 街区範囲：赤線枠内　　b）1 街区範囲：青線枠内

図 4　5 街区と 1 街区の解析範囲モデル図

個別対策工法で検討する解析区域は、1 街区と仮定している。ただし、格子状改良工法による「道路-宅地一体の液状化対策工法の効果」を検証した液状化対策と合わせて検討することも含まれる。図 5 に 1 街区単位で検討する場合の範囲と格子状改良の一例を示す。

a) 格子状改良工法 1 街区 5 分割　　b) 格子状改良工法 1 街区 2 分割　　c) 格子状改良工法 1 街区 2 分割

格子状改良工法（橙色線）　　＋個別工法の地中壁（緑色線）

図 5　1 街区単位の個別対策工法の解析区域と格子状改良工法と関係の一例

4.各種対策工法の検討フロー

道路と宅地の一体的な液状化対策を調査する条件（道路側の対策工法の種類、対応する地震動レベル、既存住宅の有無及び沈下・傾斜修正状況等）を考慮した「各種対策工法の検討フロー」を示す（別添 1-4 参照）。